



## 저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학박사 학위논문

해양구조물용 저온 고강도 소재 및  
신개념 구조보강재 개발 연구



2009년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

이 수 호

공학박사 학위논문

해양구조물용 저온 고강도 소재 및  
신개념 구조보강재 개발 연구



지도교수 윤길수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2009년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

이수호

이수호의 공학박사 학위논문을 인준함.

2008년 12월 19일

주 심 공학박사 나 원 배 인

부 심 공학박사 이 인 철 인

부 심 공학박사 강 충 길 인

부 심 공학박사 김 정 환 인

부 심 공학박사 윤 길 수 인

# 목 차

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| List of Figures .....           | iv   |
| List of Tables .....            | viii |
| List of Symbols .....           | ix   |
| <br>                            |      |
| ABSTRACT .....                  | x    |
| <br>                            |      |
| I. 서론 .....                     | 1    |
| 1. 연구 배경 .....                  | 1    |
| 2. 연구 목적 및 내용 .....             | 3    |
| 3. 연구 과정 .....                  | 4    |
| <br>                            |      |
| II. 해양구조물의 특성 및 개발 동향 .....     | 6    |
| 1. 개요 .....                     | 6    |
| 2. 해양구조물 기자재 국산화의 중요성 .....     | 17   |
| 3. 해양구조물용 형강 제품 .....           | 22   |
| 4. 해양구조물용 주강 제품 .....           | 25   |
| 5. 해양구조물용 저온 고강도 소재 개발 동향 ..... | 30   |
| 가. 해외 동향 .....                  | 30   |
| 나. 국내 동향 .....                  | 38   |
| <br>                            |      |
| III. 해양구조물용 저온 고강도 소재 개발 .....  | 47   |
| 1. 소재 특성 .....                  | 47   |
| 가. 주강용 소재 개요 .....              | 47   |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 나. 열처리 .....                      | 49 |
| (1) 풀림(Annealing) .....           | 49 |
| (2) 불림(Normalizing) .....         | 50 |
| (3) 담금질(Quenching) .....          | 50 |
| (4) 뜨임(Tempering) .....           | 51 |
| (5) 표면경화(Surface hardening) ..... | 51 |
| 다. 금속조직 .....                     | 51 |
| 라. 시험 설비 및 조건 .....               | 54 |
| (1) 화학적 조성 시험 장치 .....            | 55 |
| (2) 열처리로 .....                    | 55 |
| (3) 미세조직 관찰 .....                 | 56 |
| (4) 인장시험 .....                    | 56 |
| (5) 경도시험 .....                    | 57 |
| (6) 충격시험 .....                    | 57 |
| 마. 비파괴 검사 및 용접성능 조건 .....         | 58 |
| 바. 목표설정 .....                     | 59 |
| 2. 소재시험편 .....                    | 69 |
| 가. 시험편 제작 .....                   | 69 |
| 나. 화학성분 조성 .....                  | 69 |
| 다. 열처리 조건 .....                   | 70 |
| 3. 결과 및 고찰 .....                  | 79 |
| 가. 조직변화 양상 .....                  | 79 |
| 나. 조직 분석 .....                    | 80 |
| 다. 기계적 성질 .....                   | 81 |
| 라. 비파괴 검사 및 용접 성능 .....           | 82 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| IV. 해양구조물용 신개념 구조보강재 개발 ..... | 88  |
| 1. 해양구조물용 Bracket 특성 .....    | 88  |
| 2. 소재 및 해석 조건 .....           | 95  |
| 가. 소재 특성 .....                | 95  |
| 나. 형상 모델 .....                | 95  |
| 다. 해석 모델 .....                | 97  |
| 3. 결과 및 고찰 .....              | 104 |
| 가. 최대응력 분포점 비교 .....          | 104 |
| 나. 크기 및 중량, 변위량 비교 .....      | 105 |
| 다. 최적형상 도출 .....              | 106 |
| 라. Bulb bracket 경제성 검토 .....  | 106 |
| V. 요약 및 결론 .....              | 115 |
| 발표실적 및 향후계획 .....             | 118 |
| 참고문헌 .....                    | 119 |
| Appendix I .....              | 123 |
| Appendix II .....             | 165 |
| 감사의 말씀 .....                  | 170 |

## List of Figures

- Fig. 1.1 Process of the optimized design and development for this study
- Fig. 2.1 Operating area of floating type offshore structure
- Fig. 2.2 Floating type offshore structures for deep-sea development
- Fig. 2.3 197 Floating Production Systems and 76 Storage Vessels are in serviced as of March 2007
- Fig. 2.4 Floating production projects under study as of July 2008
- Fig. 2.5 Mega-trend of the offshore structure
- Fig. 2.6 The largest offshore structure ; BP Thunderhorse semi-submersible drilling rig (top) and Agbami FPSO (bottom)
- Fig. 2.7 3(three) issues in the construction market of the shipbuilding and offshore structure
- Fig. 2.8 Drilling equipments for offshore structure
- Fig. 2.9 Each beam and shape
- Fig. 2.10 Section and detail of bulb flat
- Fig. 2.11 Application cases of casting steel for offshore structure
- Fig. 2.12 Shape and section of the casting steel for knuckle part of semi-submersible drilling rig
- Fig. 2.13 Comparison between casting steel and built-up plate type
- Fig. 2.14 Each process on the development of the casting steel at

|           |   |
|-----------|---|
|           | the node point for offshore structures  |
| Fig. 2.15 | Composition rate of the patent in each country                                |
| Fig. 2.16 | Tendency of patent including duplication cases for HSLA casting steel (Japan) |
| Fig. 2.17 | Chemical composition of each cases  |
| Fig. 2.18 | Strength of each cases  |
| Fig. 2.19 | Other properties of each cases  |
| Fig. 3.1  | Full annealing temperature ranges   |
| Fig. 3.2  | Detail of Fe-C equilibrium diagram  |
| Fig. 3.3  | Microstructure for the standard carbon material                               |
| Fig. 3.4  | Mechanical properties for the standard carbon material                        |
| Fig. 3.5  | Fe-alloy equilibrium diagrams   |
| Fig. 3.6  | Test equipment of chemical composition for specimen                           |
| Fig. 3.7  | Heat treatment facility for quenching   |
| Fig. 3.8  | Heat treatment facility for tempering   |
| Fig. 3.9  | Hot mounting machine (left) and polisher (right)                              |
| Fig. 3.10 | Section of the specimen for tensile strength test                             |
| Fig. 3.11 | Section of the specimen for impact test                                       |
| Fig. 3.12 | Molding process simulation of specimen by MAGMA                               |
| Fig. 3.13 | Photographs on the production of the specimens                                |
| Fig. 3.14 | Production process of specimen  |
| Fig. 3.15 | Specimens after tensile (left) and impact (right) test                        |
| Fig. 3.16 | Chemical composition of test specimens  |
| Fig. 3.17 | Certification sheet on the chemical composition of test specimen              |

- Fig. 3.18 Specimens of materials before heat treatment
- Fig. 3.19 Comparison of microstructure ( $\times 200$ ) of 0.232%, 0.126%, 0.056% before heat treatment
- Fig. 3.20 Comparison of microstructure ( $\times 500$ ) of 0.232%(850 $^{\circ}$ C, 2hours), 0.126%(920 $^{\circ}$ C, 2hours), 0.056%(920 $^{\circ}$ C, 2.5hours) after quenching
- Fig. 3.21 Comparison of microstructure ( $\times 500$ ) of 0.126% (top; 4, 5, 6 time interval at the 580 $^{\circ}$ C), 0.056% (bottom, 500, 540, 580 $^{\circ}$ C temperature interval at the 6 hours) after tempering
- Fig. 3.22 Reference of stress strain curve for the specimen
- Fig. 3.23 Comparison of min. yield and tensile strength
- Fig. 3.24 Min. elongation ratio of min. reduction of area
- Fig. 3.25 Comparison of max. hardness and min. Charpy V-notch test
- Fig. 3.26 Result of radiographic test for specimens
- Fig. 4.1 Comparison between commercial ship (left) and concept of the this study (right) for the bracket
- Fig. 4.2 Large size bracket for pontoon corner of the semi-rig
- Fig. 4.3 Built-up type brackets
- Fig. 4.4 Example of interference between large size bracket and equipment or outfitting
- Fig. 4.5 Model cases of built-up and bulb bracket
- Fig. 4.6 Reference drawing of reinforced structure section by bracket (top) and detail of bracket by built-up type (bottom)

- Fig. 4.7 Boundary conditions for structural analysis
- Fig. 4.8 Base size of measurement H compared with size reduction
- Fig. 4.9 Mesh in the structural modeling data
- Fig. 4.10 Check of the displacement
- Fig. 4.11 Ground tow and tow grinding detail at the stress concentrated region
- Fig. 4.12 Results of structural analysis for each cases of the built-up and bulb bracket
- Fig. 4.13 Optimized results (proposed shapes) of structural analysis model for the bulb bracket (top : rolled type, bottom : casting type)
- Fig. 4.14 Cutting plan for rolled type bulb bracket.
- Fig. 4.15 Optional types of bulb design for the bulb bracket
- Fig. 4.16 Production cost comparison between built-up and bulb bracket

## List of Tables

|           |   |
|-----------|---|
| Table 2.1 | Types of offshore structures                                  |
| Table 2.2 | Mega-trend of the naval architecture and offshore structure   |
| Table 2.3 | Comparison of section properties of each shapes               |
| Table 2.4 | Chemical composition of KS D 4111                             |
| Table 2.5 | Min. Mechanical Properties of KS D 4111                       |
| Table 3.1 | Chemical and mechanical properties of carbon steel materials  |
| Table 3.2 | Classification of steel materials                             |
| Table 3.3 | Properties of chemical element for carbon steel materials     |
| Table 3.4 | Mechanical properties of standard microstructure              |
| Table 3.5 | Target Point for development of HSLA steel material           |
| Table 3.6 | Max. chemical composition table of test specimens             |
| Table 3.7 | Test condition of specimens                                   |
| Table 3.8 | Min. mechanical properties for steel casting                  |
| Table 3.9 | Comparison of CE & Pcm  |
| Table 4.1 | Comparison between the commercial ship and offshore structure |
| Table 4.2 | Materials and structural modeling conditions                  |
| Table 4.3 | Comparison between adopted materials for the casting steel    |
| Table 4.4 | Properties between each cases of built-up & bulb brackets     |

## List of Symbols

|          |  |
|----------|--|
| $A_0$    | changing point of pure iron at the 210°C             |
| $A_1$    | changing point of pure iron at the 723°C             |
| $A_2$    | changing point of pure iron at the 770°C             |
| $A_3$    | changing point of pure iron at the 912°C             |
| $A_4$    | changing point of pure iron at the 1400°C            |
| $A_{CM}$ | boundary layer between austenite and cementite field |
| Y        | austenite  |
| $\alpha$ | ferrite  |
| $\delta$ | delta iron   |
| CVN      | Charpy V-notch Number                                |
| CM       | cementite  |
| $Fe_3C$  | iron carbide, cementite                              |
| CE       | carbon equivalent                                    |
| Pcm      | cracking parameter                                   |
| Ts       | tensile strength                                     |
| Ys       | yield strength                                       |
| wt%      | weight ton percentage                                |
| b        | breadth of structure                                 |
| h        | height of structure member                           |
| M        | bending moment                                       |
| Z        | modulus of section                                   |
| $\sigma$ | bending stress                                       |

# A Study on the HSLA Material and New Type Bulb Brackets for the Offshore Structures

Soo-Ho Lee

Department of Ocean Engineering, The Graduate School.  
Pukyong National University



## ABSTRACT

This study consists of two main parts : the development of basic material and optimized structural design of a bracket for the offshore structures.

The high-strength low-alloy (HSLA) steels have low carbon contents (0.05~0.20% C) in order to possess adequate formability and weldability, and they have manganese contents up to 1.7%. Small quantities of silicon, chromium, nickel, copper, aluminum and molybdenum are used in various combinations. The results contained in this paper can provide the valuable information on the development of  $-40^{\circ}\text{C}$  low temperature HSLA.

Minimum Chemical composition of new material is consist of C 0.125%, Si 0.400%, Mn 1.160%, Cr 0.201%, Ni 0.924%, Cu 0.022%, Al 0.043%, Mo 0.053%, etc.

CE and Pcm of new materials are 0.411, 0.231 respectively, and the result of NDE is perfect.

Mechanical properties of new material are 456MPa yield strength, 600MPa tensile strength, and 69.78J at the impact test condition of  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Also, the new material has elongation of 24.5%, hardness of 67.2% and CVN value of 70J at the  $-40^{\circ}\text{C}$  impact test condition.

Furthermore, the present experimental data will upgrade 620MPa tensile strength and provide important database for casting steel materials of the offshore structure.

In other results of this study, optimized structural design of a bracket for the offshore structures has been carried out by the ANSYS program.

A new bulb bracket type is suggested, which made by rolled and casting method comparing with conventional built-up type.

Materials for new type bulb brackets is used  $-40^{\circ}\text{C}$  low temperature HSLA of 620MPa tensile strength and 450 yield strength..

For more optimized structural design of a bracket, we adopted a circular shaped stiffener at the diagonal surface line instead of

faceplate.

A new bulb shaped bracket made by rolled method is able to reduce size and weight by about 40% comparing to the built-up type.

Another new type of bulb bracket made by casting method is able to reduce size by about 20% and weight by about 50% comparing to the rolled one.

Also, production method for a rolled type bulb brackets is proposed.



# I. 서론

## 1. 연구 배경

세계 주조산업은 2005년의 경우 전년대비 약 7.5%의 높은 증가세를 보이고 있고, 국내에서도 자동차, 조선, 기계, 철강 등 전후방 관련 산업 군에 미치는 직간접 경제파급효과가 매우 큰 모든 사업의 뿌리산업으로 기여해 왔다[1].

고강도 저탄소강은 일반적으로 중량대비 탄소(C) 0.15%, 망간(Mn) 1.65%, 인(P)과 황(S)의 경우 0.035% 내외 극소량의 원소로 구성된다. 이외에 니켈(Ni), 니오비움(Nb), 질소(N), 바나듐(V), 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo), 규소(Si), 아연(Zn) 등 미량원소가 적절한 구성비로써 포함된다[2].

특히 Rudder horn 등에서 주조품 사용량이 감소하고 있는 상선[3]과는 달리 해양구조물용 저온 고강도 Casting steel 부품은 북극해를 비롯한 자원개발 영역 확대추세를 배경으로 개발요구가 증가하고 있다.

이와 같은 소재는 특징적으로  $-40^{\circ}\text{C}$ 에서 충격시험과 저탄소 및 고강도, 우수한 용접성능을 동시에 요구하고 있다. 특수소재를 적용한 주조성형품은 반잠수식시추선(Semi-submersible drilling rig)의 기둥(Column)과 폰툰(Pontoon), 기둥과 상부 데크(Upper deck)가 만나는 응력집중부(Node), 계류 및 시추용 파이프 연결부, 해저유정부 등에 주로 사용된다.

지금까지 저온 특성의 탄소강 주조를 위한 소재 및 열처리 방법에 대한 연구는 국내에서도 일부 진행되어 왔다[4]. 그러나 시장규모가 작고, 소재의 조성 및 열처리 등의 요구조건이 까다롭기 때문에 소재의 개발에 대한

연구가 활성화되지 못하였다.

DNV 등 해외 선급규정[5]에서도 해양구조물을 위한 주조용강의 저온특성에 대한 기준이 설정되어 있지 않고 있는 등 급격하게 변화하는 설계환경과 주문주의 요구사항에 따른 화학적 조성, 기계적 강도를 모두 충족시키는 소재개발에 대한 연구가 충분히 이루어지지 못하고 있었다.

국내 출원특허 가운데 일부 조건이 근접하는 소재[6]의 경우 저탄소 고강도 특성은 탄소함유량 0.08~0.12%, 인장강도 472MPa로 DNV NV 480 W소재의 수준에 해당되나 온도조건은 -20℃를 적용하고 있어 현재의 요구수준에 미달하고 있다.

한국, 일본, 미국, 유럽의 등록특허 기술들을 분석한 한국특허정보원의 특허맵[7]에 따르면, 저온영역에서는 -196~-40℃ 영역의 저온 주강용 소재개발이 있어 왔으나 대부분 탄소함유량과 강도 기준은 충족하지만 경도 값에 대한 규정이 없는 경우가 많고, Ni 함유량이 너무 높아 해양구조물 용으로는 경제성이 떨어지는 것[8]으로 확인되었다.

이러한 저온 고강도 저탄소강은 해양구조물 응력집중부 보강구조용 부품 외에 Bracket[9]이나 고압밸브 몸체용 소재[10]로도 활용이 가능하다.

현재 미국과 영국에 각각 소재한 주조 회사에서는 해양구조물용 저온 저탄소 고강도 Casting steel 부품시장을 독점하고 있으나, 이들 회사들은 도제식 생산방식을 고수하고 있고, 특허나 연구발표를 전혀 하지 않음으로써 소재에 대한 기술적 노하우의 공개가 이루어지지 않고 있다.

Bracket은 ‘까치발’이라고 하며 구조물의 연결부나 보와 벽체가 T 또는 T자형으로 만나는 부분에 집중되는 응력을 견딜 수 있도록 추가한 구조물로 주로 역직각삼각형의 형태가 많이 쓰이며, 대형일 경우 의장품과의 간섭을 줄이고 자체중량도 줄이며, 응력전달도 고려하여 끝단을 원곡선으로 처리하기도 한다[11].

선박 및 해양구조물용 Bracket은 대부분 판재를 잘라 제작하고 있으며, 보강이 필요할 경우 면재(Face plate 또는 Flange)를 사면부에, 측면보강재(Stiffener)를 복부판에 용접하고 있다.

Bracket의 두께는 통상 연결되는 보나 기둥의 모재의 복부판 두께에 맞추어 결정된다. 그러나 판재가공방법의 Bracket은 발생하는 응력에 맞추어 자유로운 두께 조절과 형상 최적화가 어렵고, 부재가 두꺼울 경우 용접량이 늘어나는 단점이 있으며, 결국 부재 사이즈 및 중량을 크게 하여 공간사용 효율을 저해하는 요인이 되고 있다.

지금까지 Bracket에 대한 연구는 생산효율을 높이는 관점에서 두께를 증가시킴으로써 면재를 생략하거나[12], 종보강재 및 수직보강재를 포함한 구조를 대상으로 Bracket을 제거하는 방법 등이 대부분이었다.

이외에도 설계시간 및 부재중량 감소를 목적으로 한 유조선의 대형 Bracket 치수 최적화 프로그램 개발[13]과 주변부재 보강으로 Bracket을 생략하는 방안의 연구[14]도 시도되었으며, 후자의 경우 공간사용효율 관점에서 접근과 어느 정도 일치점을 보이고 있지만 대형선박에 적용시 부재중량의 증가가 크게 발생하는 문제점이 지적되고 있다.

## 2. 연구 목적 및 내용

본 연구의 목적은 두 가지로 구분된다. 첫째, 해양구조물에 적합한 물성치를 가지는 주강용 저온 고강도 저탄소강 소재개발과 둘째, 개발된 소재를 활용하여 신개념 표준 구조보강재의 적용 타당성을 찾는 것이다.

따라서 탄소함유량을 0.25% 이하로 설정한 가운데 미량원소의 함유량을 3가지로 변화시킨 조건으로 나누어 시편을 개발하였고, 다양한 열처리 조건을 적용하여 강도, 인장율, 연신율, 단면수축률, 충격치 등 기계적 물

성치의 목표수준을 DNV-OS-B101 NV 550 W 및 NV 620 W 소재품질 기준에  $-40^{\circ}\text{C}$  충격시험 조건을 추가한 상태로 설정하여 비교평가하였다.

또한 개발소재의 용접성능 확보를 위해 탄소당량(CE)과 용접균열감수성지수(Pcm)를 산출하여 적절성을 판단하였다.

이와 함께 엄격한 중량관리와 공간의 효율적인 사용이 강조되고 있는 해양구조물에서 Bracket의 적정 형상을 도출하기 위해 종전의 판재가공방법(Built-up type)이 아닌 압연 및 주조 공정을 이용한 신개념 표준 구조보강재(Bulb bracket)를 개발하기 위해 구조해석을 통해 각각의 개념에 대해 상호 비교하였으며, 최적 형상에 대한 표준화를 시도하였다.

### 3. 연구 과정

본 연구는 원천소재 개발과 이를 활용한 신개념 표준 구조보강재의 최적설계로 나누어 진행되었으며, 세부 진행과정은 Fig. 1.1과 같다.

구체적으로는 해양구조물용 강으로 적합한 원천소재의 경우 저온( $-40^{\circ}\text{C}$ ), 저탄소(0.25% 이하), 고강도(Ref. 1 : 인장강도 550MPa 이상, 항복강도 355 MPa 이상, (Ref. 2 : 인장강도 620MPa 이상, 항복강도 430 MPa 이상)의 주조용 탄소강 소재를 얻기 위한 화학적 조성, 열처리 방법, 용접성능에 관한 표준 데이터를 확보하는 것이다.

원천소재 개발이 완료되면, 실제 주조용 특수 구조용 부품뿐만 아니라, 표준화된 신개념 보강재(Bracket)에 최적형상을 설계하고 여기에 개발된 원천소재를 적용함으로써, 구조물 내부의 장비 및 의장품의 설치를 위한 공간적 효율 향상을 평가하였다.

이를 통해 얻어진 연구 성과를 바탕으로 다음 단계에서 진행되는 주조 공정 및 용접결함수정을 통한 제품 생산 및 상용화 개발과정에 대해서는

본문에서 제외하였다.

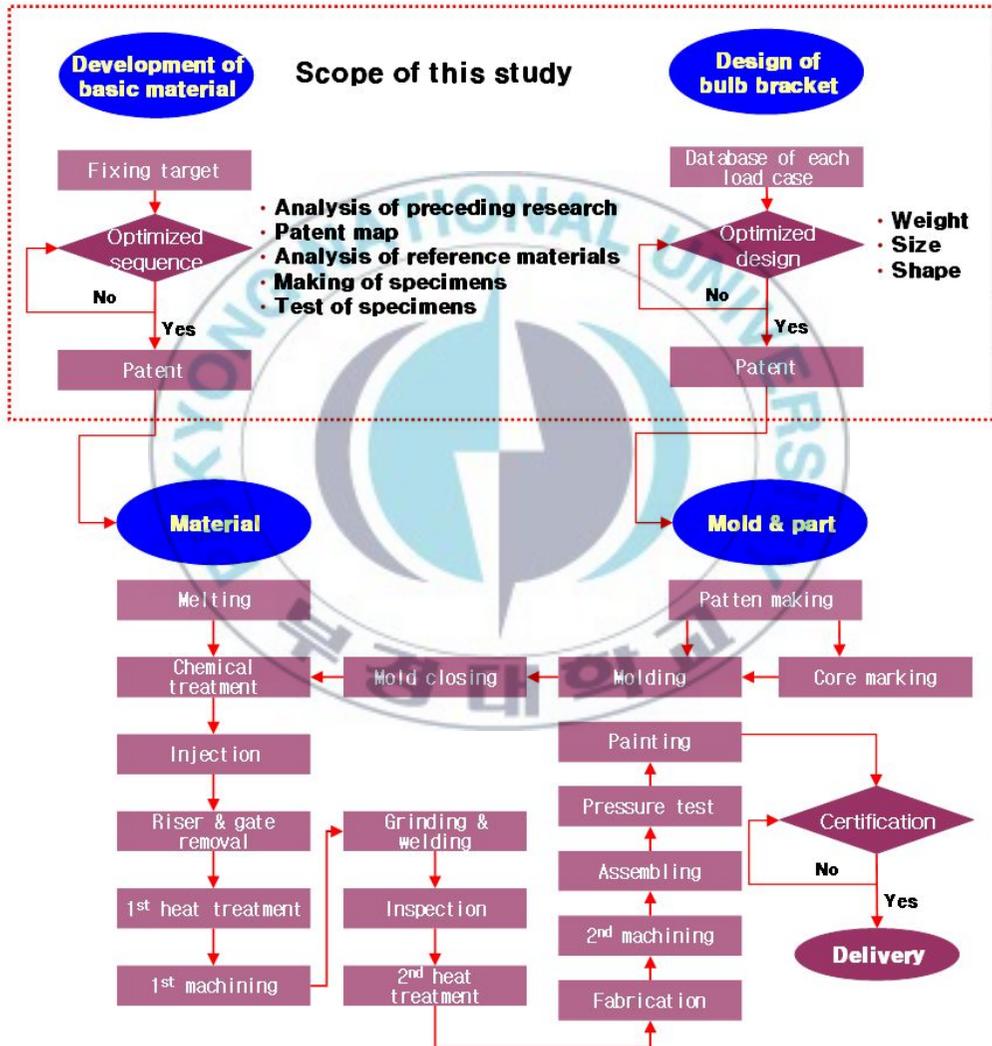


Fig. 1.1 Process of the optimized design and development for this study

## Ⅱ. 해양구조물의 특성 및 개발 동향

### 1. 개요

세계적으로 에너지와 자원의 수요증가와 가격급등이 최근에 더욱 뚜렷이 진행되고 있는 가운데 해양구조물의 수요와 가격도 동반 상승하고 있으며 향후 5년 이후에도 지금과 같은 추세가 계속될 것으로 전망된다.

해양구조물은 형태에 따라 크게 위치고정 방식에 따라 고정식과 부유식, 유연식 그리고 기타로 분류되며, 심해에 적용이 가능한 부유식과 유연식을 중심으로 수요의 급증과 기술개발의 집중이 이루어지고 있으며, 북극해를 대상으로 한 극지방 자원개발 움직임이 최근 들어 더욱 활발히 진행되고 있다.

Fig 2.1의 IMA 자료[15]에 따르면 FPSO(Floating Production Storage and Offloading), 반잠수식시추선(Semi-submersible Drilling Rig), TLP(Tension Leg Platform), Spar 등을 비롯한 부유식 구조물 형식의 석유 및 가스 개발설비는 전 세계 해역에 고르게 위치하고 있으며, 2008년 7월 기준으로 222기에 달하며, 저장시설은 87기에 이른다.

고정식 구조물은 해저에 움직이지 않는 기초에 의해서 고정된 구조물로서 재킷(Jacket)과 같은 파일기초 구조물과, 선체(Hull)와 여러 개의 다리(Leg)로 구성되어 있으며 승강장치(Jacking system)에 의해 선체와 다리를 승강시킬 수 있는 잭업(Jack-up)형과 콘크리트 플랫폼과 같은 중력기초구조물로 구분이 가능하다.

Fig. 2.2에서 보는 바와 같이 부유식구조물(FPU; Floating Production

Unit)은 해저에 직접적으로 고정되지 않는 상태에서 부유된 상태로 작업을 수행하는 구조물로 정의되며, Derrick 및 Pipe Handling System 등의 Drilling 장비를 선박에 탑재한 형태의 시추선(Drillship), 기둥(Column)에 의해 갑판(Deck)과 폰툰(Pontoon)이 연결되어 지지된 형태의 반잠수식 구조물, 선박형태의 부유식 원유 생산저장 및 하역설비인 FPSO 등으로 구분할 수 있다. 유연식은 반잠수식 구조물을 인장을 받는 긴 계류용 줄(Tendon)에 의해 해저와 연결하여 위치를 고정시키는 구조물인 TLP, 긴 원통형상을 가지면서 해면에 잠긴 긴 원통형의 구조물 윗부분은 저장장소로, 아래 부분은 구조안정을 위한 역할을 담당하는 Spar 등이 포함되며 넓은 의미에서는 부유식으로 분류가 가능할 것이다.

이외에도 해상공장, 해상공항, 부유식 인공섬 등 Mega Float(또는 VLFS; Very Large Floating Structure)로 지칭되는 초대형 해양구조물과 해저·해중 도시 등 해양레저를 위한 시설군들이 기타로 분류된다[16].

설치해역의 수심에 따라서 Table 2.1[17]에서 보는 바와 같이 천해용과 심해용으로 구분되며 부유식이라 하더라도 1980년대까지는 천해용이 대부분이었지만, 1990년말부터 급격한 심해화 경향이 나타나고 있다. 2007년말 설치수심 3,600m, 채굴심도 12,000m 제품이 발주되어 설계에 착수하였다.

현재 심해화를 주도하는 선종은 반잠수식시추선, 드릴십, TLP, Spar, FPSO 등이다. 이들 심해용 부유식 해양구조물 시장은 Fig. 2.3에서 보는 바와 같이 2007년 3월말 현재 총 197기가 운용 중에 있으며 FPSO가 약 60%, 반잠수식시추선이 20%, TLP가 10%, SPAR 8%, 기타 2%로 구성되어 있다[18]. 2008년 6월말 기준으로 보면 총 222기가 운용 중에 있으며 FPSO가 약 62%, 반잠수식시추선이 18%, TLP가 10%, Spar 7%, 바지타입 1%, FSRU 1%로 구성되어 있으며, 앞으로 FPSO가 안정적 수요를 유지하는 가운데 드릴십, FSRU 등의 시장진입이 본격화될 것이다[15].

조선해양산업의 메가트렌드는 Table 2.2의 지식경제부의 통합기술로드맵[19]에 따르면 대형화를 기본으로 새로운 형식 또는 기존 기능을 조합한 복합기능의 다양한 제품군이 선보이고 있다는 점인데 이와 같은 특성은 해양구조물 분야에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다[20][21].

2008년 7월 기준 타당성검토가 진행 중인 부유식 해양구조물은 Fig. 2.4에서 보는 바와 같이 총 141기에 달하며 아프리카와 브라질, 걸프해, 북해 등에 약 80%가 집중되어 있다[15].

Fig. 2.5에서와 같이 대형화, 심해화, 극해진출 등의 메가트렌드를 보이는 해양시추구조물 특성상 설치해역의 수심이 깊을수록, 크기가 커질수록 보다 높은 응력이 발생되며, 반복하중으로 작용하는 특성을 가지고 있다. 저온 고강도 저탄소 소재의 Casting steel 부품은 응력집중부에서 극후판 사용시 과도한 용접과 균열, Lamella tearing 발생 가능성[22]을 차단하고, 응력분포에 따른 적절한 형상적 대처가 가능한 장점이 있다.

Fig. 2.6에서는 국내 대우조선해양(주)가 건조한 세계 최대 규모의 반잠수식시추선 BP Thunderhorse project(2004년)와 Agbami FPSO(2008년)를 보여주고 있다.

이상과 같이 해양구조물은 대형화, 극한영역, 복합다기능화를 수행하기 위해서는 지금까지와는 다른 환경외력에 적합한 구조형식 및 재료가 필요하다. 본 연구를 통해 개발된 소재 및 부품은 이러한 요구조건을 충족시키는데 매우 중요한 역할을 하게 될 것으로 기대한다.

또한 개발된 원천소재는 기계적 물성치 및 미량원소에 대한 화학적 조성비, 열처리 조건 등을 부분적으로 응용, 보장한다면 잠수함[23][24]의 Pod의 지지를 위한 Skeg와 수납용기를 비롯한 외부구조 및 해양광물자원의 채광과 이송을 위한 시설[25][26], 방위산업용과 원자력 등의 발전설비용 부품 소재로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

Table 2.1 Types of offshore structures

| Classification                                     |   | Description   | Remarks  |
|--|---|---|--|
| D<br>e<br>e<br>p<br><br>s<br>e<br>a                | Drillship   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erection of drilling system on drillship</li> <li>- In 1999, order and building at the Korea</li> <li>- In 2007, building and delivery of arctic drillship</li> </ul>  |  |
|  | SEMI<br>(Semi-Submersible Drilling Rig)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Consist of deck, lower hull, column and pontoon</li> <li>- Use to Radial Mooring system</li> </ul>   | Large scale  |
|  | TLP<br>(Tension Leg Platform)                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Similar to Semi-submersible type</li> <li>- Use to tension leg Mooring system</li> <li>- Apply to limited field of Mini-TLP</li> </ul>   | No more than efficiency comparing with Spar, FPSO              |
|  | Spar  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A platform which consist of one column, similar behavior characteristics with Semi-submersible</li> <li>- Apply to radial Mooring system and VLA</li> <li>- Changing Classic C → Truss S. → Cell S.</li> </ul>   |  |
|  | FPSO<br>(Floating, Production, Storage and Off-loading) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Floating type of production, storage, off-loading facility</li> <li>- Maximum storage capacity due to Hull structure</li> <li>- Apply to turret mooring system</li> <li>- Demand of LPG FPSO, LNG FPSO</li> <li>- Expect to increasing demand of GTL FPSO</li> </ul> | The world best system for floating type of offshore structures |
| S<br>h<br>a<br>l<br>l<br>o<br>w<br><br>s<br>e<br>a | Jack-up   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Jack-up type platform (consist of deck platform and leg)</li> <li>- Operation in water depths of less than 150m</li> </ul>   |  |
|  | Jacket  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Truss structure with structure pipes</li> <li>- Up to 300~412m dept</li> </ul>   |  |
|  | GBS (Gravity Base Structure)                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Use of gravity and concrete structure designed for a strong wave condition</li> <li>- Column shape structure is general type but possible to box-shape</li> </ul>  |  |
|  | FSRU (Floating Storage and Regasification Unit)         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Shallow sea floating type of LNG storage and regasification plant alternated for storage base on the ground</li> <li>- High price multiple plant</li> <li>- High market potential</li> </ul>   |  |
|  | VLFS (Very Large Floating Structures)                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Developed for apply to sea space such as near seaport and airport</li> <li>- In case of Japan, accumulate evidence structure design, building and application evidence</li> </ul>  |  |

\* Data : ITEP(2005)

Table 2.2 Mega-trend of the naval architecture and offshore structure

| Mega Trend         | ~2012   | ~2017   | ~2022  |
|--------------------|---|---|--|
| Commercial ship    | Very large scale<br>(15,000TEU container ship, 27K LNGC)        | Ultra large scale<br>(18,000TEU container ship, 360 K LNGC) |  |
|                    | Ice class technology  | Ice breaker tech (more than -40°C)                          | Extreme environment (below -40°C)                      |
|                    | Transportation for land resources                               | Transportation for ocean resources<br>(gas hydrate, etc.)   | Transportation for land resources<br>(minerals, etc.)  |
|                    | Port-to-Port  | Hub-to-Hub  |  |
|                    | Diesel/steam propulsion   | Electric propulsion   | Fuel cell propulsion                                   |
|                    | Tourism/transportation<br>(ferry, Ro-Pax)                       | Large scale cruise ship<br>(100,000 GT class)               | Very large scale cruise ship<br>(more than 150,000 GT) |
|                    | Small marine leisure boat<br>(motor boat/yacht)                 | Large marine leisure boat<br>(mega boat, mega yacht)        | New type of marine leisure facilities                  |
| Production         | Floating/land construction                                      | Tera technology   | Digital shipbuilding                                   |
| Offshore Structure | Large depth (below 4,000m)<br>Arctic technologies (below -20°C) | Very large depth & arctic (more than 4,000m & below -20°C)  |  |
|                    | crude oil and natural gas                                       | ocean minerals  |  |
|                    | Simplified function<br>(drilling or production)                 | Multi-function (drilling and production, chemical plant)    |  |

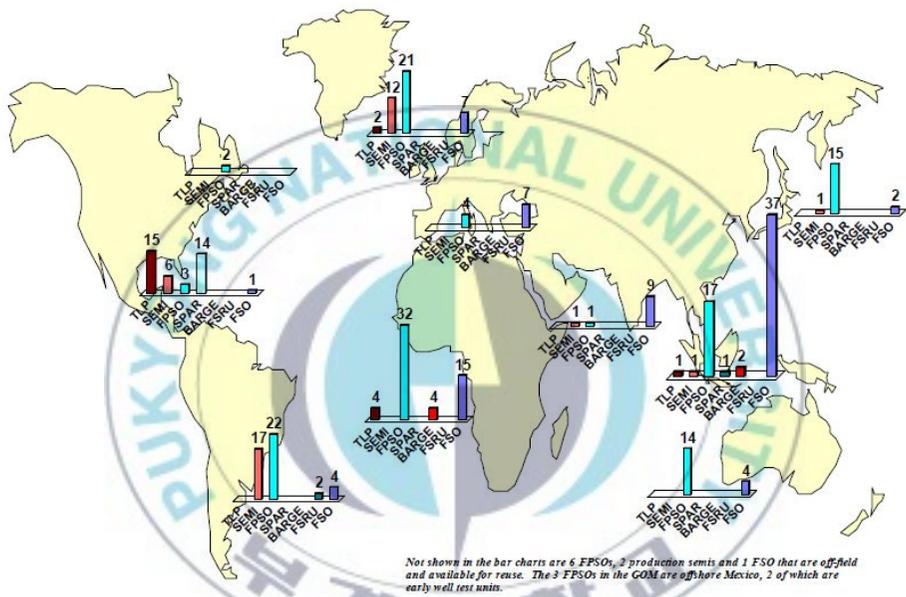


Fig. 2.1 Operating area of floating type offshore structure

(Data ; IMA, 2008. 07)



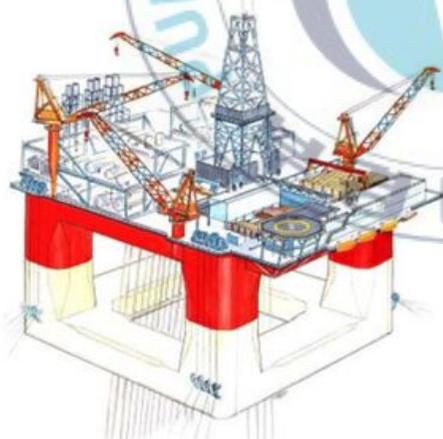
**FPSO**



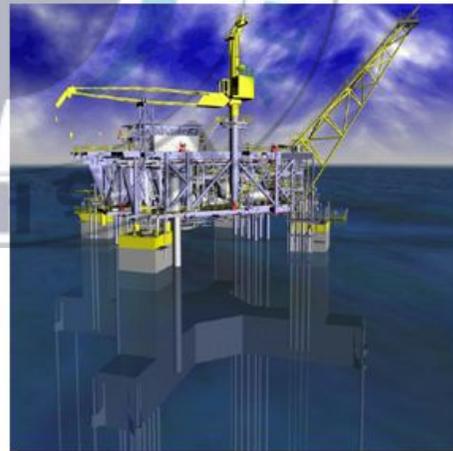
**Spar**



**Drillship**



**Semi-submersible rig**



**TLP**

**Fig. 2.2 Floating type offshore structures for deep-sea development**

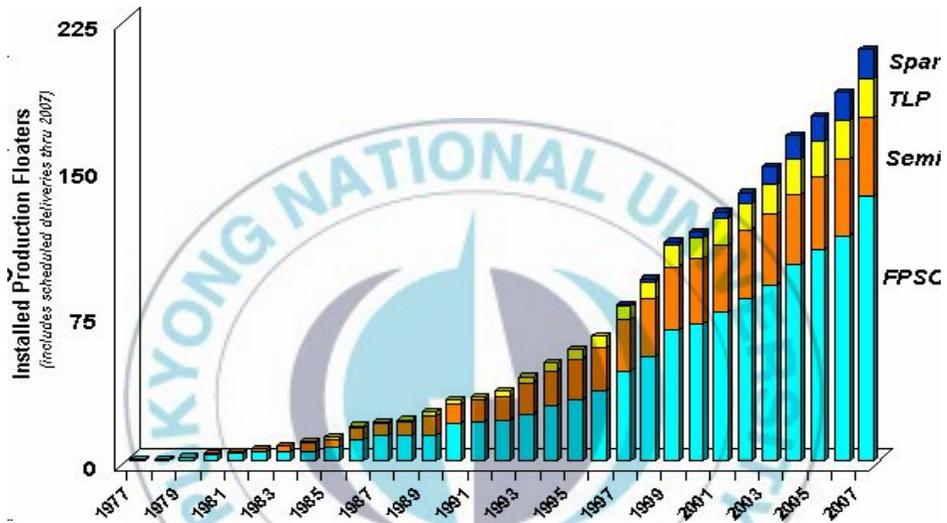


Fig. 2.3 197 Floating Production Systems and 76 Storage Vessels are in serviced as of March 2007 (Data : IMA, 2007.03)

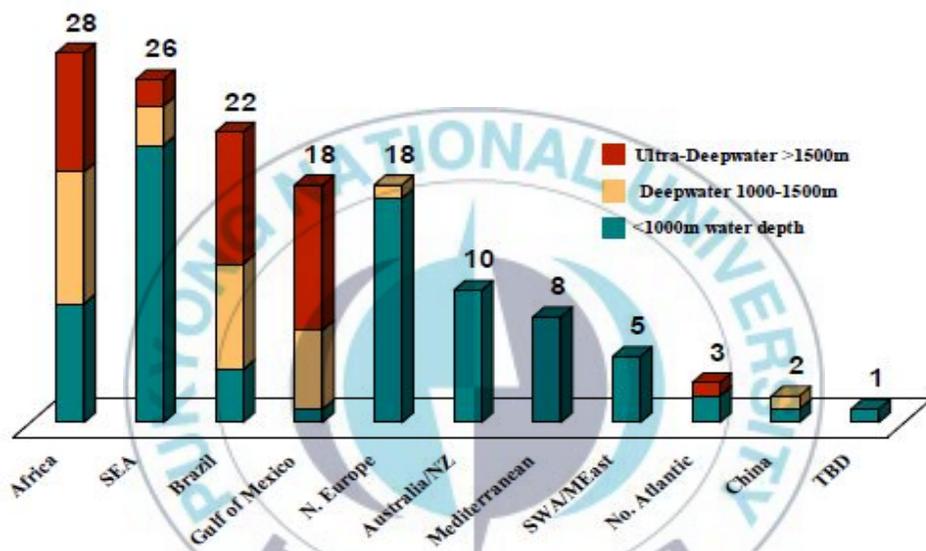
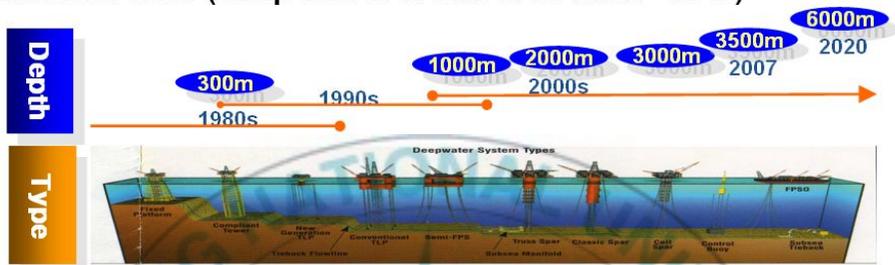


Fig. 2.4 Floating production projects under study as of July 2008  
(Data : IMA, 2008.07)

- Extreme field (deep sea & arctic area blow  $-40^{\circ}\text{C}$ )



- Ultra-size



- Multifunction & new type facilities

Fig. 2.5 Mega-trend of the offshore structure



Fig. 2.6 The largest offshore structure ; BP Thunderhorse semi-submersible drilling rig (top) and Agbami FPSO (bottom)

## 2. 해양구조물용 기자재 국산화의 중요성

2002년부터 세계 1위에 올라선 조선해양산업에서 기자재 국산화는 ‘백년지대계(百年之大計)’란 표현이 사용되기도 한다. 건조 및 제작 분야에서의 경쟁력에 대해 비관론적인 입장에서는 2015년, 낙관론적인 그룹은 2025년까지 세계시장을 국내 조선소가 주도 예상하고 있다.

정확히 단언하기는 어렵지만 건조분야에서의 시장지배력이 약화된 이후에도 현재의 성과를 계속해서 향유하기 위해서는 엔지니어링 분야 핵심 기술력 향상과 전방산업군인 기자재 개발이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

유럽의 예를 살펴보면 건조분야가 쇠락 이후에도 50여년 동안 엔지니어링 분야를 주도하고 있으며, 특히 해양구조물, 잠수함, 크루즈선 분야에서는 지금도 여전히 강세를 보이고 있다.

특히 기자재산업의 경우 유럽이 엔지니어링 분야에서의 주도권을 상실한 이후에도 50여년 이상 세계적인 경쟁력을 계속해서 구가할 것으로 예상하고 있다.

성공한 기자재 국산화란 Fig. 2.7에 요약한 바와 같이 ‘구매사양서 (Contract Technical Specification)에서 제시하고 있는 품질기준을, 주어진 납기에 맞추어, 경쟁사 대비 저렴한 가격으로, 주문주의 선호도에서 우선순위를 확보하여 생산하는 것’을 의미한다[27].

또한 품질은 안전한 구조물, 안전한 설비를 기본요소로 계약사양 하에서 최대한의 성능을 발휘할 수 있어야 하며, 사후 품질관리도 하나의 요소로 포함된다.

이와 같은 시장의 요구는 수요와 공급이 역전되어 시장경제원리가 제대로 작동하지 않은 해양구조물 기자재 시장이라고 해도 이러한 원칙은 예

외일 수 없다.

기자재국산화의 효과는 해외조달시 6~7개월 소요되는 조달기간을 2~3개월로 단축이 가능하며, 가격측면에서도 수송비 및 관리비를 대폭 줄여주며, 품질관리 측면에서도 수요자 공급자 사이의 커뮤니케이션이 원활히 이루어지고 직접 생산과정에 수요자가 참여할 수 있다는 이점이 있다.

다만, 품질의 마지막 요소를 구성하는 사후관리(A/S) 측면에서는 이미 세계적 공급망을 가진 기존 독점적 시장지배그룹에 비해 열악하다는 한계가 지적될 수 있다.

Fig. 2.8에서 보는 바와 같은 시추설비를 비롯한 각종 해양구조물 소재 및 부품에 대한 기자재 국산화가 성공하기 위해서당사자인 기자재업체 및 수요자인 대형조선소, 그리고 관련 기관 및 단체들의 역할들과 협력방안들을 다음과 같이 정리하였다[28].

먼저, 정부의 국가기술정책을 주관하고 있는 산업자원부에서는 수요자와 공급자가 참여한 가운데 실행가능한 산업기술로드맵을 만드는 것이 무엇보다 중요하다. 상선과 달리 해양구조물 분야의 기술로드맵에 대한 구체적인 접근이 이루어진 것은 최근의 일로 해양구조물 산업분야의 정확한 메가트렌드 예측과 이에 대비한 기술 및 기자재 기술로드맵의 구체화가 진행되어야 할 것이다. 또한 성공적으로 개발이 완료된 기자재에 대해서는 해외 전시 등의 참가를 유도하고 절차와 비용 측면에서 적극적인 지원책을 강구해야 할 것이다.

둘째, 기자재의 수요처인 조선소에서는 기자재업체와 공동으로 제품사양을 개발 또는 개량하는 작업에 주도적으로 참여해야 할 것이다. 엔지니어링 능력이 취약한 중소 기자재업체에 개발의 전체를 맡겨 놓기 보다는 협력 프로그램 가동을 통한 역할분담으로 개발과정에서 발생할 수 있는 시행착오를 최대한 줄여야 할 것이다.

셋째, 해양구조물 분야 기자재 국산화에 참여를 희망하는 업체들의 의식전환이 필요하다. 이들 상당수 업체들의 경우 선박이나 해양구조물 분야에 대한 경험이나 이해도가 낮은 편이라고 할 수 있다. 때문에 국제표준이나 규정의 적용과 제품생산 과정의 표준화 절차를 무시하고 과거 타 기술분야에서 얻은 한정된 경험을 기준으로 제품의 품질이나 성능에 관한 설계기준들을 과소평가하거나 선불리 단정하는 경우들을 많았다는 점에서 반성이 필요하다.

넷째, 지역소재 대학 및 연구기관의 적극적인 활용이 필요하다. 이들 기관들은 공동 또는 위탁 연구를 통해 중소기업이 보유하지 못한 기술을 제공해 주는 역할뿐만이 아니라 우수한 기술인력의 양성과 공급 역할을 하므로 적극적인 기술협력 및 유대강화가 중요하다. 또한 해양구조물 기자재 개발에 필수로 요구되는 해외 선급의 인증서 취득업무에 대한 도움을 이들 기관으로부터 받을 수도 있을 것이다.

다섯째, 한국조선기자재공업협동조합, 한국조선기자재연구원(KOMERI), 중소조선연구원(RIMS) 등의 경우 중소기업이 개발에 성공한 우수한 품질의 제품이 주문주로부터 신뢰를 받을 수 있도록 공인인증서 획득뿐만 아니라 신뢰성의 검증, 적극적 해외 전시 참가 및 홍보 등에 필요한 충분한 기술적 지원에 나서야 할 것이다.

여섯째, 취약한 현지 A/S기능의 보완을 위해 공동 A/S망의 개설 등에 대한 타당성도 사전 검토가 필요하다. 이와 함께 환경과 안전으로 대표되는 IMO, ISO 등 관련 국제표준의 선점을 통해 시장 독점을 추구하는 각국에 대해 중소기업 또는 조선소가 개별적으로 대응하는 것에는 한계가 분명함으로 정부 및 유관기관, 기업의 공동 대응 노력이 중요하다고 할 수 있다.

마지막으로 개발된 기술에 대한 특허등록 등 기술자산의 보호에 대해

기자재개발을 주관하는 해당 기업, 기술지원에 나서는 조선소 등이 각별한 관심을 가져야 할 것이다.

파리조약 5의 3 규정 및 이에 기초한 국내 특허법 제96조의 2 규정에 따라 ‘자국을 통과하는데 불과한 선박·항공기·차량 또는 이에 사용되는 기계·기구·장치, 기타 물건’의 경우 특허권의 효력이 미치지 아니하는 범위에 있다. 단지 ‘그 국가를 통과하는데 불과하다’는 표현은 상업적인 목적으로 정기적, 부정기적으로 입항하는 것까지 포함하는 것으로 해석되며 화물 및 사람의 운송 보호 및 물동량의 원활한 교류를 통한 세계 경제 활성화가 주된 목적이기 때문이다.

그러나 플로팅크레인, 준설선 등과 같은 작업선을 가동목적으로 이동하는 경우 운용국가의 특허권 적용이 미치는 것으로 보아야 하며, Drillship, LNG-RV 등과 같이 선박과 해양구조물의 중간성격에 해당하거나 해상에 계류 또는 고정되는 해양구조물은 기본적으로 속지주의를 채택하는 특허권의 성격상 선박과는 적용범위가 다르다고 보아야 한다.

따라서 해양구조물 자체를 포함 개발되는 국산화 기자재 또한 건조조선소, 선적국, 선주 소재국, 작업해역이 속하는 국가의 특허권리에 대한 지배를 각각 받을 가능성이 매우 높기 때문에 국내외 특허권의 확보가 향후 개발된 시장을 안정적으로 지키는데 큰 기여를 하게 될 것으로 예상된다.

이러한 노력들을 바탕으로 설정된 해양구조물 분야 기자재 시장의 1차적인 목표는 해양구조물을 건조하고 있는 국내 대형조선소가 중심이 된 내수시장에 성공적으로 진입하는 것이다. 이를 위해서는 상선분야에서 축적된 기술을 통해 해양구조물 기자재의 성능과 품질을 특화할 필요가 있으며, 해양구조물 분야에 성공적인 적용 이후에는 잠수함 및 발전설비, 육상플랜트 분야와 함께 해외시장으로 진출함으로써 규모의 경제를 도모해야 할 것이다.

- **Delivery time**
- **Price**
- **Qualities**
  - 1) **Safety**
  - 2) **Max. performances or capacities below contract requirements**
  - 3) **After service**

Fig. 2.7 3(three) issues in construction market of the shipbuilding and offshore structure



Fig. 2.8 Drilling equipments for offshore structure

(Data : Aker Kvaener)

### 3. 해양구조물용 형강 제품

형강(Rolled beam 또는 Steel sections)은 단면의 형태가 일정하도록 압연하여 만든, 단면보다 길이가 더 긴 구조용 압연강재를 총칭한다.

보통 강역의 경우 1150~1300℃, 특수강의 경우 1050~1200℃로 가열한 강편을 여러 가지 공형(孔型)롤로 성형하게 되며, 단면의 형상에 따라 봉강, I형강, H형강, T형강, L형강, D형강 ㄷ형강, Z형강 등으로 부른다.

일반건축용 강재로는 Fig. 2.9에서 보는 바와 같은 범종류가 많이 사용되지만, 선박이나 해양구조물에서는 Fig. 2.10에서와 같은 구평형강(Bulb flat)은 판구조에서 주로 주판(Deck plate or bulkhead)의 거더(Girder)나 기둥(Column) 사이에서 일정간격(Scantling space) 단위로 횡방향 또는 종방향 보강재로 사용되는 것으로 L형강재(Angle)보다 부재 끝단의 꺾인 부분의 목두께가 상대적으로 두껍다. Bulb flat은 강교량이나 건축 등에서도 사용되지만 주로 상선과 해양구조물에 많이 사용되고 있으며, Table 2.3에서와 같이 높이의 Flat bar나 L형강에 비해 단면계수가 증가하고 특히 선단부가 두껍기 때문에 선단부의 변형을 줄이는데 큰 효과가 있다.

Bulb flat은 일반 판재용 소재를 활용한 압연방식으로 생산되기 때문에 표준화 및 대량생산이 가능한 장점이 있다.

그러나 형강재의 경우 형틀을 이용하기 때문에 표준규격품 이외에는 적용이 어렵고, 대형사이즈의 제품의 경우 사용빈도가 낮기 때문에 표준규격품이 양산되지 않는 실정이다.

따라서 고정식플랫폼 등의 해양구조물용의 뼈대구조나 Jacket용으로 제작되는 대형사이즈 구조용 부재는 형강이 아닌 Built-up으로 제작되는데 범은 판재를 잘라 용접하는 방법으로 만들고, 강관은 판재를 자른 다음 롤링을 통해 말아 이음매를 용접하는 방식으로 제작된다.

**Table 2.3 Comparison of section properties of each shapes**

| Classification | Dimensions    | Area of section (cm <sup>2</sup> ) | Mass per unit (kg/m) | Modulus of section (cm <sup>3</sup> ) |
|----------------|---------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Flat bar       | 400×13        | 52.00                              | 40.82                | 346                                   |
| Unequal Angle  | 400×100×13/18 | 68.59                              | 53.80                | 467                                   |
| Bulb flat      | 400×13        | 77.40                              | 60.80                | 476                                   |



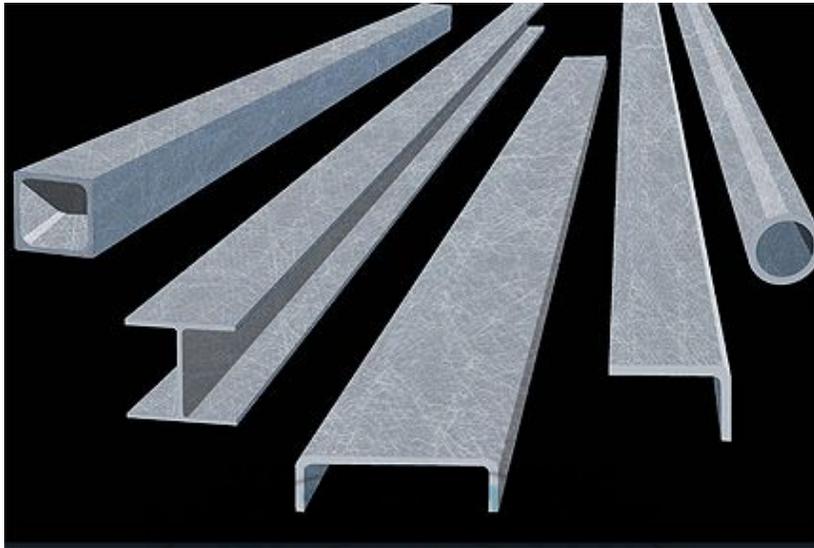


Fig. 2.9 Each beam and shape

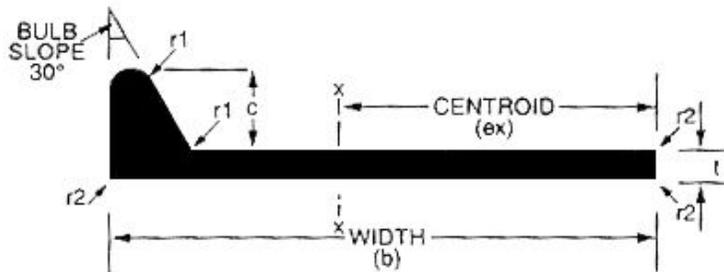


Fig. 2.10 Section and detail of bulb flat

## 4. 해양구조물용 주강 제품

주조방식으로 구조용 부품을 만들었을 때 일반적으로 취할 수 있는 장점은 다음과 같은 것들이 있다.

- ① 두께가 두껍거나 복잡한 형상에 적용할 수 있다.
- ② 컴퓨터를 통해 형상을 디자인하고, 목형을 가공할 수 있다.
- ③ 화학적인 조성을 필요에 따라 다양하게 변화시킬 수 있다.
- ④ 검사과정에 대한 절차가 선급이나 각종 국제규격에 정립되어 있다.
- ⑤ 하중에 따라 부재의 두께를 부분적으로 변화시킬 수 있어 부품의 중량을 최적화시킬 수 있으며, 결과적으로 크기도 줄일 수 있다.

DNV(2001) 등 각 선급에서는 Casting steel을 위한 탄소합금강의 Charpy V-notch Test 조건을 0℃로 규정하고 있는 관계로, 이보다 높은 수준이 요구되는 심해 및 극해지역에서의 적용을 위해서는 주문주 사양서에서 요구하고 있는 -40℃에서의 충격시험조건을 충족할 필요가 있다.

해양구조물에 적용 중인 Casting steel 부품의 대표적인 사례라고 할 수 있는 반잠수식시추선의 응력집중부에서의 제품 및 사례는 Fig. 2.11 및 Fig. 2.12와 같다. 국내에서는 Fig. 2.14에서 보는 바와 같은 반잠수식시추선의 응력집중부에 적용되는 Casting steel 국산화 연구가 본 연구와 병행하여 진행되고 있다.

이와 같은 소재부품은 Fig. 2.13에서 보는 바와 같이 3D 형상으로 주조공정을 통해 제작되며, 판재를 절단한 후 용접으로 만들어지는 구조물에 비해 재료의 물성치도 우수하고, 완만한 응력전달구조 및 발생응력에 맞추어 두께의 조절이 가능하여 최적 형상 및 크기로 설계가 가능하다.



Fig. 2.11 Application cases of casting steel for offshore structure



Fig. 2.12 Shape and section of the casting steel for knuckle part of semi-submersible drilling rig

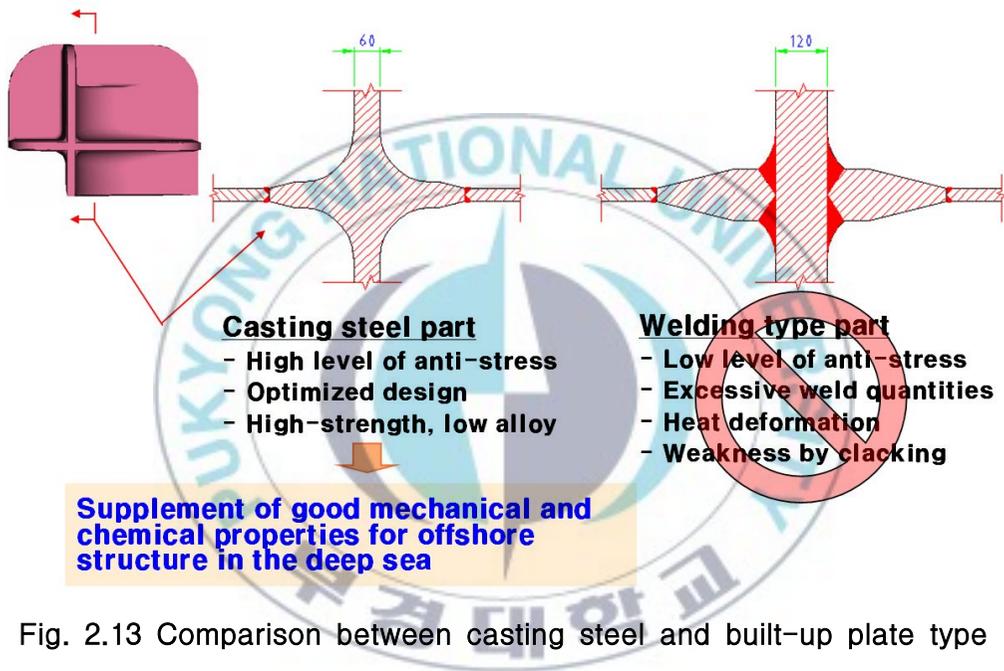


Fig. 2.13 Comparison between casting steel and built-up plate type

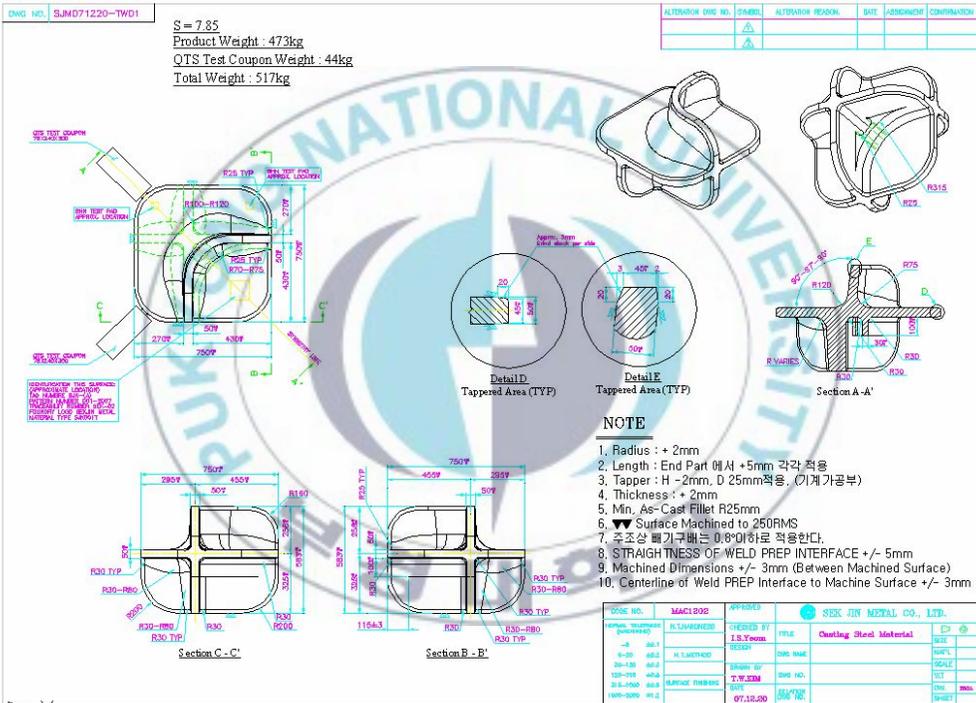
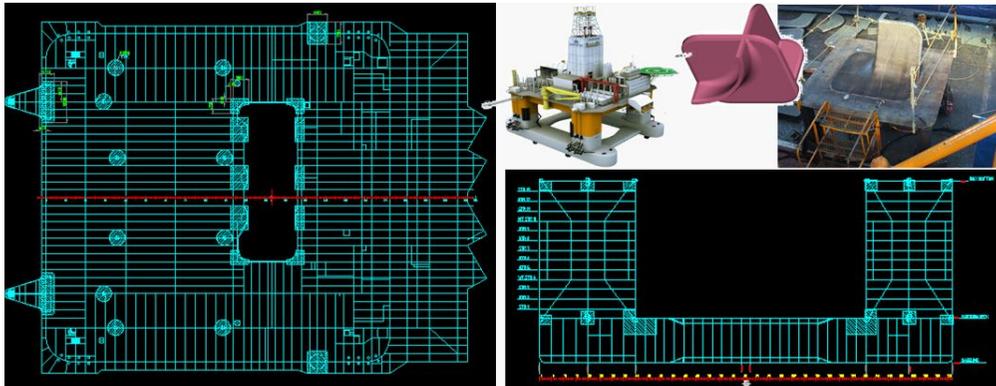


Fig. 2.14 Each process on the development of the casting steel at the node point for offshore structures

## 5. 해양구조물용 저온 고강도 소재 개발 동향

### 가. 해외 동향

해양구조물용 저온 고강도 저탄소강에 대한 개발동향을 파악하기 위해 한국특허정보원에 의뢰하여 ‘해양구조물용 저온고강도 Casting Steel’에 대한 특허분석을 실시하였다[7].

세부적으로는 일반 Casting steel 및 저온강재에 대한 정량적 통계와 해양구조물용 저온 고강도 Casting steel의 특허건수와 점유율을 비교한 후 해양구조물용 저온 고강도 Casting steel의 주요 특허분석 및 조성과 물성치 등에 대한 비교분석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

① 해양구조물용 저온 고강도 Casting steel은 일반 Casting steel과는 유사한 연도별 분포를 보이면서도 Casting steel의 전체특허건수와 비교해 볼 때 매우 적은 량의 특허건수를 나타내어 기술활동이 적은 편이었으며, 저온강재의 경우 매년 꾸준히 20건 수준의 특허가 출원되고 있다. 전 세계 일반 Casting steel 특허는 전체 616건이며 일본 공개특허 519건, 미국 등록특허 41건, 유럽 공개특허 38건, 한국 공개특허 18건으로 일본특허의 비중이 특히 높다. 일본의 경우 1975년 일본의 KUBOTA사에 의해 저온영역에서 사용하는 용접성이 우수한 고강도 Casting steel에 대한 특허가 출원된 이후 지속적으로 출원되었으나, 80년대 후반부터 출원량이 감소하여 현재는 매우 미미한 수준이다.

② 해양구조물용 저온 고강도 Casting steel 기술은 전세계에 PCT(Patent Cooperation Treaty) 2건을 포함 102건의 특허가 출원·등록되고 있다.

③ 해양구조물용 저온 고강도 Casting steel에 대한 특허는 Fig. 2.15에서 보는 바와 같이 일본에서 출원된 특허가 92건(90%)로 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 한국의 경우 4건(4%), 미국과 유럽연합이 각각 3건(3%)의 특허가 출원되었다.

④ Fig. 2.16에서 보는 바와 같이 기술별로는 합금조성 및 열처리 기술 분야가 가장 많은 건이 출원되었으며, 미량원소의 조성비에서는 대체로 탄소(C), 규소(Si), 망간(Mn), 인(P), 황(S)은 기본조성으로 첨가되었으며, 간혹 인(P), 황(S) 등의 불순물 함량을 언급하지 않은 건이 있었다. 그 외 크롬(Cr), 니켈(Ni), 몰리브덴(Mo), 바나듐(V), 알루미늄(Al)의 원소가 가장 많이 첨가된 원소였으며 질소(N), 니오비듐(Nb), 티타늄(Ti), 바륨(Ba), 구리(Cu)의 원소는 일부 특허에서만 첨가된 것으로 나타났다. 일부특허의 경우 텅스텐(W)의 첨가가 확인되었으나, 대부분의 특허는 W, 주석(Sn) 등의 원소를 첨가하지 않았다.

⑤ CE값은 20건 이상의 특허에서 그 수식 및 값이 언급되었으며, PCM 값을 언급한 특허는 전체 92건의 일본특허 가운데 4건만이 언급되고 있다.

⑥ 전체적으로 Ni의 원소의 함유비가 높은 경우가 대부분이었으며, 일부 특허가 Cr, Mn의 첨가량이 지나치게 높은 것으로 나타났다.

⑦ 기계적 특성치의 유사도를 중심으로 하여  $-40^{\circ}\text{C}$  근처의 저온영역에서 적용되는 것을 언급하고 있는 특허들을 선별하여 그 내용을 비교분석한 결과 대부분의 특허가 경도값을 제시하지 않고 있으며, 경도값을 일부 제시한 특허들은 실온에서 사용하거나, 저온영역에 대한 구체적 언급이 없는 특허들이었다. 해양구조물용 저온고강도 Casting steel의 정성분석 대상특허 가운데  $-40^{\circ}\text{C}$ 의 저온영역을 언급하고 있는 특허 36건의 권리범위 비교분석 결과 대체로 단항을 가진 청구항이 많았으며, 그 내용은 조

성에 관한 것이 많았다. 다수의 청구항을 가지고 있는 특허들은 조성 외에 해당 조성에 대한 열처리공정을 언급하고 있었으며, 그 조성 외에 일부 첨가원소를 추가하는 것이 특징으로 나타났다.

⑧ 해양구조물용 저온 고강도 Casting steel의 기술개발은 현재 침체기에 있는 상태이며, 1970~1980년대 활발히 진행된 특허들은 현재 모두 특허기간이 만료된 상태이고, 이후 진행된 특허는 건수가 많지 않고, 조성과 물성치를 자세히 언급하고 있는 특허가 적어 전체적으로 침체기에 있는 것으로 파악되었다.

일본에서 특허출원건수가 상위 5위에 속하는 Mitsubishi Heavy Industry Ltd.(14건), Hitach Zosen Corp.(9건), Sumitomo Metal Industry Ltd.(9건), Kawasaki Steel Corp.(9건), Kubota Ltd.(9건) 등에 대해 출원인별 특허기술 동향과 국내 관련 특허 동향을 다음과 같이 정리하였다.

이 가운데 해양구조물용 저온 고강도 소재에 직접 관련된 기술은 12건이며, Kawasaki Steel Corp.은 1980년대에 5건의 특허를 출원함으로써 강력한 집중력을 보이고 있다.

전체적으로는 시기별로 골고루 특허출원 실적이 분포하고 있으나 1990년대 후반부터는 기술개발이 이루어지지 않고 있다.

이는 기술개발의 필요성이 줄어들었다기보다는 일본조선해양산업이 투자를 줄이고, 기술개발을 축소한 외적인 이유가 직접적인 원인으로 파악된다.

① Mitsubishi Heavy Industry Ltd.

| 1975-1979   | 1980-1984  | 1985-1989  | 1990-1994   | 1995년 이후  |
|---|--|--|---|---|
| <p>JP1978022112<br/>1978.08.12<br/>항복점이 우수한 에너지흡수특성을 가지는 저온용 주강</p>               | <p>JP198110108855<br/>1980.01.31<br/>열처리없이 주조형태로만 사용되는 것이 가능한 주강</p>                     | <p>JP19870214160<br/>1986.03.17<br/>내열피로특성이 우수한 고장력 주강</p> | <p>JP19950197208<br/>1994.01.06<br/>고온압력용기용 고강도 크롬강</p> | <p>JP19960260091<br/>1995.03.22<br/>압력용기용 고강도 저합금 주강 및 그 주강의 열처리</p>                    |
| <p>JP19800158216<br/>1979.05.28<br/>저온에서도 충분한 인성을 확보하고, 용접성, 강도가 큰 저온용 고장력 주강</p> | <p>JP19830039765<br/>1981.09.01<br/>열처리없이 주조형태로만 사용되는 것이 가능한 주강</p>                      |  |   | <p>JP19960269616<br/>1995.03.28<br/>고온강도, 크립파단 강도, 연성, 인성, 용접보수성, 고강도를 구비하는 CrMo 주강</p> |
| <p>JP19810058947<br/>1979.10.18<br/>열처리없이 주조형태로만 사용되는 것이 가능한 주강</p>               | <p>JP19850100651<br/>1983.11.04<br/>한랭지에서 사용되는 해양구조물, 작업선, 건설기계 등의 구조물의 재료로 사용되는 강인강</p> |  |   |   |
| <p>JP19810069355<br/>1979.11.09<br/>열처리없이 주조형태로만 사용되는 것이 가능한 주강</p>               | <p>JP19850218460<br/>1984.04.13<br/>건설기계 등의 용접구조물에 적용되는 고장력 주강</p>                       |  |   |   |
| <p>JP19810075556<br/>1979.11.21<br/>극한랭지의 기온인 -40~-60℃에서 저온인성이 우수한 저온용 주강</p>     | <p>JP19860096062<br/>1984.10.17<br/>상온에서 우수한 연성 및 인성, 용접성을 가지는 고크롬 주강재</p>               |  |   |   |

② Hitachi Zosen Corp.

| 1975-1979   | 1980-1984  | 1985-1989   | 1990-1994 | 1995년 이후 |
|---|--|---|-----------|----------|
| <p>JP19770021210<br/>1975.08.13<br/>석유굴착장치용 파이프커넥션 재료로 사용되는 저온용 고장력 주강</p>                          | <p>JP19800154549<br/>1979.05.18<br/>저온해역에서 사용되는 해양구조물 주강</p> | <p>JP19820126955<br/>1981.01.28<br/>LNG온도에 사용되는 인성이 우수한 저온용 주강으로 에틸렌온도(-104℃)에서 사용 가능</p>                 |           |          |
| <p>JP19770065714<br/>1975.11.27<br/>석유굴착장치용 파이프의 커넥션에 사용되는 저온용 재료로 60~70kg/㎢급 고장력 주강</p>            |  | <p>JP19850102263<br/>1983.11.07<br/>두께 50mm 이상의 두꺼운 저온용 9%Ni 주강</p>                                       |           |          |
| <p>JP19780120622<br/>1977.03.30<br/>극저온용 재료부품 및 내열부품으로 사용되는 합니켈 주강</p>                              |  | <p>JP19850103116<br/>1983.11.08<br/>LNG 저장설비 및 한랭지의 용접구조용 부재에 사용되는 100mm 이상의 두께에서도 인성이 우수한 조질용 저온용 주강</p> |           |          |
| <p>JP19790043819<br/>1977.09.14<br/>극저온에서 충분한 인성을 가지며, ASTM A553 규격 재인 9%Ni 주강보다 우수한 강도를 가지는 주강</p> |  |   |           |          |
| <p>JP19790076418<br/>1977.11.30<br/>-196℃의 극저온에서 충분한 강도와 인성을 가지는 주강</p>                             |  |   |           |          |

③ Sumitomo Meal Industry Ltd.

| 1975-1979   | 1980-1984   | 1985-1989   | 1990-1994 | 1995년 이후 |
|---|---|---|-----------|----------|
| <p>JP19790004227<br/>1977.06.10<br/>고강도, 고인성 및 용접성이 우수한 두꺼운 고장력 주강</p>                    | <p>JP19810051552<br/>1979.10.03<br/>LNG 등의 저장, 운송 등에 사용되는 각종 기기류의 저온 부재용 주강</p> | <p>JP19820098654<br/>1980.12.09<br/>LNG 등의 저장, 운송 등에 사용되는 각종 기기류의 저온부재용 주강으로 저Mo강</p>             |           |          |
| <p>JP19810053864<br/>1979.10.04<br/>저온용부재, 특히 LNG와 같은 극저온물질을 취급하는 기기용 부재에 쓰이는 주강</p>      |   | <p>JP19830151420<br/>1982.02.27<br/>저온부재, LNG 등의 저장, 운송에 사용되는 각종 기기부재로 사용되는 주강</p>                |           |          |
| <p>JP19810053865<br/>1979.10.04<br/>저온용부재, 특히 LNG와 같은 극저온물질을 취급하는 기기용 부재에 쓰이는 주강</p>      |   | <p>JP19840200720<br/>1983.04.28<br/>저온용 주강부재에 대한 것으로 Ni를 함유하는 저온용 주강으로 냉각시 표면균열 및 내부 입계균열을 방지</p> |           |          |
| <p>JP19810023260<br/>1979.08.03<br/>두꺼운 두께에서도 저온인성이 우수하고, LNG운송용 펌프케이싱 등에 사용되는 저온용 주강</p> |   |   |           |          |
| <p>JP19810023259<br/>1979.08.03<br/>저온용강으로 두꺼워도 저온인성이 우수하고, Ni를 함유하지 않는 고풍간 주강</p>        |   |   |           |          |

④ Kawasaki Steel Corp.



⑤ Kubota Ltd.

| 1975-1979  | 1980-1984  | 1985-1989  | 1990-1994 | 1995년 이후 |
|--|--|--|-----------|----------|
| <p>JP19760145419<br/>1975.06.10<br/>인장강도가 80kg/mm<sup>2</sup> 이상인 용접성 및 용접부 충격특성이 우수한 원심력주조용 용접용 고장력주강</p> | <p>JP19820070266<br/>1980.10.22<br/>대경관, 후속관을 용이하고 정밀하게 주조할 수 있는 원심력주강관</p>                        | <p>JP19860183450<br/>1985.02.07<br/>저합금강으로 권취용링, 스플, 제철용 반송롤러 등의 고연성, 고인성이 요구되는 설비재료로 사용</p> |           |          |
| <p>JP19760145420<br/>1975.06.10<br/>원심력주조용 용접성 고장력주강에 관한 것으로 토목 건설 구조재료 주로 사용</p>                          | <p>JP19840043853<br/>1982.09.07<br/>80kg/mm<sup>2</sup>의 인장강도를 가지며 대경, 고두께 주강관 제조로 대형구조물에 적용</p>   |  |           |          |
| <p>JP19770108310<br/>1976.03.09<br/>9%Ni주강품의 제조방법으로, Ni의 일부 혹은 전부를 Ni-Ca를 이용하여 저온인성 향상</p>                 | <p>JP19840043854<br/>1982.09.07<br/>80kg/mm<sup>2</sup>의 인장강도를 가지며, 용접성과 저온인성이 우수한 대경, 고두께 주강관</p> |  |           |          |

## 나. 국내 동향

한국표준협회에서 규정한 'KS 저온 고압용 주강품(KS D 4111, 1995)'의 경우 Table 2.4, 2.5와 같은 화학적 구성 및 기계적 성질을 가지고 있어 시장에서 요구하는 해양구조물용 저온강 소재로는 한계가 있다.

KS D 4111[29]에는 저온 고압용 주강품을 SCPL 1(탄소강), SCPL 11(0.5% 몰리브덴강), SCPL 21(2.5% 니켈강), SCPL 31 니켈강) 등 4가지로 나누어 구별하고 있다. 여기에서 저온 고압용 주강품의 탄소(C) 구성비는 최대 0.30% 이하에서 0.25% 이하, 0.15% 이하 등이며, DNV의 0.25% 이하 또는 일반적으로 규정하고 있는 0.20~0.25% 이하보다 높다. ASTM A751에서 규정하고 있는 탄소당량(CE) 및 용접균열감수성지수(Pcm)도 규정치를 상향하는 수준인 0.478~0.542, 0.319~0.408 수준이다.

기계적 성질은 DNV 550 W에서 규정하고 있는 값인 항복강도(YS) 355N/mm<sup>2</sup>, 인장강도(TS) 550N/mm<sup>2</sup>에도 미치지 못하는 각각 245~275N/mm<sup>2</sup> 이상, 450~480N/mm<sup>2</sup> 이상으로 낮고, 충격시험의 온도조건은 -45~-100℃로 되어 있지만 흡수에너지는 최고 21J이하로 DNV의 32J보다 낮다. 연신율과 단면감소율은 양호한 수준이나 이는 강도와 상관관계가 있어 독립적으로 판단하기 어려운 변수이다.

이외에도 기계적 성질에서 편평성, 수압시험, 시험편의 모양 치수를 인수, 인도 당사자가 합의하여 적용할 수 있도록 하고 있다. 겉모양에서는 사용상 해로운 흠, 갈라짐, 주물기공 등이 없어야하며, 열처리 방법은 어닐링, 노멀라이징, 노멀라이징템퍼링 또는 퀴칭템퍼링의 어느 열처리를 하도록 규정되어 있다. 화학적 조성 및 기계적 성능, 수압시험, 모양 및 치수의 측정, 겉모양 시험, 비파괴 시험 등의 방법은 KS D에 정한 각각의 해당 규정을 따르도록 하고 있다.

특수금속 원천소재 개발 3요소는 Chemical composition 기술, 용해과정에서의 불순물 첨가 및 제거 기술, 그리고 열처리 기술로 요약된다. 생산과정에서의 핵심기술은 주형 시뮬레이션 및 제작 기술, 열처리 과정에서의 변형제어 기술, 용접 및 용접결함수정 기술 등이 해당될 것이다.

그러나 원천소재 개발은 성공시 저급제품시장의 흡수가 가능하고, 시장독점이 가능하며, 혁신적인 기술과 시장영역의 창출이 가능하다는 장점에도 불구하고 진입장벽이 매우 높다고 할 수 있다. 원천소재 개발이 어려운 이유는 먼저 시험제조가 아닌 모의시험방법을 적용하기 어렵다는 점이며, 특히, 연구논문 등의 기술공개가 극히 제한적이고 활용성이 낮다는 점이다. 기술이 공개될 경우 모방은 쉽지만, 기술이 방법에 관한 것이기 때문에 기술보호가 곤란하며 선행기술을 찾기가 다른 공학영역에 비해 훨씬 어렵다. 개발단계에서부터 시설투자비가 크고, 직접 시험제조에 소요되는 비용투자가 많다는 점도 개발이 어려운 이유 가운데 하나로 거론된다.

국내에서는 주식회사 포스코를 비롯한 철강 및 금속재료에 대한 산업이 활성화되어 있는 관계로 이에 대한 대량생산을 위한 재료에 대한 특허는 많이 발표되었지만, ‘저온 고강도 Casting steel 분야’ 등과 특정기술 분야에 대한 특허는 국내외를 막론하고 그다지 활성화되어 있지 못하다.

특히 해양구조물용 저온 고강도 주조품 시장을 독점하고 Atlas Casting & Technology(미국)와 Sheffield(영국)의 두 회사의 특허를 찾을 수 없다는 점은 특이한데 Casting 분야 특허가 화학적 성분비, 열처리 방법, 제조 공정 등을 대상으로 하고 있다는 점에서 형상이나 구조에 대한 특허와는 달리 특허를 통한 기술공개에 따라 노하우는 유출되지만 반대급부로 제공되는 해당기술의 독점사용권의 보장이 쉽지 않다는 현실적인 이유와 제조 공정 등의 영향이 크기 때문으로 판단된다. 국내의 경우에도 품질의 적부를 떠나 이와 같은 이유에서 특허출원을 기피하는 경향이 일부 있다.

엘에스전선(주)에서는 1984년 탄소함유량이 0.2~0.4%의 탄소강에 있어서 크롬(Cr), 규소(Si), 망간(Mn), 크롬(Cr), 니켈(Ni), 바나듐(V), 몰리브덴(Mo), 인(P), 황(S) 등을 일정비율로 조정하고 뜨임과 담금질에 대한 열처리 방법을 개발하여 '고장력 내마모 주강 주조재'에 관한 특허를 신청 [6]한 바 있으나, 해양구조물에서 요구하고 있는 기준에 비해 강도조건은 우수하나 탄소함유량이 지나치게 높고 적용온도기준에 대한 언급도 되어 있지 않다.

1989년 두산중공업(주)이 출원한 '저온용 주강품 및 그 제조방법'[30]은 최대  $-60^{\circ}\text{C}$ 의 온도조건을 정하고 있으며 탄소함유량도 0.08~0.12%의 탄소(C) 및 규소(Si), 망간(Mn), 인(P), 황(S), 알루미늄(Al), 칼슘(Ca), 니오비듐(Nb), 니켈(Ni), 바륨(Ba) 등이 포함된 주강품에 관한 것으로 구체적으로는 해양구조물과 같이 한랭지역, 큰 하중분포 및 반복하중이 작용하는 개소에 적용하는 비용접구조에 의한 형상물을 목적으로 하고 있으며 크기에 대한 제조공정의 차이도 포함하고 있다. 그러나 최대인장강도가  $37.2\text{kg}/\text{mm}^2(368.4\text{MPa})$ 로 극대심해용 해양구조물에서 요구하는 500MPa에는 크게 미치지 못하고 있다.

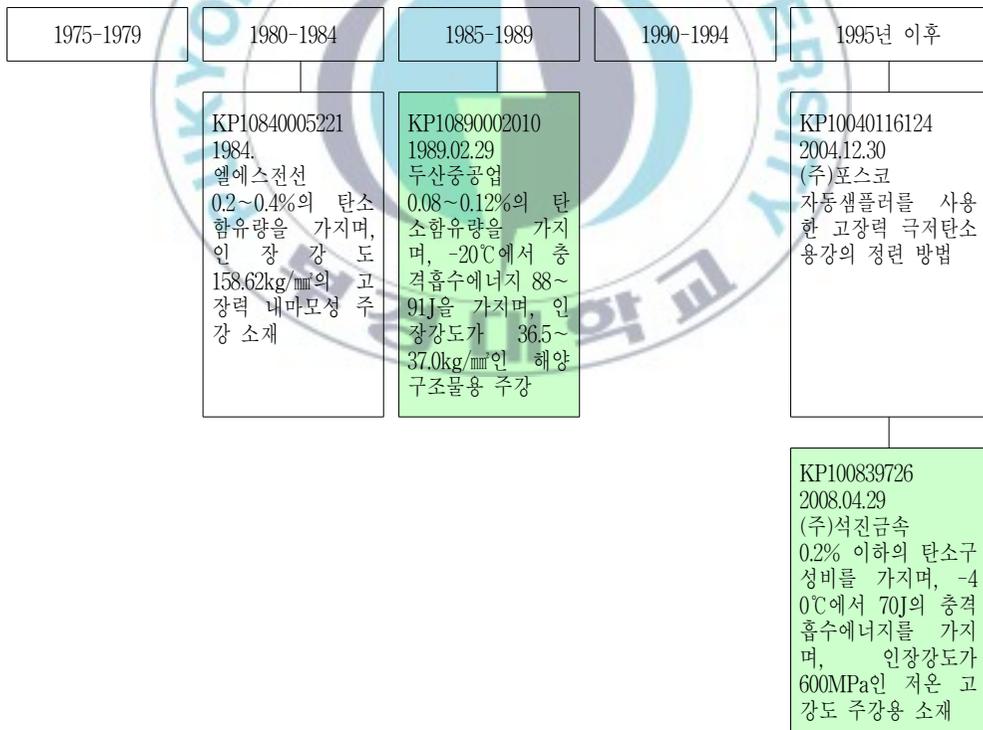
2004년 주식회사 포스코에서 '고장력 극저탄소강의 정련 방법'에 대한 특허를 출원[4]하여 극저탄소강의 제조방법에서 인과 탄소 성분의 미세제어방법을 소개하고 있다. 최근 주식회사 포스코를 중심으로 해양구조물용 저온 고강도 소재개발이 시도되고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 오늘날과 같이 최대  $-40\sim 0^{\circ}\text{C}$ 까지 적용되는 극해라는 저온의 온도조건과 극대심해에서 오는 요구강도와 파랑과 바람으로부터 기인된 반복하중을 수용하는데 적합한 화학적 조성(Fig. 2.17)과 구조강도(Fig. 2.18), 기타 품질수준(Fig. 2.19)을 아직까지 국내에서는 제시하고 있지는 못하고 있는 것으로 파악되었다.

최근에는 조선해양산업의 시장구성이 상선에서 해양구조물로 비중이 이동하는 추세가 진행되고, 극지 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예상되며, 국내 대형조선소들이 세계시장 점유율을 거의 독점하다시피함으로써 강재제작사들이 저온소재 개발에 관심을 가지고 참여의사를 밝히고 있다.

지식경제부에서도 통합기술로드맵을 통해 저온 고강도 소재개발에 대한 계획을 기술수준에 따라 연차적으로 마련해 놓고 있다.

본 연구과정의 성과를 통해 2008년 4월 출원된 ‘저온 고강도 저탄소강 소재 및 그 제조방법’에 관한 특허는 지금까지의 국내의 연구결과 및 특허와는 다르게 해양구조물용으로 요구되는 화학적 조성 및 기계적 성능에 대한 조건을 모두 충족한 소재로 평가될 수 있을 것이다.



**Table 2.4 Chemical composition of KS D 4111**

[Unit : max. wt%]

|        | C    | Si   | Mn      | F    | S    | Ni      | Mo        | Cu   | Cr   | Total |
|--------|------|------|---------|------|------|---------|-----------|------|------|-------|
| SCPL1  | 0,30 | 0.80 | 1.00    | 0.04 | 0.04 | 0.5     | -         | 0.50 | 0.25 | 1.00  |
| SCPL11 | 0.25 | 0.60 | 0.5~0.8 | 0.04 | 0.04 | -       | 0.45~0.65 | 0.50 | 0.35 | -     |
| SCPL12 | 0.25 | 0.60 | 0.5~0.8 | 0.04 | 0.04 | 2.0~3.0 | -         | 0.50 | 0.35 | -     |
| SCPL13 | 0.15 | 0.60 | 0.5~0.8 | 0.04 | 0.04 | 3.0~4.0 | -         | 0.50 | 0.35 | -     |

\* Total is consists of Ni + Cu + Cr.

**Table 2.5 Min. Mechanical Properties of KS D 4111**

|        | YS<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | TS<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Elongation<br>(%) | Reduction<br>area% | Charpy impact test |           |
|--------|----------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------|
|        |                            |                            |                   |                    | Temperature(°C)    | Energy(J) |
| SCPL1  | 245                        | 450                        | 21                | 35                 | -45                | 9~18      |
| SCPL11 | 245                        | 450                        | 21                | 35                 | -60                | 9~18      |
| SCPL12 | 275                        | 480                        | 21                | 35                 | -75                | 11~21     |
| SCPL13 | 275                        | 480                        | 21                | 35                 | -100               | 11~21     |

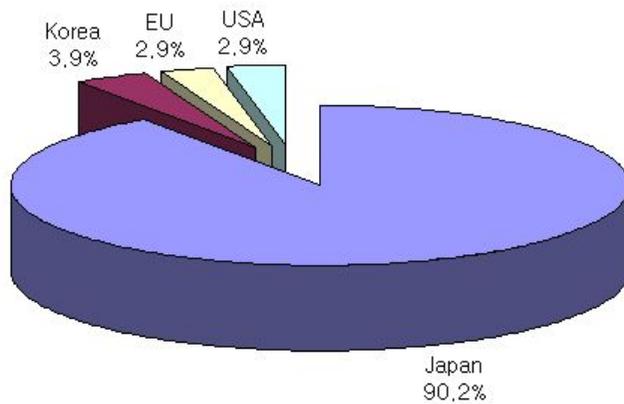


Fig. 2.15 Composition rate of the patent in each country

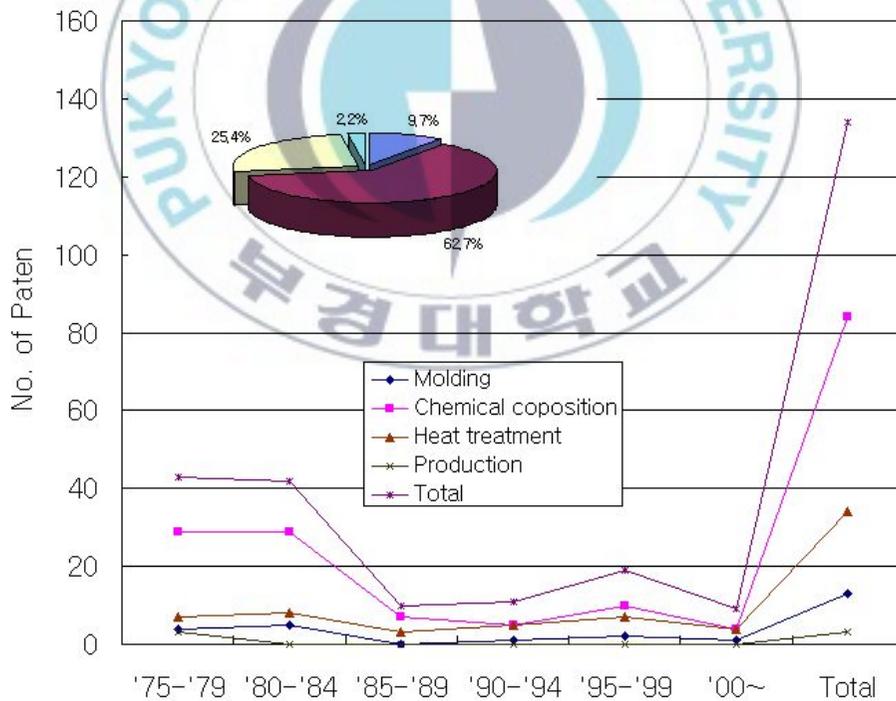


Fig. 2.16 Tendency of patent including duplication cases for HSLA casting steel (Japan)

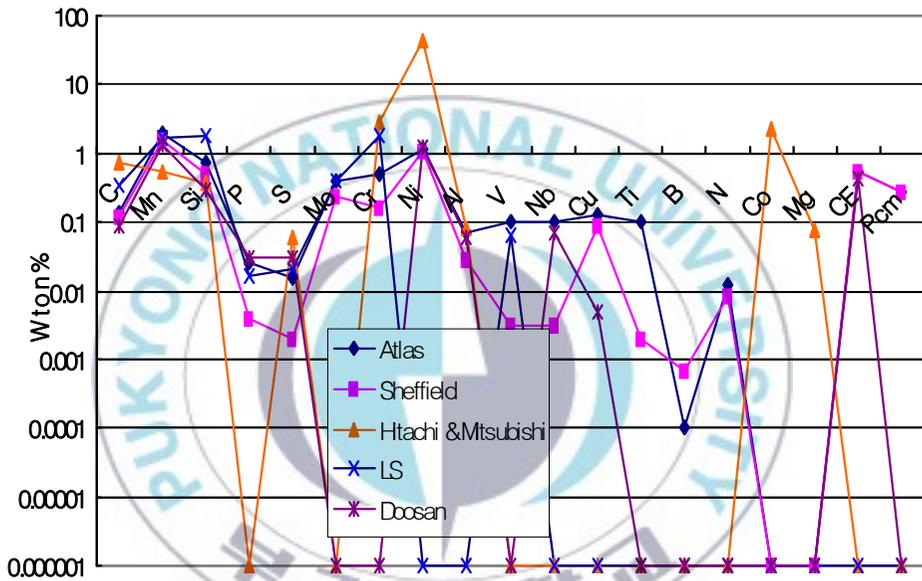


Fig. 2.17 Chemical composition of each cases

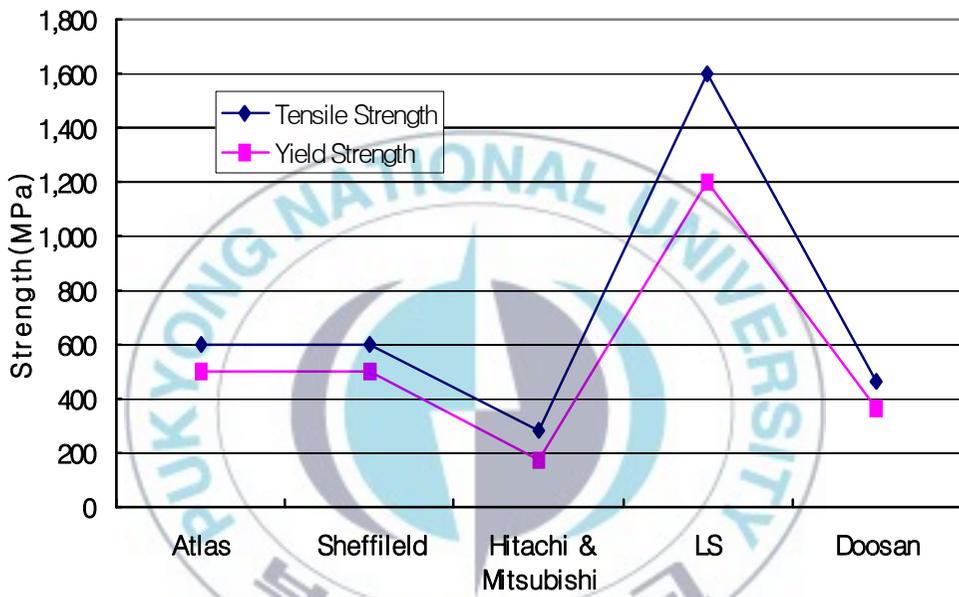


Fig. 2.18 Strength of each cases

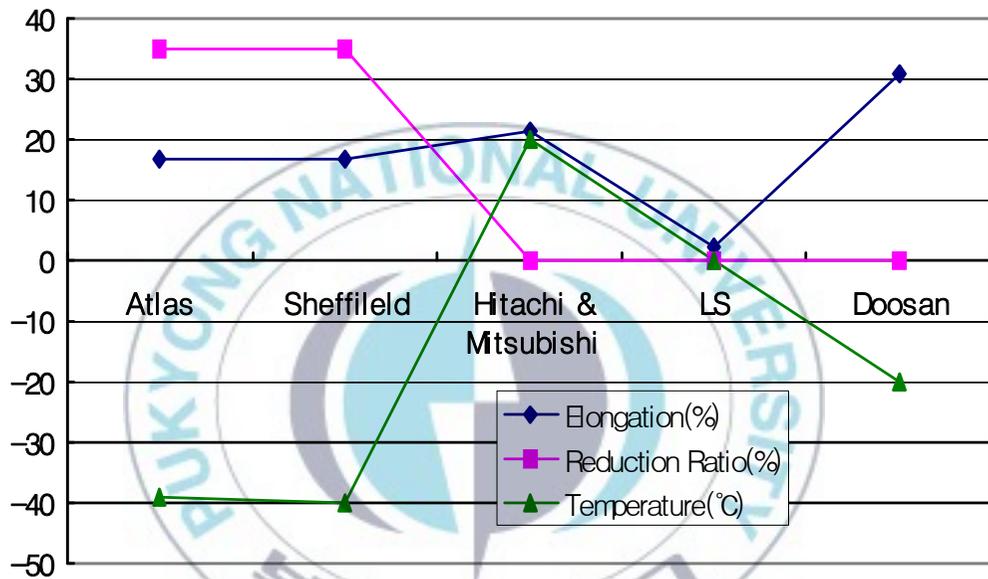


Fig. 2.19 Other properties of each cases

### Ⅲ. 해양구조물용 저온 고강도 소재 개발

#### 1. 소재 특성

##### 가. 주강용 소재 개요

조선 및 해양구조물용으로 사용되는 구조용 강재는 대부분 탄소강으로 제조된 판재, 형강재, 주조품이다.

경량화 또는 내부식성을 향상시키기 위해 알루미늄이나 스테인레스강이 사용되기도 하지만 특수용도에 한정되어 사용된다.

탄소강을 구성하는 물질 가운데 가장 중요한 변수인 탄소(Carbon)의 경우 Table 3.1에서 보는 바와 같이 순철(0%C), 0.2%C강 및 0.8%C강을 서냉시킨 후 항복강도를 나타낸 것으로 0%에서 0.8%로 증가시 항복강도가 약 4배 증가하며, 0.2%에서 0.8%로 증가시 약 2배 증가하게 된다. 이것은 서냉시 시멘타이트(Cementite;  $Fe_3C$ )라고 하는 철탄화물의 증가에 기인하는 것이다.

그러나 탄소량의 증가는 연신율의 감소로 이어지기 때문에 미량원소의 첨가 및 열처리 방법의 변화를 통해 강도와 연신율을 포함한 각종 기계적 물성치 및 화학적 조성비에 대한 목표치의 최적 조합이 요구되며, 용접성능에 대한 고려도 필수적이다.

탄소강의 분류는 Table 3.2에서 보는 바와 같이 성분(Chemical properties) 및 용도, 제조법에 따라 구분[31]이 가능하고, 각종 규정들의 미소한 차이로 성분의 함량이나 구성비에서 차이를 보이고 있다.

화학조성비의 경우 탄소뿐만이 아니라 미량원소들도 각기 금속 고유성질에서 담당하는 역할이 구분되고, 또한 열처리 및 용접 성능에 영향을 미치게 되는 중요한 요소가 된다.

Table 3.3은 탄소강을 구성하는 탄소(C), 규소(Si), 망간(Mn), 인(P), 황(S) 등 5대 성분 및 바나듐(V)과 니오비듐(Nb), 니켈(Ni), 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W), 코발트(Co) 등 첨가 성분과 그 외 주요 영향인자인 질소(N), 수소(H)와 산소(O) 등 각종 원소들을 중요도에 따라 구분하고, 각각의 성질들을 세부적으로 설명하고 있다[32].

탄소강에서 강도를 비롯한 금속특성을 원천적으로 좌우하는 중요변수인 탄소의 함유량의 상한치에 대해서는 규정이나 적용자에 따라 저탄소강의 범위의 상한기준이 0.20~0.25% 범위에서 취사선택되어 작용되고 있다.

해양구조물의 경우 Table 3.1, Table 3.2, Table 3.3에서의 일반적인 탄소강의 특징 구분 외에도 Charpy V notch test 충격시험치 조건에 온도 조건이 강화되며, 여기에 따라 해당 강재의 적용개소 및 목적이 달라진다.

일반적으로 조선해양산업용 판재의 경우는 0℃, -20℃, -40℃로 구분하고 사용하고 있으며, -60℃, -80℃ 조건에 대한 수요도 최근 선택적으로 요구되고 있다.

그러나 주조 또는 압연 강재의 경우 Oil major의 기술사양서(Technical Contract Specification)에서는 -40℃ 조건을 요구하고 있으나 선급이나 각국 표준 또는 금속재료 연구에 관한 단체 등의 규정에서는 0℃ 조건에 대한 언급만 있다.

강도 또한 고강도의 정의가 인장강도 또는 압축강도의 하한치를 정해 규정하는 방법과 같이 일반적이지 않고 각각의 기준이나 표준에 따라 상이하다.

## 나. 열처리

열처리 방법을 크게 구분하면 주조나 단조 후 편석 및 잔류응력 등을 제거하여 균질화(Homogenize) 또는 연화(Softening)를 목적으로 행하는 풀림(Annealing), 결정립을 미세화하여 기계적 성질(Mechanical properties)이나 피삭성(Cutability)을 향상시키기 위한 불림(Normalizing), 경화를 위한 담금질(Quenching), 그리고 강인화를 위한 뜨임(Tempering) 등으로 구분이 가능하다. 이밖에도 표면을 침탄법에 의해 탄소를 스며들게 하여 표피부의 탄소농도를 올린 후 담금질과 같은 열처리를 함으로써 표면을 경화하기 위한 표면경화(Surface Hardening)가 있다.

### (1) 풀림(Annealing)

소둔(燒鈍)이라고도 하며, 재료를 평형상태도에 나타난 그대로의 안정상태로 만들기 위한 처리방법이다. 상변화가 온도의 오르내림에 따라 일어나는 재료에서는 충분한 시간에 걸쳐서 천천히 냉각시킴으로써 상태도에 나타난 것만큼의 변화를 전부 완료시켜서 안정된 평형상태로 한다.

고온 상태에서는 천천히 식혀서 확산에 의해 각 온도를 평형상태를 그때마다 잡으면서 냉각될 수 있는 시간을 준다. 이 밖에 가공·주조 등에 의해 변형이 생기거나 격자결함(Lattice defect)이 생겨서 국은 결정고체에서는 그 속에서 주체가 되는 성분의 원자가 충분히 확산해서 움직일 수 있는 온도, 즉 재결정온도 이상으로 적당 시간 가열해서 목적을 달성한다.

풀림하여 얻을 수 있는 상태는 그 재료에 있어서 가장 부드러운 상태일 때가 많으므로, 풀림이라는 말에는 가장 연한 상태를 얻는 열처리 조작이라는 의미가 내포되어 있다. 이 때문에 석출경화형(Precipitation

hardening) 합금인 베릴륨 구리에서는 완전히 고용체(Solid solution)가 되는 온도까지 가열해서 급랭하여 과포화고용체를 얻으면 그 합금에서 가장 연한 상태가 되기 때문에 이 조작을 용체화담금질 또는 용체화 풀림 (Solution annealing)이라고 한다.

완전 풀림을 위한 Annealing Point는 Fig. 3.1에서 보는 바와 같이 Austenitic 온도에서 약 50℃ 높은 온도 이상으로 가열하여야 한다.

## (2) 불림(Normalizing)

소준(燒準)이라고도 하며, 강을 단련한 후 오스테나이트의 단상 (Single-phase)이 되는 온도범위에서 가열하여 10~20분 동안 유지한 후 대기 속에 방치하여 자연냉각하는 것이다.

불림의 목적은 주조 또는 과열 조직을 미세화하고, 냉간가공 또는 단조 등에 의한 내부 잔류응력을 제거하며, 결정조직과 기계적·물리적 성질 등을 표준화시키는데 있다.

저온인성 요구강재에 적용되며, 탄소강 및 저합금의 주강품에 대해서는 반드시 Normalizing을 시키는 것이 원칙이다[33].

## (3) 담금질(Quenching)

소입(燒入)이라고도 하며, 담금질이란 강을 임계변태온도 이상에서 물 또는 기름과 같은 냉각제에 넣어서 급랭시키는 조작을 말하며, 열처리 분야에서 가장 중요한 처리이다.

인장강도 600MPa 이상 요구 강재에 적용되며, 담금질의 주요목적은 경화(Hardening)이며 가열온도는 변태점보다 약 50℃ 정도 높은 온도이다.

얻을 수 있는 최고경도는 약 0.6%C까지는 탄소량에 비례하여 증가하나 그 이상이 되면 거의 일정한 값을 가지며 합금원소의 영향은 작다[34].

#### (4) 뜨임(Tempering)

소려(燒漚)라고도 하며, 인장강도 600MPa 이상 요구 강재에 적용되며, 담금질을 실시한 모든 강은 뜨임을 하게 된다. 뜨임에서는 담금질된 상태의 마르텐사이트 조직의 인성을 향상시키나 경도는 저하시킴으로써 취성(Embrittlement)을 감소시키게 된다[35].

#### (5) 표면경화(Surface hardening)

표면을 침탄법에 의해 탄소를 스며들게 하여 표피부의 탄소농도를 올린 후 담금질과 같은 열처리를 함으로써 표면을 경화하는 조작이다.

#### 다. 금속조직

Fig. 3.2는 Fe-C계의 평형상태도(Fe-C equilibrium diagram)이다. Fe-c 합금 가운데 C는 용융상태에 있어서는 모두 Fe 중에 용해해서 균일한 용체를 만들고 이것을 서서히 냉각하면 그 조직은 온도와 C의 농도에 따라 변화한다[36].

강 중에 있어서는 탄소는 시멘타이트( $Fe_3C$ )의 상태로 존재한다. 시멘타이트는 불안정한 금속간화합물이며, 유리된 것 또는 주철 중에 함유된 것은 600°C 부근에서 페라이트(Ferrite)와 흑연(Graphite)으로 분리되기 시작하여 900°C에서는 완전히 분해되며, 분해되면 7.33%의 체적의 팽창이 생긴다[37].

보통강(Ordinary steel)이라 하면 그 성질 또는 제조법으로 정의할 수 있으나, 금속조직학에서 강이라 하면 Fe-C 합금 중 탄소함유량이 0.008~0.2%이며, 가단성(Malleability)을 갖고 있는 것을 의미한다.

금속조직학상에는 다음과 같은 용어들이 사용된다.

|                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| $\gamma$                       | 오스테나이트(Austenite)  |
| $\alpha$                       | 페라이트(Ferrite)      |
| $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ | 펄라이트(Pearlite)     |
| $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ | 레데뷰라이트(Ledeburite) |
| $\text{Fe}_3\text{C}$          | 시멘타이트(Cementite)   |

페라이트는 극히 연하고 연성이 크며, 인장강도는 비교적 작다. 또 상온에서 강자성이며, 전기전도도가 높고 담금질에 의해서 경화되지 않는다.

시멘타이트는 대단히 경도가 높고 연리며, 인성은 거의 없다. 또 상온에서 강자성이며 담금질해도 경화하지 않는다.

펄라이트는 페라이트에 비해 훨씬 강하고 경도도 높으며 담금질에 의해 더욱 경화한다.

각 표준조직의 기계적 성질은 Table 3.4와 같으며, 탄소강은 이와 같은 3가지 조직이 혼합된 것이다[37].

강의 조직 가운데 오스테나이트는 탄소를 잘 고용하나 페라이트는 잘 고용하지 않는다. 따라서 강을 오스테나이트 상태로 가열하였다가 공랭 또는 서냉을 하게 되면 조직은 오스테나이트에서 펄라이트로 변태한다. 페라이트에 순간적으로 고용되었던 탄소는 확산하여 시멘타이트를 만들어  $\alpha$ 와 시멘타이트로 된 펄라이트 조직이 된다.

그러나 여기에서 탄소가 확산하는데 많은 시간이 소요되므로, 시간적

여유를 주지 않기 위해 급랭을 하게 되면 오스테나이트에 고용되었던 탄소가 페라이트에 역지로 고용당한 조직이 된다. 이 페라이트에 탄소가 역지로 고용당한 조직을 마르텐사이트(Martensite)라 한다.

이 조직을 얻기 위한 목적으로 강을 오스테나이트 상태의 고온, 즉  $A_{321}$  변태점보다  $30\sim 50^{\circ}\text{C}$  정도 높은 온도로 일정기간 가열한 후 물이나 기름 중에 급랭시키는 열적 조작 방법이 담금질이다.

여기에서 탄소를 순간적으로 고용한  $\alpha$ 상태로 변태하는 것을 제1단계,  $\alpha$ 상태에 순간적으로 고용되었던 탄소가 확산하여 시멘타이트를 형성하여  $\alpha$ 와 시멘타이트인 펄라이트 조직으로 변태하는 것을 제3단계라고 하는데, 담금질이란 제1단계 변태만 하고 제2단계 변태는 저지하는 조작이다.

즉, 오스테나이트 영역에서 급격히 냉각하면 마르텐사이트 조직이 되고, 천천히 냉각하면 펄라이트 조직이 되는 것이다[38].

DNV-OS-B101[36]에서는 Casting용 Carbon 및 Carbon-manganese steel, Alloy steel의 열처리 조건으로 다음과 같이 제시하고 있다.

- ① Fully annealed
- ② Normalized
- ③ Normalized and tempered at a temperature of not less than  $550^{\circ}\text{C}$
- ④ Quenched and tempered at a temperature of not less than  $550^{\circ}\text{C}$

표준 상태의 탄소강의 조직변화 및 기계적 성질에 관한 데이터는 Fig. 3.3, Fig. 3.4와 같다[39]. 이 자료에 따르면 탄소(C)의 함유량이 증가하는 초기에 오스테나이트조직을 만들기 위한 온도는 감소하지만 0.8% 이상이 되면 다시 증가하고 있으며, 탄소의 증가에 따라 강도는 증가하고 신율은 감소하는 딜레마를 가지고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 목표 강도와 충격치 조건을 만족하기 위해서 선행되어야 하는 것이 모상조직인 오스테나이트(Austenite)로 만드는 것이다. 따라서 Fig. 3.5에 나타낸 Fe-alloy 상태도[40]를 이용하여 오스테나이트 조직으로 만들기 위한 조건을 찾을 수 있다. Table 3.4는 각 조직상태의 기계적 성질을 비교한 것이다.

충분한 오스테나이트 상태로 만든 다음 물로 급속냉각을 시켜 마르텐사이트(Martensite) 조직을 얻을 수 있으며, 이를 담금질(Quenching)이라고 하는데 마르텐사이트는 탄소가 확산할 만한 시간적 여유가 없으므로 이동하지 못하여  $\alpha$ 내에 고용상태로 남아 있게 된다.

그런데 탄소원자가 차지할 수 있는 격자 틈의 크기는  $\gamma$ 철에서보다  $\alpha$ 철에서 더 작기 때문에 격자가 팽창될 수밖에 없다. 이때 야기되는 응력 때문에 강의 경도가 증가되어 경화된다.

하지만 본 실험에서 목표로 하는 것은 경화된 조직을 얻는 것이 아니라 적정의 인장강도와 인성을 확보하는 것이다.

따라서  $-40^{\circ}\text{C}$ 에서 충격에너지 68J 이상의 인성을 부여하기 위해서는 탄소 함유량에 따라 각기 다른 조건 속의 뜨임(Tempering)이 필요하다.

여기에서 뜨임을 하게 되는 이유는 크게 3가지 이유를 들 수 있는데 첫째, 담금질에 의해 형성된 불안정한 조직을 안정된 조직으로 변태시키는 것이며 둘째, 잔류 응력을 감소시키며 마지막으로 적정의 인성을 갖추기 위해  $A_1(727^{\circ}\text{C})$ 이하에서 적정의 온도로 가열유지 및 냉각하는 것이다.

## 라. 시험 설비 및 조건

시험제작된 해양구조물용 저온 고강도 소재의 시편에 대한 시험은 크게 화학적 조성과 기계적 성질로 구분되어 실시하였다.

## (1) 화학적 조성 시험 장치

Fig. 3.6의 좌측 그림은 독일의 SPECTRO사의 SPECTRO MAX를 나타낸 것이다. 이 기기는 DIN ISO 10012.1을 이용하여 보정하게 되어 있으며, 보정시편을 이용하여 값을 검출 소자를 이용하여 계측을 하고 난 뒤 이 값을 이용하여 측정하고자 하는 시험편의 합금 성분비를 측정하는데 보정 시편은 SPECTRO사가 제공한 것을 이용하였다.

Fig. 3.6의 우측 그림은 합금 성분비를 측정하기 위해 각 시편을 100mm 두께로 절단을 한 뒤 폴리싱기로 연마가공을 하였다. 그 뒤 SPECTRO MAX를 이용하여 측정 한 후 측정면을 나타낸 것이다.

시험성분의 분석은 탄소를 Mn, Si, Cr, Ni, Mo, P, S 등의 무게비를 측정하여 비교하였으며, 각 규정값의 초과여부 확인 및 최종 용접성능 판단을 위한 CE와 Pcm의 계산에 활용되었다.

## (2) 열처리로

열처리 조건에 온도의 유지 및 가열 시간을 고려하여 담금질(Quenching)을 위한 열처리로는 Fig. 3.7에서, 뜨임(Tempering)을 위한 열처리로는 Fig. 3.8에서 보이는 설비를 이용하였다.

담금질용 열처리로의 발열체는 스웨덴에서 생산된 슈퍼칸탈을 사용하였으며, 가열 온도는 최대 1600℃까지 가열이 가능하다. 열처리 내부 및 소재의 온도를 측정하기 위해서 1300℃까지 측정이 가능한 K type 열전대를 이용하여 측정을 하였다. 고온에서는 열 발생 능력 및 온도의 균일성은 좋으나 저온에서는 오히려 온도의 편차 심하여 저온에서는 사용을 하지 못하였다.

따라서 뜨임을 위한 저온용 열처리로를 별도로 사용하였으며, 발열체로는

일반 칸달히터로 최대 1000℃까지 가열 유지 능력이 있으며 특수 내화반죽에 성형과 고온에서 숙성시킨 열판으로 충격에 강하고 온도분포가 균일하다. 온도의 측정은 역시 K type 열전대를 이용하여 온도 측정을 하였다.

### (3) 미세조직 관찰

탄소함유량에 따른 열처리 전 미세조직 비교와 담금질 후 뜨임 조건에 따른 마르텐사이트 조직의 변태된 상 관찰을 하였다. 탄소함유량에 따른 3조건으로 제조된 Sample에서 10 × 10mm 크기의 시편을 채취하였다.

시편 채취 이후 보다 원활한 연마과정을 위해 Fig. 3.9의 왼쪽에 나타낸 BUEHLER사의 SIMPLIMENT 2000 마운팅기와 TRANSOPTIC POWDER을 이용하여 마운팅을 하였다.

마운팅 이후 Fig. 3.9의 오른쪽에 나타낸 BUEHLER사의 GRANINDER POLISHER를 이용하여 Silicon carbide grinding paper로 연마한 다음 Polishing cloth로 다시 연마하였다.

그 이후 10분간 Ethyl Alcohol 용액으로 초음파세척을 한 후 Acetone으로 시료의 표면을 세척하였다. 부식은 5% Nital(Ethyl Alcohol + Nitric Acid(5%))용액을 이용하여 소재의 최적시간대에 따라 부식을 시킨 후 조직을 OLYMPUS사의 광학현미경으로 관찰하였다.

### (4) 인장시험

인장시험은 MTS사의 만능인장시험기를 사용하여 상온에서 인장시험에 임하였다. 제작된 시험편은 ASTM A370을 참조하였으며 Fig. 3.10과 같다.

인장시험을 통해서 기계적 물성치 중 항복강도, 인장강도, 연신율의 측정을

이 가능하였으며 인장시험 후 단면의 수축면을 측정을 하여 단면수축률을 측정할 수 있었다. 단면의 수축면은 가장 수축이 많이 된 곳을 기준으로 측정하여 정리하였다. 측정 장비로는 일본의 KANDON사의 디지털 버니어 캘리퍼스를 사용하였다.

## (5) 경도시험

경도시험은 조직사진을 위해 채취한 시편을 이용하였다. 이는 시험편의 시험면과 배면이 서로 평행하여 경도측정에 필요한 조건을 만족하였기 때문이며 비커스 경도계를 사용하였기 때문에 조직 사진 관찰 이후 다시 연마과정을 시행하였다.

경도시험은 기계적 성질이나 재료의 열처리에 따르는 조직변화를 추측하는 수단으로서 적절하기 때문에 재질 시험법에서는 빠질 수 없는 중요한 시험이기 때문에 시행하였다.

사용된 비커스 경도계는 BUEHLER-MATSUZAWA를 사용하였으며 하중은 1000g으로 압입을 하였다. 경도 측정은  $10 \times 10\text{mm}$ 의 중앙부위를 기준으로 총 25번을 압입하여 측정을 하였다. 시험온도는 인장시험과 마찬가지로 상온에서 시행하였다.

## (6) 충격시험

본 충격시험은 샤르피 충격시험기(Charpy type impact testing machine : ASTM E 23)에 의해 행하였으며, 시편은 규격에 따라 ASTM E 23 샤르피 충격 시험 시험편 타입 중 A타입을 선정하여 하였다. 시험편의 특징으로는 한면이 10mm인 정사각형 단면을 가지고, 깊이가 2mm 노치를 가지는 표준

시험편을 사용하였으며, 시험편 형상과 치수 등을 Fig. 3.11에 나타내었다.

시험편은 충격을 가하기 전에 드라이아이스에 충분히 담근 다음  $-40^{\circ}\text{C}$  조건을 확보한 다음 실시하였다.

#### 마. 비파괴 검사 및 용접성능 조건

비파괴검사(Non-destructive test)는 시험편이나 제품을 절단하거나 파손하지 않고 결함을 조사하는 방법인데 현재 사용되고 있는 비파괴 검사법 중에서 가장 신뢰도가 높은 것은 RT로 평가되고 있다.

RT의 경우 재료의 크기나 두께, 자성의 유무, 표면상태의 양부, 구조물의 형상 등 어느 것에도 구애됨이 없이 검사가 가능한 방법이지만 아주 미세한 균열이나 라미네이션 등의 검출은 곤란하다.

이 방법은 보통의 광선으로 통과할 수 없는 시험물을 통과할 수 있는 X선 방사선의 단파를 이용한다. 일반적으로 파장의 길이가 짧으면 짧을수록 투과량이 더 커진다. 방사선은 시험편을 통과하지 않고 일부는 흡수되며, 흡수량은 시험편의 밀도나 두께에 따라 다르게 된다.

최종 생산된 제품의 경우 Test coupon과 같은 방법으로 채취된 시편을 확보하여 다음과 같은 비파괴검사 방법을 구조물 사용 목적이나 위치에 따라 가감하여 적용하게 된다.

- ① 방사선투과검사(RT; Radiographic test)
- ② 초음파탐상(UT; Ultrasonic test)
- ③ 자분탐상(MT; Magnetic test)
- ④ 액체침투탐상(PT; Liquid penetrant test)
- ⑤ 육안검사(Visual inspection)

제품 상태에서 결함의 수정이나 화학적 조성이 다른 탄소강과의 용접연결부에 있어 적응성을 판단하기 위한 점검이 필요하다.

용접성능 확보를 위한 탄소당량(CE; Carbon Equivalent))과 용접균열감수성지수(Pcm; Cracking Parameter) 값은 시험편의 화학적 조성비를 식 (3.1), 식(3.2)에 적용함으로써 확인이 가능하다[41].

$$CE = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 \quad (3.1)$$

$$Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (3.2)$$

화학적 성분을 고려하는 경우에 특히 탄소(C)의 양은 다른 화학성분에 비해 기계적 성질에 미치는 영향이 크다.

구조용 강 용접성 특히 열향부의 경화성을 나타내는 척도로서 다양한 형태의 탄소당량에 관한 계산식이 자주 이용되고 있는데 식 (3.1)은 일본 용접협회규격(WES 3001)이며, 포괄적으로 균열 발생여부와 용접열향부(HAZ)의 경화성에 주안점을 두고 있다.

용접균열감수성지수 또한 탄소(C)의 영향을 가장 많이 받는데, 이 식 또한 강종 및 판의 두께에 따라 식이 달라지기도 한다.

## 바. 목표설정

해양구조물에 사용하기 위한 저온 저탄소 고강도 Casting steel용 개발 소재의 화학적 조성 및 기계적 성능에 대한 목표설정은 DNV-OS-B101(2001. 01)을 최소기준으로, 충격시험조건을  $-40^{\circ}\text{C}$ 로 적용하는 것으로 설정하였으며, 세계 Top class 2개사 수준으로 Table 3.5와 같다.

**Table 3.1 Chemical and mechanical properties of carbon steel materials**

| Quantity of C (wt%) | Yield stress (N/mm <sup>2</sup> ) | Elongation (%) | Remarks |
|---------------------|-----------------------------------|----------------|---------|
| 0.0                 | 103                               | 62             |         |
| 0.2                 | 220                               | 35             |         |
| 0.8                 | 448                               | 14             |         |

**Table 3.2 Classification of steel materials**

| Classification      |               | Contents  |   |
|---------------------|---------------|---|---|
| Chemical properties | Pure iron     | C > 0.02 %  |   |
|                     | Pig iron      | 25 < C < 45 %   |   |
|                     | Steel         | 0.02 < C < 2.0 %  |   |
|                     | Cast iron     | 2.0 < C < 6.67 %  |   |
| Use                 | General steel | Carbon alloy steel including Si, Mn, P, S, etc. at the 800~1200°C   |   |
|                     | Special steel | Special alloy steel including Cr, Ni, Mo, V, etc. for mechanical tools  |   |
| Production method   | Rolling       | Hot rolled steel  | Steel produced by rolling and drawing the semi-product steel ( $\geq$ recrystallization temperature : 800~1200°C) |
|                     |               | Cold rolled steel   | Steel produced by cold rolling the hot rolled steel ( $\leq$ 800°C)   |
|                     | Casting steel | Steel product with specified shape made by pouring liquefied steel into casting mold  |   |
|                     | Forging       | Steel product made by forging raw material  |   |
| Type                | Shape         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Section shaped steel (R, E, N, L-shaped, rail, bulb plate and sheet pile and so on)</li> <li>• Bar steel (circular, rectangular, hexagonal, octagonal, etc. bar steel and so on)</li> <li>• Wire rod (circular, etc.)</li> </ul> |   |
|                     | Plate         | Thick medium, thin, hot-rolled or cold-rolled and surface treated steel plate   |   |
|                     | Tubular       | Seamless, welded and multi-welded pipe  |   |

**Table 3.3 Properties of chemical element for carbon steel materials**

| Classification  |                              | Contents   |
|-----------------|------------------------------|--|
| 5 main elements | Carbon (C)                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Increase the yield / tensile strength and hardness</li> <li>• Decrease elongation and section reduction</li> </ul>  |
|                 | Silicon (Si)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Residual element from pig iron and deoxidation agent</li> <li>• Improvement of flexibility and castability</li> <li>• Deterioration of cold-workability, Decrease impact resistance and elongation</li> <li>• Decrease plasticity, weldability and melting</li> <li>• No chemical compound such as SiO<sub>2</sub>, no effect on mechanical properties</li> </ul> |
|                 | Mangan (Mn)                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvement of yield strength and rolling property,</li> <li>• Degradation of brittleness</li> <li>• Increase depth of case hardening</li> <li>• Promote quenching cracking and deformation.</li> <li>• Degradation of acid-resistance and anti-oxidation</li> <li>• Restraint formation of FeS</li> </ul>  |
|                 | Phosphorus (P)               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvement of weather proof</li> <li>• Decrease impact resistance, weldability and cold-workability</li> <li>• Induce tempering brittleness</li> <li>• Induce formation of harmful Fe<sub>3</sub>P without uniformed distribution</li> </ul>   |
|                 | Sulfur (S)                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dissolution at high temperature (1300°C)</li> <li>• Improvement of cutting property</li> <li>• Cracking factor during hot and cold machining in case of FeS formation</li> </ul>  |
| Added elements  | Vanadium (V)<br>Niobium (Nb) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Increase strength after heat treatment</li> <li>• Restricted addition rate by evaporation at higher temperature</li> <li>• V - Disturbs grain coarsening at higher temperature</li> <li>• Nb - Inhibits stainless steel from corrosion</li> </ul>   |
|                 | Nickel (Ni)                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Improve strength and hardness</li> <li>• Decreases brittleness by addition other elements</li> <li>• Remarkable improvement of low temperature toughness</li> </ul>   |
|                 | Chrom (Cr)                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Improve strength and hardness</li> <li>• Surppress low temperature and hydrogen brittleness</li> <li>• Induces tempering brittleness</li> <li>• Improves heat treatment property</li> <li>• Stainless steel (≥10% Cr)</li> </ul>  |
|                 | Molybdenum (Mo)              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hardness improvement (10 times of Ni)</li> <li>• Surppress tempering brittleness</li> <li>• Increase temperature of grain coarsening</li> </ul>   |
|                 | Tungsten (W)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Use for high alloyed tool steel due to high hardness</li> </ul>   |
|                 | Cobalt (Co)                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Improves strength at higher temperature</li> <li>• Use for high alloyed tool steel due to high hardness</li> </ul>  |
| Others elements | Hydrogen (H)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Decreases impact property</li> <li>• Main factor of weld defect and cracking</li> </ul>   |
|                 | Oxygen (O)                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Important element when converted iron ore into steel</li> <li>• Decreases ductile and impact property when resided as acidic non-metallic compound</li> </ul>   |
|                 | Ntrogen (N)                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Increase strength, but decrease workability with higher contents</li> <li>• Decreases elongation and impact value</li> </ul>  |

**Table 3.4 Mechanical properties of standard microstructure**

| Classification          | Ferrite | Pearlite | Cementite | Remarks |
|-------------------------|---------|----------|-----------|---------|
| TS(kg/mm <sup>2</sup> ) | 35      | 90       | below 3.5 |         |
| Elongation(%)           | 40      | 10       | 0         |         |
| Hradness(Hb)            | 80      | 200      | 820       |         |

**Table 3.5 Target Point for development of HSLA steel material**

| Classification   |                   | Unit   | DNV      | Top class supplier | Target Point | Test | Test Spec. |
|--|-------------------|--------|----------|--------------------|--------------|------|------------|
| C<br>h<br>e<br>m<br>i<br>c<br>a<br>l<br>(max.)           | C                 | W %    | 0.25     | 0.11               | 0.11         | RIST | ASTM A751  |
|  | Si                | W %    | 0.60     | 0.50               | 0.50         |      | ASTM A751  |
|  | Mn                | W %    | 1.70     | 1.40               | 1.40         |      | ASTM A751  |
|  | P                 | W %    | 0.035    | 0.015              | 0.015        |      | ASTM A751  |
|  | S                 | W %    | 0.030    | 0.007              | 0.007        |      | ASTM A751  |
|  | Cu                | W %    | 0.30     | 0.20               | 0.20         |      | ASTM A751  |
|  | Cr                | W %    | min.0.40 | min.0.20           | min.0.20     |      | ASTM A751  |
|  | Ni                | W %    | min.0.40 | 1.00               | 1.00         |      | ASTM A751  |
|  | Mo                | W %    | min.0.15 | min.0.15           | min.0.15     |      | ASTM A751  |
|  | V                 | W %    | 0.12     | 0.05               | 0.05         |      | ASTM A751  |
|  | Al                | W %    |          | 0.050              | 0.050        |      | ASTM A751  |
|  | N                 | W %    |          | 0.009              | 0.009        |      | ASTM A751  |
|  | Nb                | W %    |          | 0.04               | 0.04         |      | ASTM A751  |
|  | B                 | W %    |          | 0.0005             | 0.0005       |      | ASTM A751  |
|  | Ti                | W %    |          | 0.05               | 0.05         |      | ASTM A751  |
|  | W/Sn              | W %    |          | 0.015              | 0.015        |      | ASTM A751  |
|  | CE                | -      |          | 0.53               | 0.49         |      | ASTM A751  |
| Pcm  | -                 |        | 0.27     | 0.25               | ASTM A751    |      |            |
| M<br>e<br>c<br>h<br>a<br>n<br>i<br>c<br>a<br>l<br>(min.) | YS                | MPa    | 620      | 600                | 620          | DSME | ASTM A370  |
|  | TS                | MPa    | 430      | 500                | 430          |      | ASTM A370  |
|  | Elongation        | %      | 16       | 17                 | 20           |      | ASTM A370  |
|  | Reduction Area    | %      | 30       | 35                 | 50           |      | ASTM A370  |
|  | -40°C Impact test | J      | (0°C) 32 | 68                 | 68           |      | ASTM A370  |
|  | Hardness          | Hvmax. |          | 325                | 325          |      | ASTM E92   |
|  | NDE               | MT     | %        | Perfect            | Perfect      |      | Perfect    |
| UT   |                   | %      | Perfect  | Perfect            | Perfect      |      |            |
| RT   |                   | %      | Perfect  | Perfect            | Perfect      |      |            |

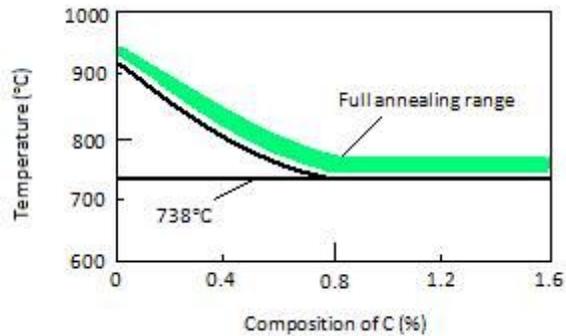


Fig. 3.1 Full annealing temperature ranges

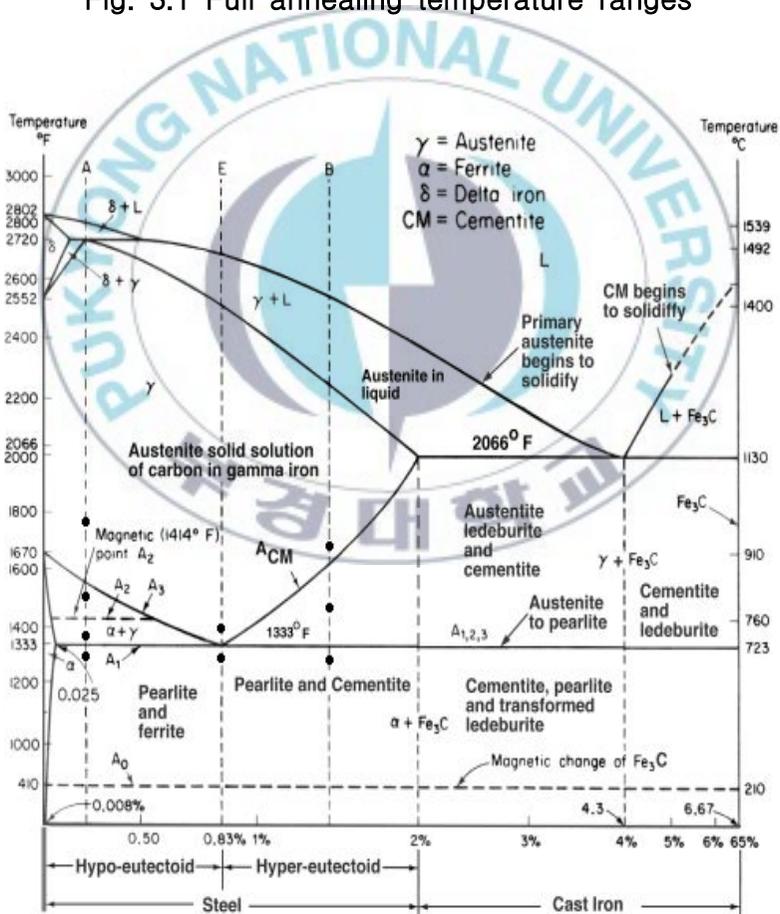


Fig. 3.2 Detail of Fe-C equilibrium diagram

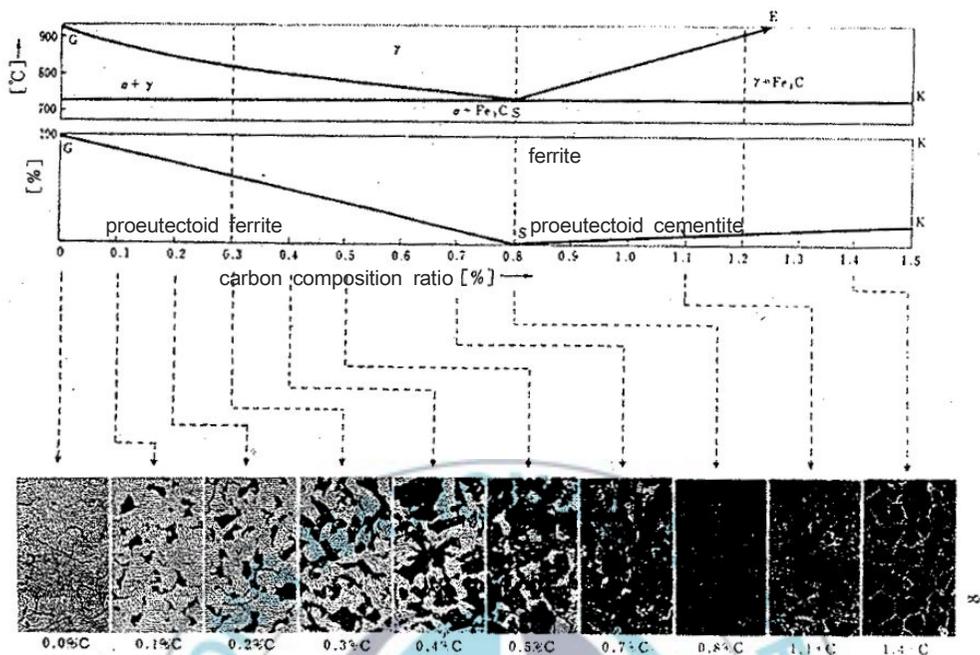


Fig. 3.3 Microstructure for the standard carbon material

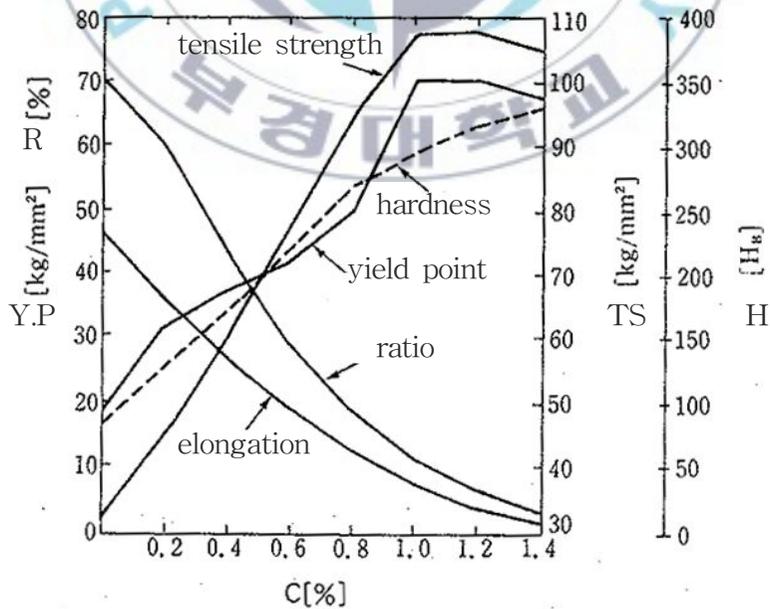


Fig. 3.4 Mechanical properties for the standard carbon material





Fig. 3.6 Test equipment of chemical composition for specimen



a) Outside

b) Inside

Fig. 3.7 Heat treatment facility for quenching



a) Outside

b) Inside

Fig. 3.8 Heat treatment facility for tempering



Fig. 3.9 Hot mounting machine (left) and polisher (right)

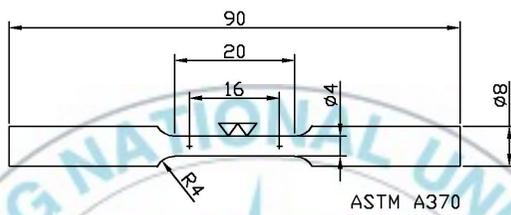


Fig. 3.10 Section of the specimen for tensile strength test

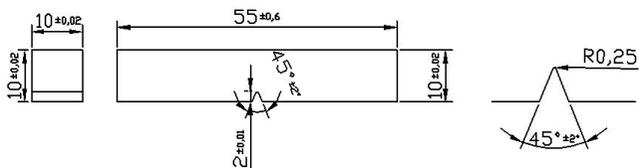


Fig. 3.11 Section of the specimen for impact test

## 2. 소재 시험편

### 가. 시험편 제작

시험편 제작을 위한 주조공정 시뮬레이션은 MAGMA Software를 사용하여 진행하였다.

최종 Fig. 3.12에서 보는 바와 같이 기공 및 Hot spot에 의한 결함이 없음을 시뮬레이션을 통해 확인한 후 해당 Case의 주입구 및 압탕 크기, 주입속도 등의 정보를 사용하여 제작에 착수하였다.

시험편의 제작은 Fig. 1.1에서 제시된 소재개발 및 주조공정을 따라 Fig. 3.13 및 Fig. 3.14와 같이 수행되었다.

- ① 생산도 작성
- ② 목형 설계 및 제작, 형틀 제작
- ③ 금속재료 용해
- ④ 화학적 처리
- ⑤ 용해된 금속재료 이동 및 형틀 주입
- ⑥ 표면 이물질 제거
- ⑦ 압탕 및 주입구 절단
- ⑧ 열처리
- ⑨ 비파괴 검사
- ⑩ 강도 시험 및 화학적 조성비 확인

소재개발은 순철 및 저탄소함유 고철강을 적정 비율로 용해한 후 요구되는 미량원소들을 추가 투입하는 방법으로 화학성분 조성비를 구성하였

으며, 탄산 및 불순물 제거 등의 공정을 추가로 수행하였다. ASTM 규격을 참조하여 가공 및 시험편은 Fig. 3.15와 같이 강도확인을 위한 최종 파단 시험을 완료하였다(구체적 제작 및 시험에 관한 사양서는 'Appendix I A Specification of the HSLA Carbon Casting Steel' 참조)

## 나. 화학성분 조성

저온 고강도 Casting Steel용 소재로 개발한 각각의 시험편에 대한 화학성분 조성비는 Table 3.6 및 Fig. 3.16과 같다.

소재의 개발과정은 화학적 조성에 대해 탄소 함유량 0.25%를 기본 제어요소로 설정하였으며 개발과정으로 일환으로 진행된 한국, 미국, 유럽 등의 등록특허 기술들을 분석한 한국특허정보원의 특허맵[7]과 참고 사례들의 성적서를 토대로 나머지 미량원소들의 함유 구성비의 적절성을 찾는 시행착오 방식을 선택해 완료하였다.

총 4번의 최적의 재료조합을 찾기 위한 작업이 이루어졌으며, 최종 탄소량의 함유비가 낮으며, 강도 및 용접성능이 성능이 우수한 조합을 찾을 수 있었다.

개발된 소재는 노르웨이선급(DNV) 규정에서의 기준치와 비교해 볼 때 탄소함유량은 0.25%에 비해 모두 낮으며, 미량원소들 가운데 망간(Mn), 규소(Si), 인(P), 황(S) 등과 크롬(Cr), 니켈(Ni), 몰리브덴(Mo) 등의 조합으로 이루어져 있다. 이들 미량원소들은 강도, 저온취성, 경도 등에 영향을 미치는 요소들이며, 최종 소재의 용접성능 확보를 위한 조건과 대비하여 적절성이 검증되어야 한다.

또한 개발된 원천소재가 심해의 압력이 반복적으로 작용하는 잠수함과 같은 특수장치를 비롯한 방위산업용과 원자력 등의 발전설비용 부품 소재

로 활용하기 위해 필요한 기계적 물성치 및 미량원소에 대한 화학적 조성비, 열처리 조건 등을 부분적으로 응용, 보강이 필요할 것이다.

시험편의 화학조성비에 대해서는 국제공인 시험인증기관(KOLAS)인 대우조선해양(주)와 포항산업과학원에서 각각 성분시험을 실시하였는데, 시험편 No.4에 대한 결과는 Fig. 3.17에서 보는 바와 같다.

#### 다. 열처리 조건

열처리조건은 탄소함유량의 차이에 따라 Fe-alloy 상태도를 고려하여 Table 3.7에서와 같이 설정하고 각 조건에 따른 열처리 후의 조직상태와 기계적 성질의 변화를 관찰하였다.

실험에 사용된 소재는 탄소의 함유량이 각기 다른 3종류를 이용하여 제작한 Sample을 이용하였으며, 열처리가 용이하게 산소 용접기를 이용하여 절단하였다. Fig. 3.18은 열처리 직전의 절단 후 Sample의 모습이다.

As-cast 상태로 응고된 주조상 조직을 탄소함유량에 따라 850~920℃에서 가열한 후 형성된 오스테나이트 상태의 조직을 40℃ 이하의 냉각수로 급랭시켜 마르텐사이트(Martensite) 조직을 얻었다.

마르텐사이트 조직은 급랭 처리에 따라 탄소가 확산할 만한 시간적 여유가 없어  $\alpha$ 철 내에 탄소원자가 고용상태로 남아있게 되면서 경도를 증가시켜 높은 취성의 성질을 가지게 된다. 때문에 취성의 저감과 조직 인성의 확보, 급랭에 따른 잔류응력 감소를 위해 뜨임 처리(Tempering)를 실시하였으며 잔가지상의 마르텐사이트 조직을 조대하고 구상화된 안정적 조직으로 유도할 수 있었다.

열처리 후 인장 및 충격시험은 동일 재질 시험편에서 4개 또는 3개를 가공하여 결과치의 평균값을 구하였다.

**Table 3.6 Max. chemical composition table of test specimens**

(Unit : wt%)

|      | C     | Mn    | Si    | Cr    | Ni    | Mo    | P     | S     |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No.1 | 0.232 | 1.210 | 0.420 | 0.033 | 0.035 | 0.002 | 0.011 | 0.008 |
| No.2 | 0.120 | 1.200 | 0.383 | 0.173 | 0.900 | 0.091 | 0.013 | 0.010 |
| No.3 | 0.050 | 1.250 | 0.510 | 0.334 | 1.090 | 0.116 | 0.017 | 0.009 |
| No.4 | 0.125 | 1.160 | 0.400 | 0.201 | 0.924 | 0.053 | 0.018 | 0.009 |
| DNV  | 0.250 | 1.700 | 0.600 | 0.400 | 0.400 | 0.150 | 0.035 | 0.030 |

**Table 3.7 Test condition of specimens**

| Classification | Anneal. | Normal.   | Quenching<br>(Water Cooling) | Tempering<br>(Air Cooling) |
|----------------|---------|-----------|------------------------------|----------------------------|
| DNV            | Fully   | min. 550℃ | min. 550℃                    | min. 550℃                  |
| No.1 (0.232%)  | Yes     | Yes       | 850℃ / 2hr                   | 450~600℃ / 2hr             |
| No.2 (0.126%)  | Yes     | Yes       | 920℃ / 2.5hr                 | 580℃ / 3~6hr               |
| No.3 (0.056%)  | Yes     | Yes       | 920℃ / 2.5hr                 | 500~580℃ / 6hr             |
| No.4 (0.125%)  | Yes     | Yes       | 920℃ / 2.5hr                 | 580℃ / 5hr                 |

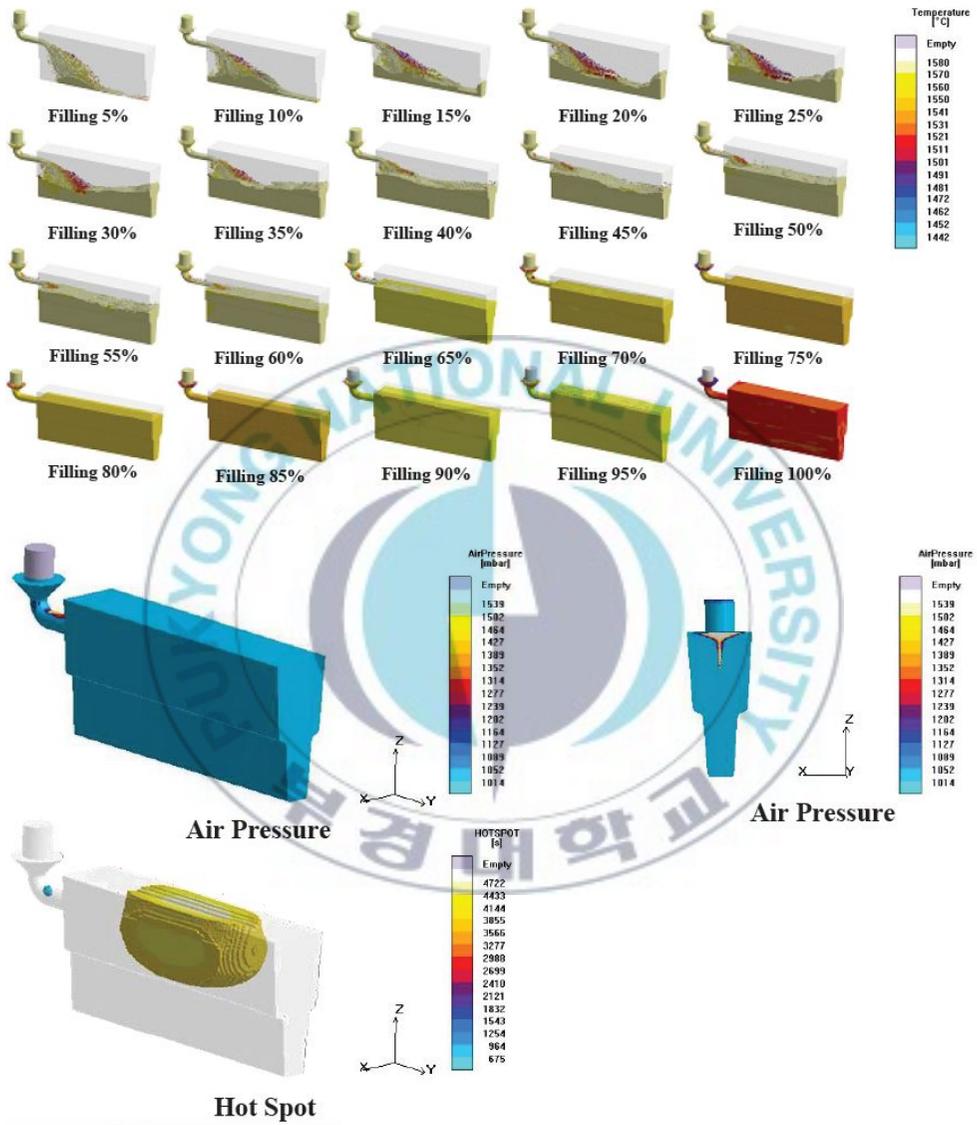


Fig. 3.12 Molding process simulation of specimen by MAGMA



Fig. 3.13 Photographs on the production of the specimens



Fig. 3.14 Production process of specimen



Fig. 3.15 Specimens after tensile (left) and impact (right) test

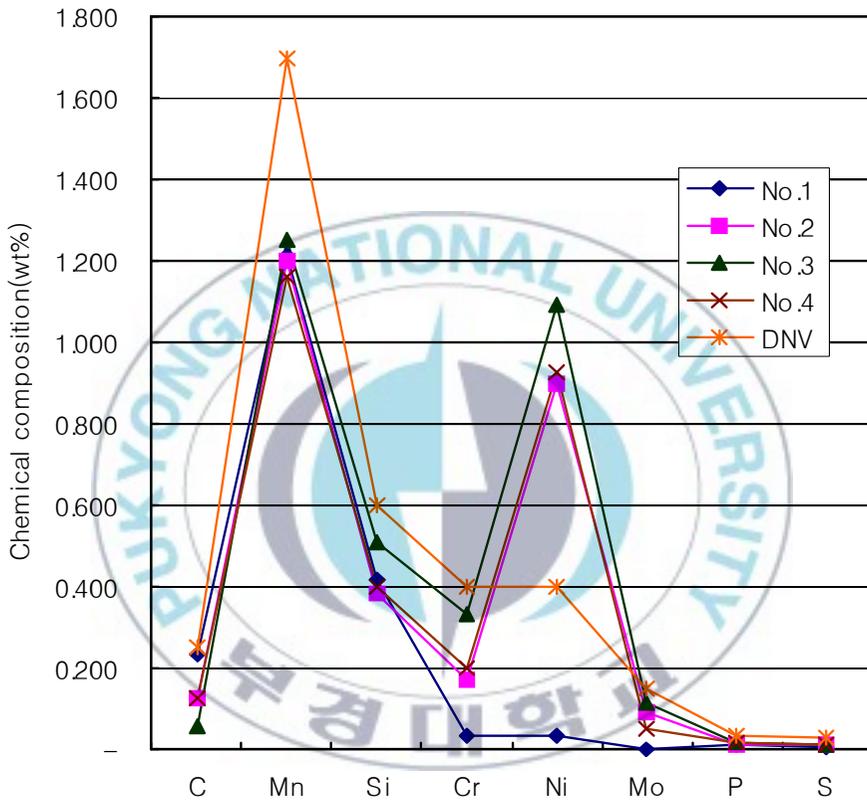


Fig. 3.16 Chemical composition of test specimens

| <b>재단법인 포항산업과학연구원</b><br>rac.rist.re.kr   |         |  |                     |
|---|---------|--|---------------------|
| 경상북도 포항시 남구 효자동 산 32 번지      TEL : (054)279-6950      FAX : (054)279-6459   |         |  |                     |
| <b>시험 성적서 Certificate for Test Materials</b>  |         |  |                     |
| 접수번호 : 2008T00368-04  |         | 용도 : 품질확인 Test of Specimens  |                     |
| 의뢰기관 : (주)석진금속 Sekjin Metal Co., Ltd.   |         |  |                     |
| 주소 : 부산광역시 사하구 신평동 642-19   |         |  |                     |
| 접수일자 : 2008-02-25   |         | 완료일자 : 2008-03-06  |                     |
| 시료명 : 저온 고강도 Casting Steel      Material Description : Low Temperature High Strength Casting Steel  |         |  |                     |
| <b>시험 결과 Result of Test</b>   |         |  |                     |
| 시험항목 Chemical   | 단위 Unit | 결과값 Ratio  | 시험방법 Method         |
| C   | wt. %   | 0.125  | ASTM E415:99a(2005) |
| Si  | wt. %   | 0.400  | ASTM E415:99a(2005) |
| Mn  | wt. %   | 1.16   | ASTM E415:99a(2005) |
| Cr  | wt. %   | 0.201  | ASTM E415:99a(2005) |
| Ni  | wt. %   | 0.924  | ASTM E415:99a(2005) |
| Cu  | wt. %   | 0.022  | ASTM E415:99a(2005) |
| Al  | wt. %   | 0.043  | ASTM E415:99a(2005) |
| Mo  | wt. %   | 0.053  | ASTM E415:99a(2005) |
| 이   | 하       | 어  | Blank               |
| 비고 :  |         |  |                     |
| 1 페이지 중 1 페이지   |         |  |                     |
| * 위 성적서는 의뢰자가 제공한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외에 사용 할 수 없습니다.<br>* 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.<br>* 위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야에 대한 시험결과입니다. |         |  |                     |
| 시험자 : 윤여준<br>Test : Y.J. Yoon   |         | 승인자 : 기술책임자 정성욱<br>Approval : S.W.Jung   |                     |
| 발급일자 2008년 03월 06일  |         |  |                     |
| <b>재단법인 포항산업과학연구원장</b><br>President of the Research Institute of Industrial Science & Technology  |         |  |                     |

Fig. 3.17 Certification sheet on the chemical composition of test specimen



Fig. 3.18 Specimens of materials before heat treatment

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 조직변화 양상

Fig. 3.19는 개발된 소재에 대해 열처리를 실시하기 전에 관찰한 200배율의 탄소함유량 변화에 따른 각각의 미세조직 단면이다. 탄소함유량이 낮을수록 초석 페라이트(Ferrite)와 오스테나이트(Austenite) 사이의 원자 배열이 잘 연결되지 않아 부정합경계면 (Incoherent interface)이 생성된 형태로 관찰되었으며, 주강품의 전형적인 조직사진이라고 할 수 있다.

Fig. 3.20은 주조상 조직을 개선하고 동시에 주조응력을 제거하기 위하여 탄소함유량에 따라 각각 다른 온도와 시간을 적용하여 담금질 (Quenching)을 한 조직사진을 관찰한 그림이다.

탄소함유량이 적을수록 미세한 가지상 마르텐사이트로 변태됨을 확인할 수 있었다. 그러나 평행하게 배열되는 부분인 다발이 탄소함유량이 작아짐에 따라 현저하게 발달되는 것을 확인 할 수 있었다.

이는 각 다발의 마르텐사이트 가지들이 서로 다른 방향성을 가지고 있어 조직관찰시 부식액 나이탈용액을 사용한 에칭(Etching)에 따라 각기 다른 부식특성이 관찰되는 것으로 사료된다.

Fig.3.21은 담금질에 의해 경화된 강의 취성을 줄이고 인성을 높이기 위하여 뜨임 처리를 한 이후 적용시간과 탄소함유량을 달리한 재료에 대한 미세조직을 관찰한 것이다. 뜨임 처리를 통해 잔가지상이 많이 제거되고 초기 오스테나이트와 다발 내의 조대하고 구상화된 시멘타이트 (Cementite)의 입자가 생성되는 것을 확인하였다. 이는 비슷한 방향으로 배열된 다발 내의 잔가지상들 사이에 소경각경계가 소멸되고 동시에 전체 전위농도가 감소하며 재배치되기 때문으로 사료된다.

## 나. 조직 분석

조직분석은 시험편의 단면을 현미경으로 관찰하여 표준단면과 비교하는 것으로 이루어진다. 주강품 제조시  $A_3$ (변태점 온도  $910^{\circ}\text{C}$ ) 혹은  $A_{cm}$ (오스테나이트로부터 시멘타이트가 석출하기 시작하는 온도) 선 이하로 냉각 속도를 느리게 하여 초석 페라이트의 연결이 끊어진 부분이 많도록 해야 하며, 보다 미세한 마르텐사이트 조직을 얻기 위해서는 모상인 오스테나이트의 조직이 조밀해야 한다는 것을 파악할 수 있었다.

Fig. 3.19, Fig. 3.20에서 보는 바와 같이 탄소함유량에 따라 용탕에서 응고될 때 온도감소량과 탄소함유량에 따른 펄라이트(Pearlite) 양, 펄라이트 속에서 생성되어가는 오스테나이트의 핵 생성 속도가 다르기 때문에 탄소함유량이 적을수록 오스테나이트의 핵 생성을 위한 탄소 확산이 느려져 오스테나이트가 발달하지 못한다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.

인장시험 결과 탄소함유량이 가장 높았던  $0.232\%C$ 에서 충분한 강도를 나타내었지만, 연신율과 단면감소율, 충격시험 에너지값이 목표 값에 근접하지 못하였다. 이것은 뜨임 처리한 마르텐사이트 조직에 여전히 잔가지상이 일부 존재하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 3.21에서 탄소함유량이  $0.126\%C$ 일 때는 마르텐사이트의 다발이  $0.232\%C$ 일 때 보다 작아짐으로 해서 뜨임 이후 작은 잔가지상들이 많이 없어졌고 초기 오스테나이트와 다발 안에 조대한 시멘타이트 입자를 만들었기 때문에 뜨임 처리 시간의 변화와는 상관없이 인장과 연신율 단면감소율이 목표치를 상회한 것으로 판단된다.

탄소함유량이  $0.056\%C$ 인 뜨임 처리된 마르텐사이트 조직은 조대화 로 인해서 보다 좋은 파괴인성을 나타내는데 조직의 조대화 로 인하여 강도값은 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

#### 다. 기계적 성질

Fig. 3.22, Fig. 3.23, Fig. 3.24, Fig. 3.25, Table 3.8은 탄소함유량과 열처리조건의 변화에 따른 개발된 소재의 각각의 시험편에 대한 기계적 성질을 조사하여 비교한 그래프이다.

각각의 시험편들의 기계적 물성치에 대해 국제공인 시험인증기관(KOLAS)인 대우조선해양(주)와 포항산업과학원(RIST) 등의 공인시험 인증을 거쳤다.

시험편의 기계적 성질에 대한 결과는 No. 1을 제외한 소재의 경우 단면감소율과 연신율의 목표치를 상회하는 결과가 얻어졌다.

탄소함유량이 상대적으로 높은 0.232%의 시험편의 열처리조건에 따른 기계적 성질을 비교해본 결과 인장강도와 항복강도 값은 목표치를 만족하는 결과치를 얻을 수 있었다. 그러나 저온(-40℃)에 대한 충격시험값은 No.4를 제외하고는 목표치인 68Joule을 근소한 범위에서 만족하지 못하였으며, No.1은 저조한 값을 나타내었다.

또한 탄소함유량 0.056%인 소재의 열처리 후 기계적 성질을 조사한 결과 탄소함유량이 매우 낮은 수치에서는 저온 충격성과 연신율, 단면감소율을 확보 할 수 있었으나 인장강도 값을 충족시키기가 어렵다는 것이 확인되었으며, 0.125%의 탄소함유량에 따라 580℃에서 5시간 뜨임 처리를 한 조건에서 Ref. 1(DNV NV 550 W; 항복강도 355MPa, 인장강도 550MPa)인 항복강도 및 저온충격성, 용접성능 등을 모두 충족하는 결과 값을 얻게 되었다. Ref. 2(DNV NV 620 W; 항복강도 430 MPa, 인장강도 620MPa)에 비교할 때 항복강도는 456MPa로 우수하며 인장강도에서 600MPa로 다소 미치지 못하고 있으나 현재 시점에서 해양구조물 주문주 사양서(Technical Contract Specification)에서 언급되고 있는 인장강도 하

한치인 600MPa을 넘어서는 수준에 해당된다.

## 라. 비파괴 검사 및 용접 성능

시험편에 대한 금속의 결함유무를 판단하기 위한 비파괴 시험방법은 표면에 대해서는 시각적 검사를 내부에 대해서는 MT(Magnetic Test), PT(Liquid Penetration Test), UT(Ultrasonic Test), RT(Radiographic Test) 등의 방법이 선택적으로 사용된다.

통상 제품시험의 경우 내부 결함 유무를 판단하기 위해 UT 또는 RT를 선택적으로 적용하지만, 시험편에서는 MT, UT, RT를 모두 적용하였으며, RT를 수행한 결과를 아래 Fig. 3.26에 나타내었다.

그림에서와 같이 주조공정 후 기계 물성치에 문제가 되는 기공 및 불순물이 없음을 확인할 수 있었으며, 기계적 강도에 미치는 기공과 불순물 등의 영향은 없을 것으로 판단되었다.

제품의 경우 기공이나 불순물에 의한 결함유무 판단 1~3mm 범위에서 허용된다.

용접성능에 대한 확인은 주조품이 선급용 강재와 용접결합되기 때문에 매우 중요한 절차인데, 재료의 구성성분의 함수인 CE와 Pcm으로 관리되고 있다.

Table 3.9에서 보는 바와 같이 개발된 각각의 소재에 대한 Pcm은 0.186~0.312범위로, CE는 0.411~0.450범위를 보이고 있으며 No.1이 Pcm 요구치를 벗어난 것을 제외하고는 모두 ASTM A751 기준을 충족하였다.

이외에도 실재 제품 제작에 적용되는 기술로는 용접결합 수정과 열처리 과정에서 발생하는 변형제어 및 수정 기술이 포함되지만, 본 연구의 범위에 포함시키지 않고, 생산공정에 포함하였다.

**Table 3.8 Min. mechanical properties for steel casting**

| Classification         |           | DNV-OS-B101 |          | Specimen of No. 4 | Remarks |
|------------------------|-----------|-------------|----------|-------------------|---------|
|                        |           | NV 550 W    | NV 620 W |                   |         |
| Ys(N/mm <sup>2</sup> ) |           | 355         | 430      | 456               |         |
| TS(N/mm <sup>2</sup> ) |           | 550         | 620      | 599.6             |         |
| Elongation(%)          |           | 18          | 16       | 24.6              |         |
| Reduction Area(%)      |           | 30          | 30       | 67.2              |         |
| Hardness(Hv)           |           |             |          | 182.13            |         |
| Impact Test            | T(°C)     | 0           | 0        | -40               |         |
|                        | Energy(J) | 32          | 32       | 69.78             |         |

**Table 3.9 Comparison of CE & Pcm**

| Classification | No.1  | No.2  | No.3  | No.4  | Reference (ASTM A751) |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| CE             | 0.450 | 0.423 | 0.411 | 0.411 | Max. 0.490            |
| Pcm            | 0.312 | 0.239 | 0.186 | 0.231 | Max. 0.250            |



Fig. 3.19 Comparison of microstructure ( $\times 200$ ) of 0.232%, 0.126%, 0.056% before heat treatment



Fig. 3.20 Comparison of microstructure ( $\times 500$ ) of 0.232%(850 $^{\circ}$ C, 2hours), 0.126%(920 $^{\circ}$ C, 2hours), 0.056%(920 $^{\circ}$ C, 2.5hours) after quenching



Fig. 3.21 Comparison of microstructure ( $\times 500$ ) of 0.126% (top; 4, 5, 6 time interval at the 580 $^{\circ}$ C), 0.056% (bottom; 500, 540, 580 $^{\circ}$ C temperature interval at the 6hours) after tempering

### Test Report

Sample name

Material

Test date: 2008.

Client:

Universal Testing Machine TTM1000

Statistic Result data:

| K.H HAN         | D [mm] | S.A [mm <sup>2</sup> ] | Ø.L [mm] | U.T.S [N/mm <sup>2</sup> ] | ML [kN] | E [%] | RA [%] | Y.S [N/mm <sup>2</sup> ] | Y.L [kN] | L1 [mm] | Du [mm] |
|-----------------|--------|------------------------|----------|----------------------------|---------|-------|--------|--------------------------|----------|---------|---------|
| A(980+920+630H) | 14.00  | 153.94                 | 55.00    | 587.24                     | 90.40   | 24.18 | 58.67  | 449.22                   | 69.15    | 68.30   | 9.00    |
| B(980+920+630H) | 14.00  | 153.94                 | 55.00    | 605.82                     | 93.27   | 25.64 | 64.43  | 481.78                   | 74.16    | 69.10   | 8.35    |
| C(980+920+630H) | 14.00  | 153.94                 | 55.00    | 599.20                     | 92.24   | 27.27 | 64.00  | 461.72                   | 71.08    | 70.00   | 8.40    |

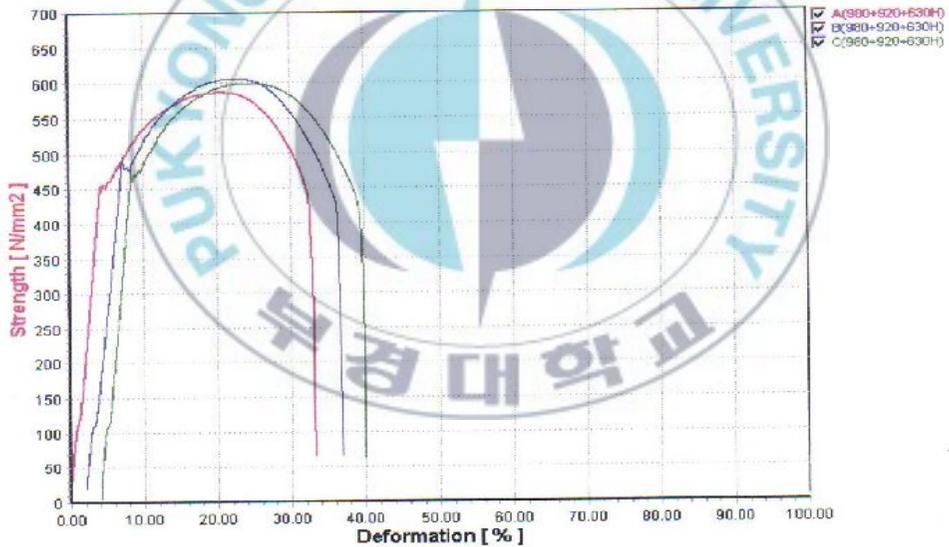


Fig. 3.22 Reference of stress strain curve for the specimen

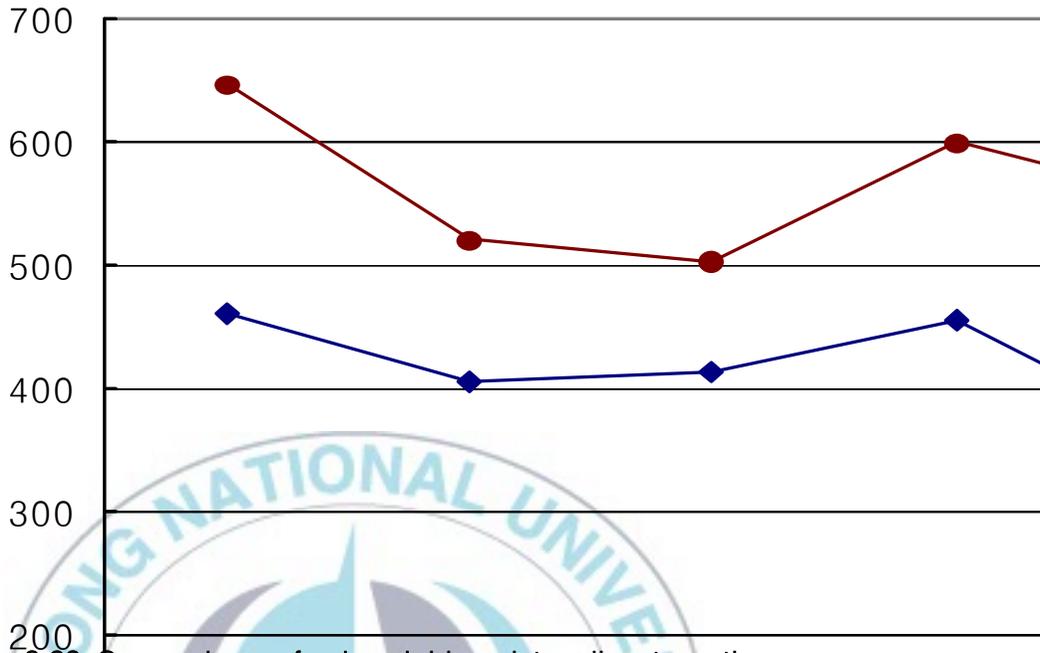


Fig. 3.23 Comparison of min. yield and tensile strength

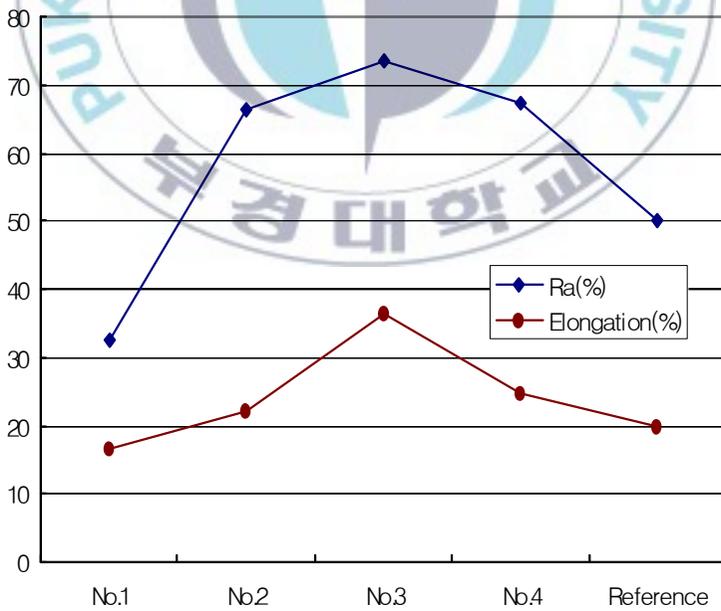


Fig. 3.24 Min. elongation and ratio of min. reduction of area

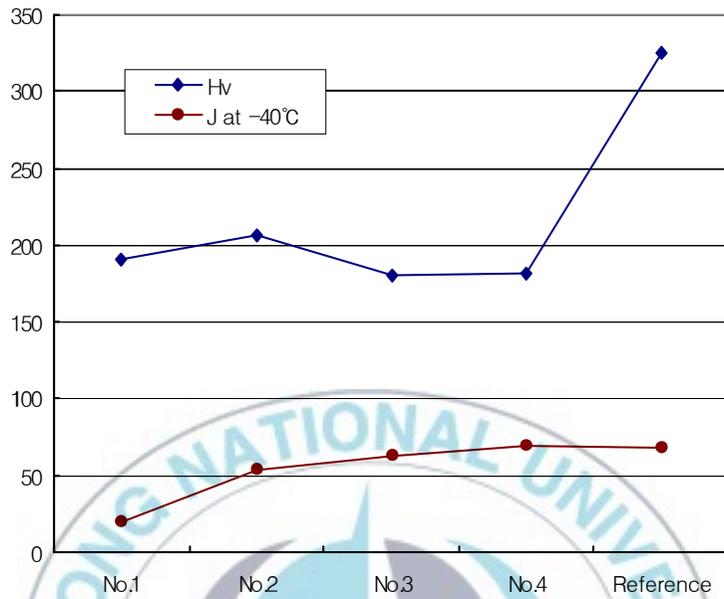


Fig. 3.25 Comparison of max. hardness and min. Charpy V-notch test

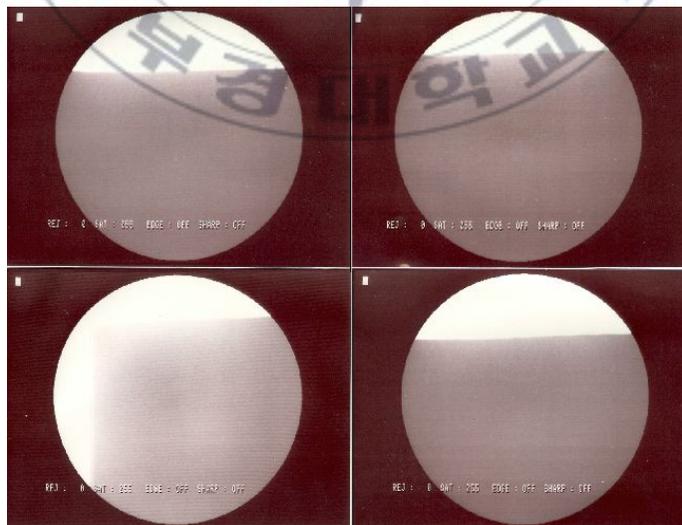


Fig. 3.26 Result of radiographic test for specimens

## IV. 해양구조물용 신개념 구조보강재 개발

### 1. 해양구조물용 Bracket 특성

Table 4.1에서 구분한 바와 같이 상선과 부유식 해양구조물은 강구조이며 부유체라는 동일한 특성을 가지고 있으면서도 구조형식은 판이하게 차이가 난다. 상선은 사람 또는 물자를 최대한 경제적으로 안전하게 수송하는 것이 목적으로 내부의 재화중량톤수(DWT) 및 적재공간을 최대화하는 것이 설계의 이슈가 되지만, 부유식 해양구조물은 심해자원의 채굴능력을 최대화하기 위해 계류안전성 확보와 장비설치 효율 증가를 위한 최적배치와 구조물 중량의 감소에 집중하고 있다[42].

본 연구는 Fig. 4.1에서와 같이 기존 상선에 적용되는 Bracket의 벤딩 및 판구조용접이음방식(좌측 그림)이 아닌 해양구조물 적용을 위해 압연이나 주조방식(우측 그림)으로 변경하는 것이다.

반잠수식석유시추선, TLP, FPSO 등 심해역에 주로 설치되는 부유식 해양구조물은 집중하중 형태로 작용하는 응력에 견디기 위해서는 선박의 보강판 구조(Stiffened plate structure)가 아닌 빔구조(Framed structure) 형태로 상부구조를 구성하는 경우가 일반적이다.

바다 위를 항해하는 상선과는 달리 해양구조물의 경우 위치를 해상에 고정하고 있기 때문에 환경하중이 고스란히 계류력으로 전달되며, 해저자원 생산작업이 진행되는 과정에서 발생하는 응력 또한 상대적으로 매우 크기 때문에 집중하중에 대한 적응성이 뛰어난 구조형식을 선호한다.

이와 같은 구조형식을 가지는 해양구조물들은 사각형 구획

(Compartment) 내부의 보와 기둥, 또는 벽체가 만나는 모서리부에 Fig. 4.2와 Fig. 4.3에서와 같은 각종 크기의 표준형상(Typical type)을 가진 중대형 Bracket 수천개 설치하게 되며, 이들은 내부공간에 기계장비를 설치하거나 배관, 전기 또는 공조라인을 설치할 경우 제약요인이 되고 있다.

Fig. 4.4에서 보는 바와 같이 대형 Bracket과 내부공간에 설치되는 장비가 서로 간섭을 일으킬 경우 일반적으로 Bracket을 절단하고 이면이나 주변 구조의 보강을 통해 대처하고 있다. 그림의 위는 간섭에서 절단, 그리고 보강까지의 재작업 순서를 보여주고 있으며, 그림의 아래는 Bracket의 간섭을 일으키는 각종 장비 및 절단 사례를 보여 주고 있다.

이 경우 수정작업 시수 및 비용 증가 등의 문제가 크게 대두되고 있으므로 근원적으로 Bracket과 장비 간섭으로 인한 재작업을 없애고 동시에 공간사용 효율도 높일 수 있는 대안 마련이 필요하다.

Bracket제작에 압연이나 주조 공정을 적용할 경우 소량의 경우 형틀 제작비용의 부담이 크고 형상별 표준화를 적용할 수 없다는 단점이 있다. 하지만 해양구조물과 같이 표준형상의 Bracket이 대량으로 사용될 경우 압연이나 주조공정을 통해 생산하더라도 대량 생산 및 표준화를 통해 원가절감이 가능하고, 최적형상 설계를 통해 중량 및 크기의 경감, 구조용 고강도 소재의 사용, 용접 및 판재 성형 또는 절단 공정의 생략, Nesting에 의한 Scrap발생을 막을 수 있어 경제성 있는 생산이 가능할 것으로 기대된다.

또한 조선소의 경우 설계작업이 3D Modeling을 통해 작업되기 때문에 Library에 해당 형상을 저장해놓고 필요시 불러다 사용할 수 있고, 별도의 판재 Nesting 및 절단작업이 필요가 없으며, 소요시점에 바로 제작사로부터 조달이 가능하므로 자재보관 장소를 줄일 수 있는 등 부가적인 원가절감이 가능하다는 장점도 가지고 있다.

Table 4.1 Comparison between the commercial ship and offshore structure

| Classification  | Commercial Ship  | Offshore Drilling Structure  |
|-----------------|--|--|
| Purpose         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transportation</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemical plant</li> </ul>   |
| Design Goal     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Max. volume</li> <li>• Max. velocity</li> <li>• Stability, Efficiency</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacity of production</li> <li>• Min. weight</li> <li>• Stability for mooring</li> </ul> |
| Sameness        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Surfaced unit</li> <li>• Steel structure</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Surfaced unit or Fixed</li> <li>• Steel structure</li> </ul>                              |
| Structural type | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stiffened plate</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Framed structure</li> <li>• Stiffened plate</li> <li>• Framed + Stiffened</li> </ul>      |
| Mega trend      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Large scale</li> <li>• High efficiency</li> <li>• Environment-friendly</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Large scale &amp; Deep sea</li> <li>• Arctic</li> <li>• New model</li> </ul>              |

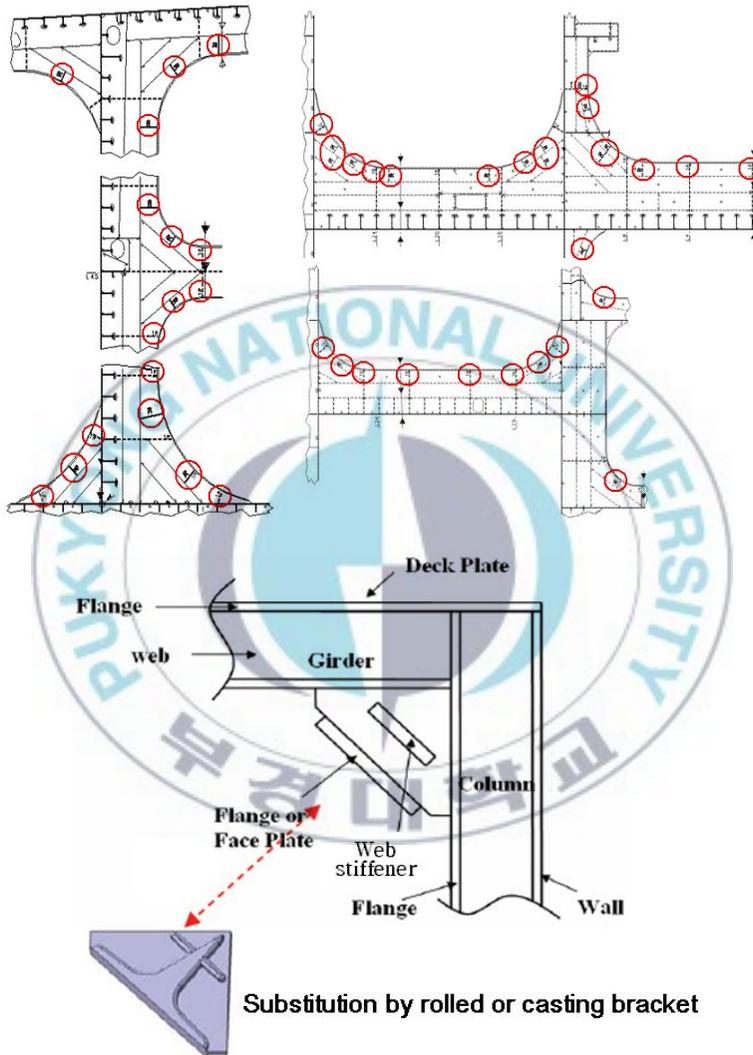


Fig. 4.1 Comparison between commercial ship (left) and concept of the this study (right) for the bracket

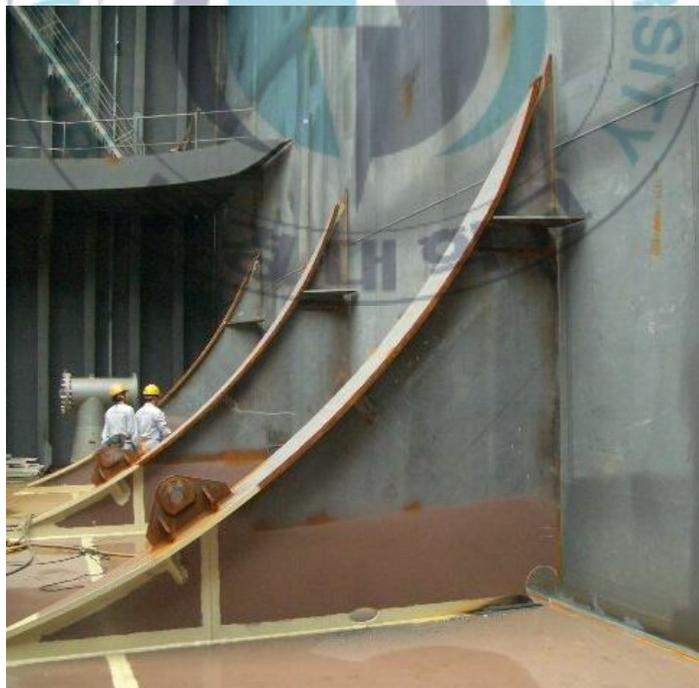


Fig. 4.2 Large size bracket for pontoon corner of the semi-rig

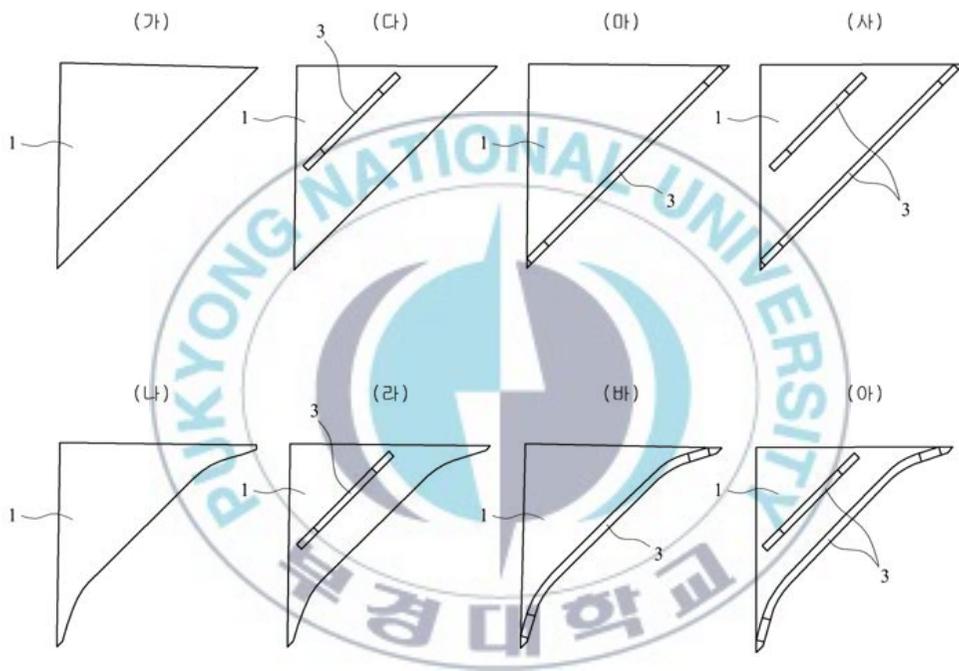


Fig. 4.3 Built-up type brackets

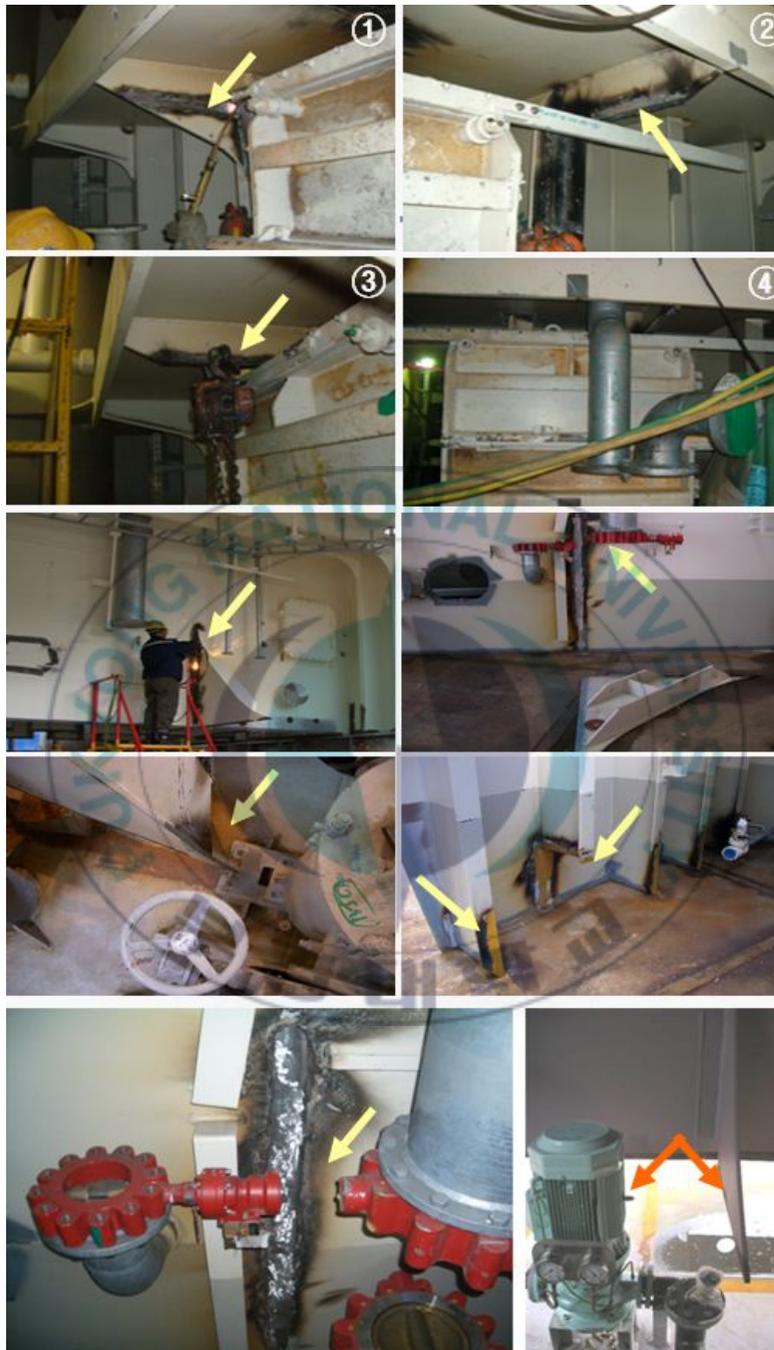


Fig. 4.4 Example of interference between large size bracket and equipment or outfitting

## 2. 소재 및 해석 조건

### 가. 소재 특성

Bulb Bracket의 압연용 및 Built-up Bracket의 제작 소재는 국내에서 판매 및 압연용 소재로 조달되고 있는 선급 강재인 DH36 class의 판재로 인장강도 500 MPa, 항복강도 350 MPa로 주강용 소재에 비해 2/3 수준의 강도를 나타내고 있다.

Bulb bracket에 적용된 주조용 소재는 해양구조물의 응력집중부에 사용되는 구조용 주강품의 소재로 국내에서 개발된 저온 저탄소 고강도 소재로 탄소함유량 0.125%로 인장강도(600 MPa) 및 항복 강도(456 MPa)를 포함한 기계적 물성치가 우수하며,  $-40^{\circ}\text{C}$ 에서의 충격시험값 70J을 나타내고 있으며, 탄소당량(CE) 0.411, 용접균열감수성지수(Pcm) 0.231로 용접성능 면에서도 우수한 성질을 가지고 있다[43].

보와 기둥을 구성하는 주구조물의 소재는 DH36 선급강재를 적용하였다.

### 나. 형상 모델

일반적인 Built-up bracket은 Fig. 4.5 Case 1~4의 형상들이며, 면재(Face plate)와 측면보강재(Stiffener)를 복부판에 가감하고 있다.

본 연구에서는 Built-up bracket 총 4개와 비교대상 압연형강재 2종(Case 6, 7)과 주조품 2종(Case 8, 9)으로 구성된 신개념형강재 Bulb bracket 총 4종에 대한 표준형상은 노치부 용접비드가 포함된 설계를 하였다.

판재를 절단 용접하는 공정으로 진행되는 Built-up bracket은 힘을 많이 받는 중대형 크기는 면재가 기본적으로 적용되며, 응력발생 양상에 따라 측면보강재가 면재와 수평하게 또는 이에 덧붙여 연직하여 Bracket의 주부재인 복부판에 부착된다.

Bracket의 복부판 두께는 설치되는 보나 기둥의 복부판 두께의 범위에서 결정되며 면재는 용접성을 고려하여 복부판 두께의 최대 2배를 넘지 않는 범위에서, 측면보강재는 복부판 두께 범위에서 정하는 것이 기본형상을 정하고 작용하는 하중의 크기에 따라 크기를 달리하는 것이 일반적인 설계방법이다.

소형 Bracket은 보강구조가 적용되지 않기 때문에 용접공정이 필요가 없으므로 철판에 대한 절단공정만으로 제작된다.

Bracket 사면부는 크기를 줄이고 하부의 의장품 설치공간의 최대 확보를 위해 응력의 전달과 확산이 용이하도록 원곡선과 직선으로 조합한 형태도 설계되고 있는데, 면재를 설치할 경우 곡성형(Bending)이 필요하게 되는 단점이 있다. 상선설계에서는 면재를 절단한 후 끝단부를 곡성형하여 L형 면재를 만들기도 하지만, 응력집중부가 많고 집중하중이 상대적으로 큰 해양구조물에서는 적극적으로 활용되지 않고 있다.

Bulb bracket은 Built-up bracket의 기본형상을 바탕으로 작용하는 작용응력의 분포에 따라 면재와 측면보강재 두께를 두껍게 하였으며, 이들의 직선부와 곡선부의 연결은 완만하게 이어지도록 설계하였는데, 기존 Bulb Flat의 형상 일부를 참조하여 설계하였다.

압연형강재는 Built-up 방식에 비해 용접공정이 필요가 없고 두께를 두껍게 만들 수 있다는 장점이 있으나, 주조품에 비해 초기제작비가 적게 들고 대량생산에 유리한 장점이 있는 반면 다양한 곡선과 두께의 조절이 어렵다는 단점이 있다.

두께 조절방법은 해석모델의 각 Mash에 발생하는 응력분포의 차이에 대해 식(4.1), 식(4.2)의 사각구조의 단면계수(Z)와 굽힘모멘트(M)을 구해 발생 발생응력( $\sigma$ )를 구하는 방법과 면재와 측면보강재의 양단부를 1 : 2.5로 Snip을 적용하는 방법으로 최적화를 시도하였으며, 최종 ANSYS 유한요소해석 모델 상에서 이를 검증하는 절차로 진행하였다.

$$\sigma = M / Z \quad (4.1)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6} \quad (4.2)$$

#### 다. 해석 모델

Fig. 4.6에서 뼈대를 이루는 주구조부인 기둥과 거더는 T-type 형상이며 선급강재인 DH36 재질을 적용하였으며 Bracket은 Case 1~6은 DH36을, Case 7과 Case 8은 Casting steel을 적용하였다.

유한요소 해석모델은 ANSYS프로그램을 사용하여 Fig. 4.7과 같이 형상구축 작업을 수행하였다.

주구조부는 높이 2500mm의 기둥(T500×400×15/30)과 길이 5000mm의 보(T500×400×15/30)으로 구성하였고, 보와 기둥이 만나는 모서리에는 각 타입별 Bracket을 설치하여 8개의 모델을 만들었다.

DH36 재질의 보와 기둥을 가지는 좌우대칭 형상의 구조물을 구현하고 52MPa과 14MPa 등 2개 수직하중으로 차등화된 등분포하중을 구조물 상단에 가하고, 기둥 하부점을 각각 고정한 후 한계응력값에 도달하는 각 Case 별 Bracket의 최적 중량과 크기, 변형량을 시행착오법으로 탐색하여 결정하였다.

Bracket의 두께는 고정하고 사면형상과 면재 및 보강재의 변화, 크기의 대소에 따른 구조물 하부공간에 설치되는 장비 설치효율을 확인하기 위해 Bracket 길이(L)가 아닌 꼭지점에서 사면부까지의 최단거리인 높이(H)를 찾아 비교(Fig. 4.8 참조)하였으며, 각각에 대한 중량비교도 실시하였다.

Table 4.2에서와 같이 해석작업을 위한 Node와 Element의 수는 주구조물이 많지만 이는 크기 차이에서 오는 것이며 Fig. 4.9에서와 같이 Mash 간격은 주구조물이 100mm, 보다 응력의 분포형상을 자세히 판단할 필요가 있는 Bracket과 주변구조물은 간격을 좁혀 30mm를 적용하였다.

Table 4.3에서 적용소재에서 Casting Steel은 항복강도 450MPa, 인장강도 600MPa을 가정하였으며, 선급강재인 DH36의 350MPa과 500MPa에 비교하여 1.2배 높다.

재료시험에서는 인장강도시험을 통해 항복강도와 단면수출율, 연신율 등을 확인하지만 실제 구조물의 작용력에 대한 안전도는 항복강도로 판단할 수 있다. 본 연구의 해석에서는 항복강도에 대한 안전율은 모든 Case에서 하중조건이 같고, 해석의 목적이 상대비교에 있는 만큼 별도로 고려하지 않고 소재가 가지는 최대값의 범위로 적용하였다.

변위량은 Fig. 4.10에서와 같이 보의 가운데 부분의 처짐량을 확인하였으며 최대 허용치를 현장설치작업 오차한계인 10mm로 설정하였다.

Bracket에 대한 비틀림이나 좌굴, 피로에 대한 검토는 Bracket의 역할이 주부재가 아닌 부부재이고, 주된 작용력이 수직하중이란 점에서 복부판의 면재와 측면 보강재를 이를 충분히 수용한다고 가정하였기 때문에 생략하였다.

만약 특수 개소에 비틀림이나 좌굴, 피로에 대한 검토가 필요하다면 이는 표준 구조보강재가 아닌 Case에 따라 별도의 구조해석을 수행하여 Built-up 방식으로 제작하여야 할 것이다.

**Table 4.2 Materials and structural modeling conditions**

| Name      | Material      | Nodes   | Elements |
|-----------|---------------|---------|----------|
| Structure | DH36          | 118,296 | 58,954   |
| Bracket 1 | Casting steel | 4,087   | 2,114    |
| Bracket 2 | Casting steel | 4,087   | 2,114    |

**Table 4.3 Comparison between adopted materials for the casting steel**

|                    | Built-up bracket<br>(DH36) | Bulb bracket<br>(Rolled or Casting) |
|--------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Young's modulus(E) | 210,702.032                | 1,041,127.3                         |
| YS(MPa)            | 350                        | 450                                 |
| TS(MPa)            | 500                        | 600                                 |



Fig. 4.5 Model cases of built-up and bulb bracket

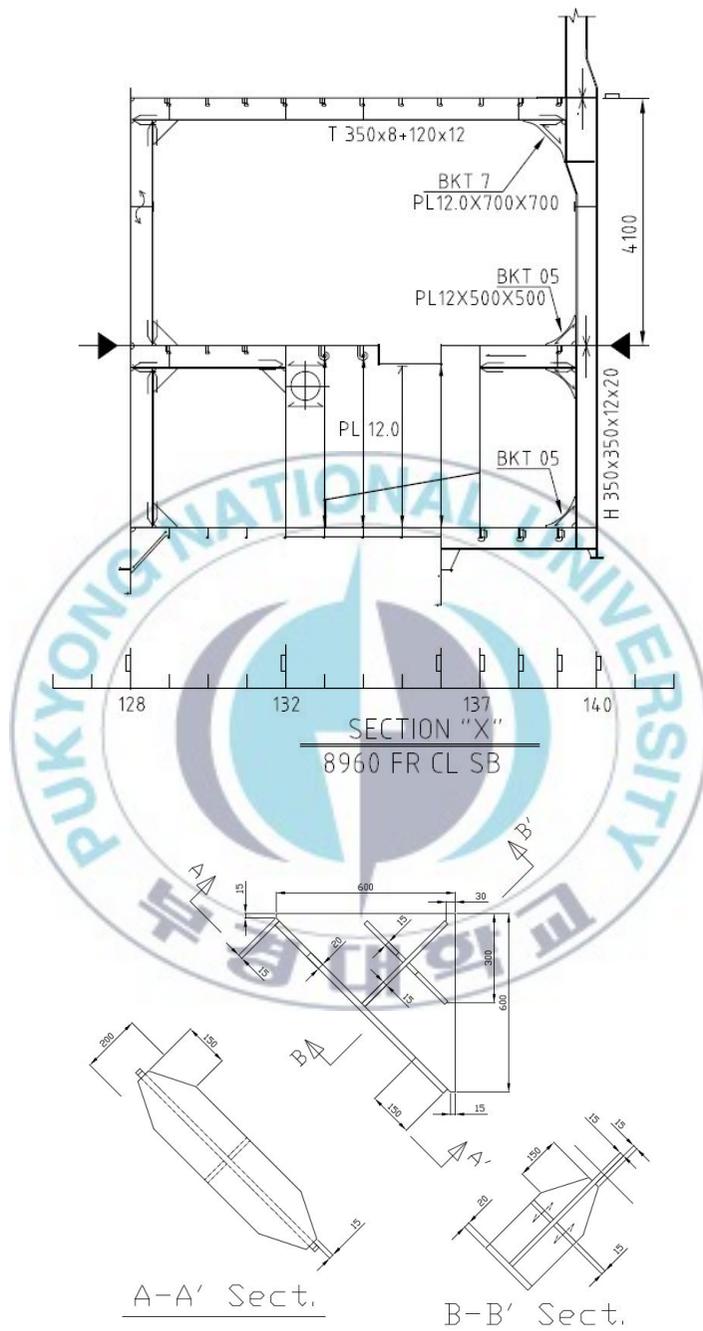


Fig. 4.6 Reference drawing of reinforced structure section by bracket (top) and detail of bracket by built-up type (bottom)

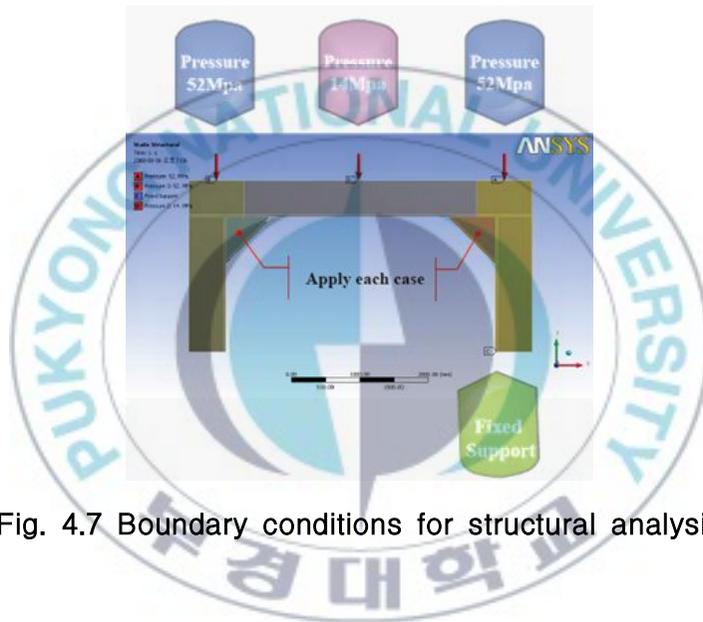
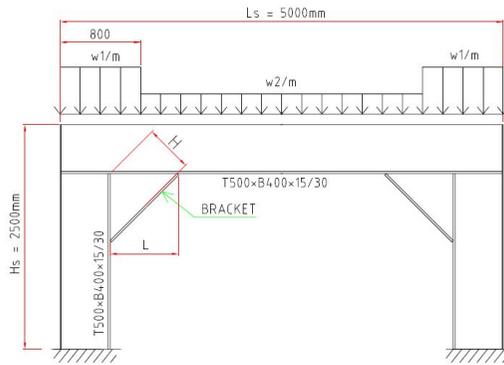


Fig. 4.7 Boundary conditions for structural analysis

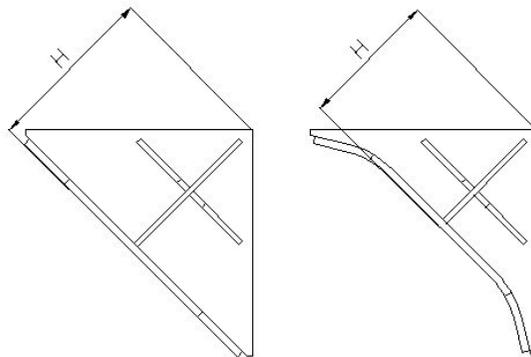


Fig. 4.8 Base size of measurement H compared with size reduction



Fig. 4.9 Mesh in the structural modeling data

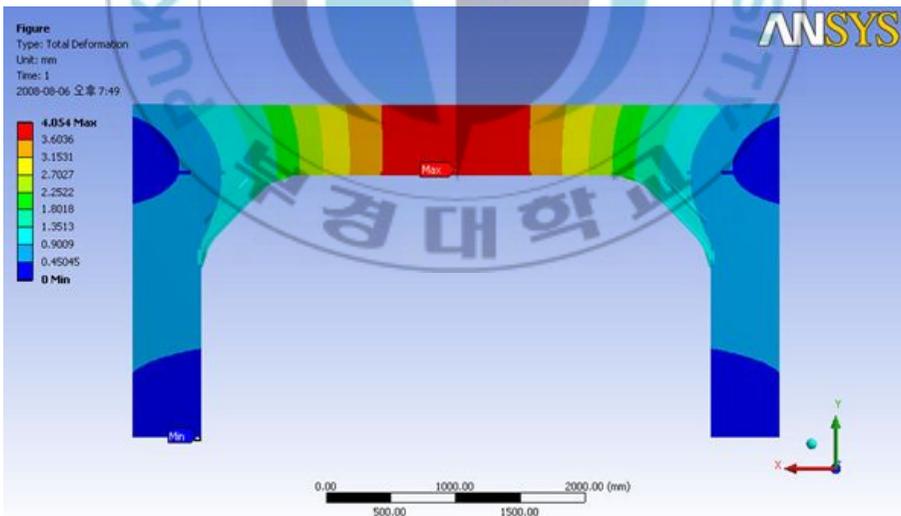


Fig. 4.10 Check of the displacement

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 최대응력 분포점 비교

동일한 하중조건에서의 각 Case에 대한 구조해석 결과는 Fig. 4.12와 같다(상세한 내용은 Appendix II 참조).

기본적으로 빔구조형식에서 특별히 국부적으로 작용하는 경우를 제외하고는 데크의 작용하는 하중은 보로 모아지고, 이는 다시 기둥이나 벽체로 전달되는 구조이다. 따라서 보와 기둥이 만나는 끝단부에 설치된 Bracket에 작용하는 하중의 대부분은 수직하중이 되고 Bracket의 상단이 아닌 하단 끝부분에 응력집중이 발생하게 된다.

기둥의 아래 쪽에 설치되는 Bracket에 작용하는 하중은 위쪽에 작용하는 하중과 동일한 양상을 보이지만 작용점은 대칭이 된다.

Built-up Bracket의 크기는 면재와 측면보강재 사용여부 및 설치위치에도 영향을 받지만, 사선부의 형상을 이중 원곡선을 적용하는 경우 하중 흐름 전달을 완만하게 하는 것이 최대응력 분포점 위치에 보다 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

최대응력 분포점의 위치는 면재가 설치될 경우 아래쪽 꼭지점 근처 즉, 용접비드에 가까운 쪽으로 이동하게 된다.

또한 Built-up에서는 면재보다는 사면부에 근접하여 측면 보강재를 설치하는 것이 구조적인 안정효과가 크게 나타나고 있다. 면재를 같이 사용할 경우 응력집중을 완화하기 위해 Fig. 4.11과 같이 사면 끝단 용접비드를 따라가면서 대각선 방향으로 1~2mm의 둥근 홈을 시공하는 Tow grinding 또는 Ground tow와 같은 후속조치가 있을 경우 추가적인 효과가 있다.

Bulb bracket의 경우 하중의 대부분이 사면부의 끝단부에 집중되는 것으로 나타나 측면보강재의 구조적 안정효과에 대한 역할이 그다지 중요하게 나타나지 않고 있다.

사면끝단부에 이중 원곡선을 적용한 Case 3, 4의 Built-up bracket과 Case 7, 8의 Bulb Bracket의 경우에서 비교적 전체에 걸쳐 하중이 고르게 전달되고 있음을 알 수 있다.

#### 나. 크기 및 중량, 변위량 비교

Fig. 4.12에서 Case 1~4의 Built-up bracket에 대한 최적형상은 사선부를 이중 원곡선으로 연결하고 면재를 부착한 Case 3이 나머지 Case에 비해 가장 최적의 구조적 안정성을 보이고 있었다. 특히 크기 면에서 Case 1에 비교하여 약 25%, 중량은 약 35% 감소하였다.

압연방식의 Bulb bracket은 Built-up bracket과 동일재질을 사용하고 있음에도 크기 및 중량 감소가 효과가 각각 40% 정도로 나타나고 있다 (Case 1 : Case 5). 특히 대량생산방식으로 높은 경제성을 기대할 수 있을 것이다.

주조방식 Bulb bracket은 압연방식에 비해 크기에서 약 20%, 중량에서 약 50% 감소한 것으로 나타났다(Case 5 : Case 7). Built-up의 경우와 비교하여 크기에서 35%, 중량에서 약 50%의 감소 효과가 기대된다.(Case 3 : Case 7) 다만, 표준화를 통한 대량 생산방식을 적용하여 생산비용의 저감을 기대할 수는 있지만 압연방식에 비해서는 형틀제작 측면에서 제조원가 절감의 한계를 안고 있다.

변위량은 8개 Case 모두 Girder의 중앙부에서 5mm 이하로 나타나 구조적 문제가 없는 것으로 확인되었다.

## 다. 최적형상 도출

Fig. 4.12와 Table 4.4에서 얻어진 결과와 같이 Bulb bracket의 최적형상은 동일한 하중분포조건에서 Built-up bracket에 비해 중량과 크기 최적화 관점에서 압연방식 Case 5와 주조방식 Case 7이 적절한 것으로 사료된다.

이는 면재에 해당하는 Bulb의 두께가 충분히 두꺼워 측면보강재가 없더라도 길이(L) 기준 600~800mm 정도 크기(Scantling space)까지는 측면에서의 비틀림이나 좌굴하중에 적절하게 대응하기 때문으로 분석된다.

Bulb bracket의 생산방식은 여러 가지가 있을 수 있지만 주조방식의 경우 연속주조방식으로, 압연방식은 Fig. 4.14에서와 같이 돌기부가 포함된 연속된 판을 길게 압연방식으로 생산한 다음 레이저 절단 등으로 삼각형 형상을 절단하는 방법이 경제적인 적용이 될 것이다.

압연방식에 적용되는 Bulb bracket의 돌기형상은 Fig. 4.13에서 최적설계값을 가지는 기본형상으로 하여 하중의 작용형상에 따라 Fig. 4.15와 같이 다양한 응용이 가능할 것이다.

물론 주조방식에서도 Fig. 4.13과 같이 일면 또는 양면방식의 돌기형상의 적용이 가능하다.

## 라. Bulb bracket 경제성 검토

Bulb bracket은 상선과 같이 하중 분포상황이 위치별로 다르고 작용력의 형태도 비틀림이나 좌굴 등의 수직하중보다 영향이 클 때는 비경제적이다. 그러나 해양구조물의 경우 척당 20,000개 내외의 크고 작은 Bracket이 설치되고 있으며, 이들의 80% 가까이가 표준형상(Typical type)을 채

택하고 있으며, 중대형을 기준으로 약 5,000개 내외에 대해 몇 개의 표준형상으로 구분하여 Bulb bracket을 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

Built-up bracket의 제작에 사용되는 원자재인 판재를 기준가격으로 할 때 Bulb bracket은 완제품 기준 5~8배 높은 가격요인을 가지고 있다.

그러나 Built-up bracket은 판재를 설계 및 가공(절단, 곡성형, 용접, 검사 등)하는 비용이 추가로 발생하는 반면 Bulb bracket은 Fig. 4.16의 예시와 같이 대량생산(표준화)에 따른 단위생산비용 감소가 가능하다.

Bulb bracket의 단위생산비용 감소요인으로는 설계비용 저감, 용접비용 저감, 재료 구매 비용 절감 및 강제사용수율 향상과 함께 표준생산시스템 적용을 함으로써 생산비용을 저감할 수 있으며 목형 등 기본생산비용의 저감도 가능할 것이다.



**Table 4.4 Properties between each cases of built-up & bulb brackets**

| Classification | Size (H; mm) | Weight (kg) | Displacement (mm) | Remarks       |
|----------------|--------------|-------------|-------------------|---------------|
| Case 1         | 483.661      | 41.12       | 3.045             | Built-up      |
| Case 2         | 424.264      | 35.18       | 3.342             | Built-up      |
| Case 3         | 359.055      | 27.00       | 3.582             | Built-up      |
| Case 4         | 359.055      | 30.61       | 3.549             | Built-up      |
| Case 5         | 286.355      | 24.70       | 3.899             | Rolled beam   |
| Case 6         | 286.355      | 27.86       | 3.874             | Rolled beam   |
| Case 7         | 234.038      | 13.06       | 4.308             | Casting steel |
| Case 8         | 230.483      | 13.85       | 4.319             | Casting steel |

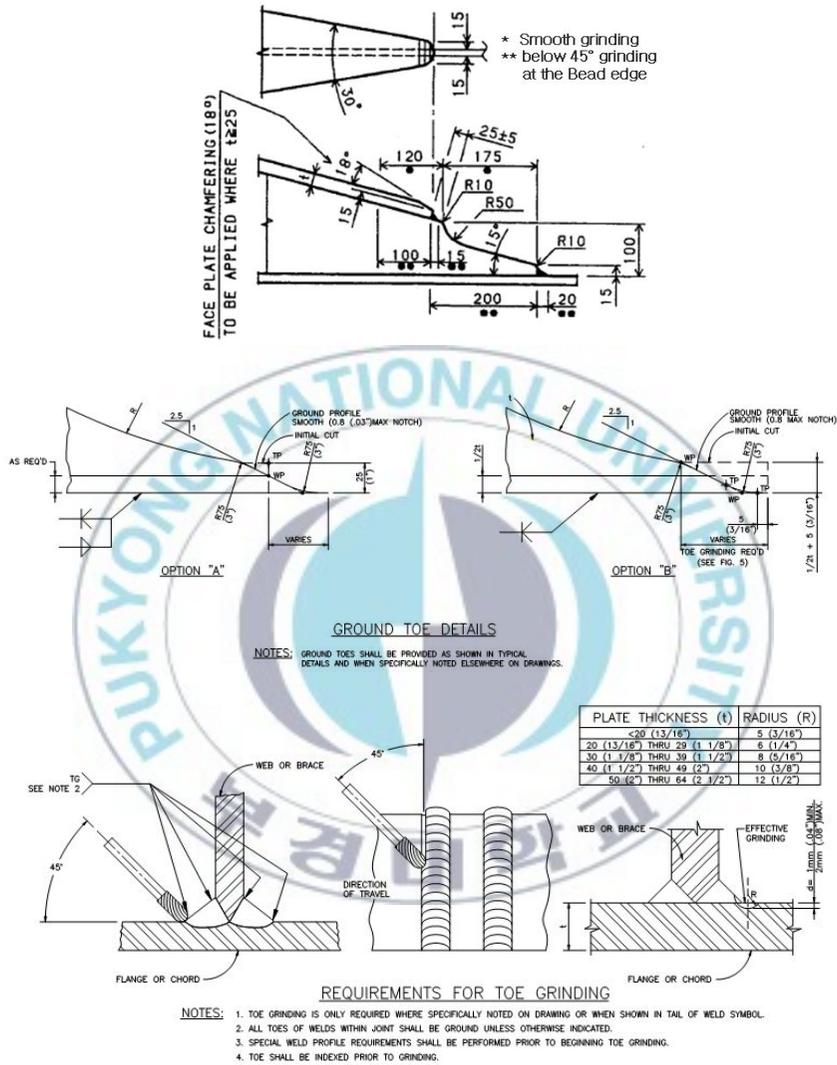


Fig. 4.11 Ground tow and tow grinding detail at the stress concentrated region

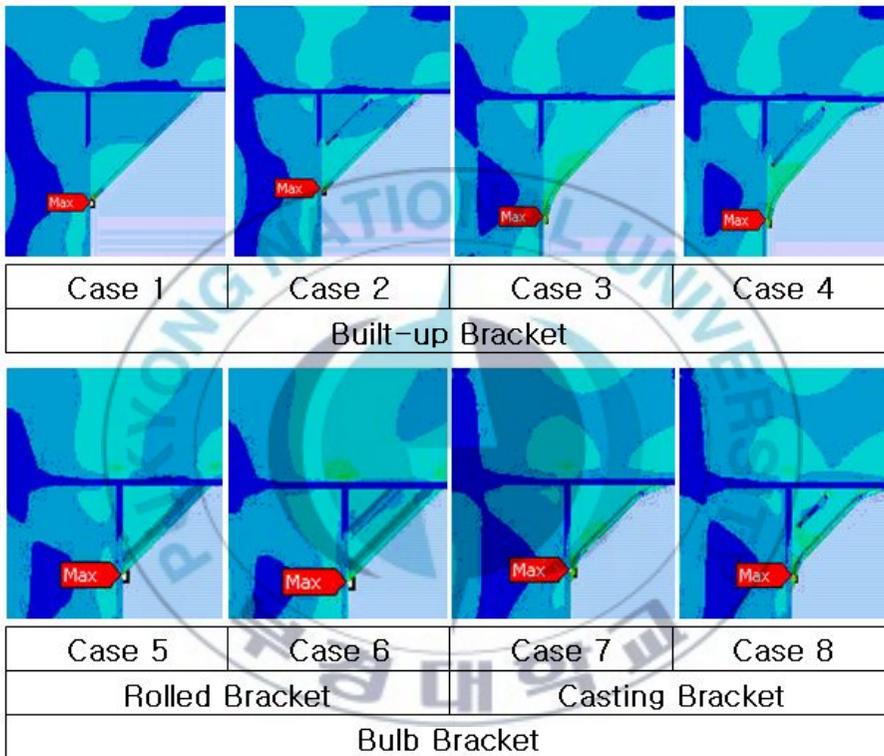


Fig. 4.12 Results of structural analysis for each cases of the built-up and bulb bracket



Fig. 4.13 Optimized results (proposed shapes) of structural analysis model for the bulb bracket (top : rolled type, bottom : casting type)



Fig. 4.14 Cutting plan for rolled type bulb bracket

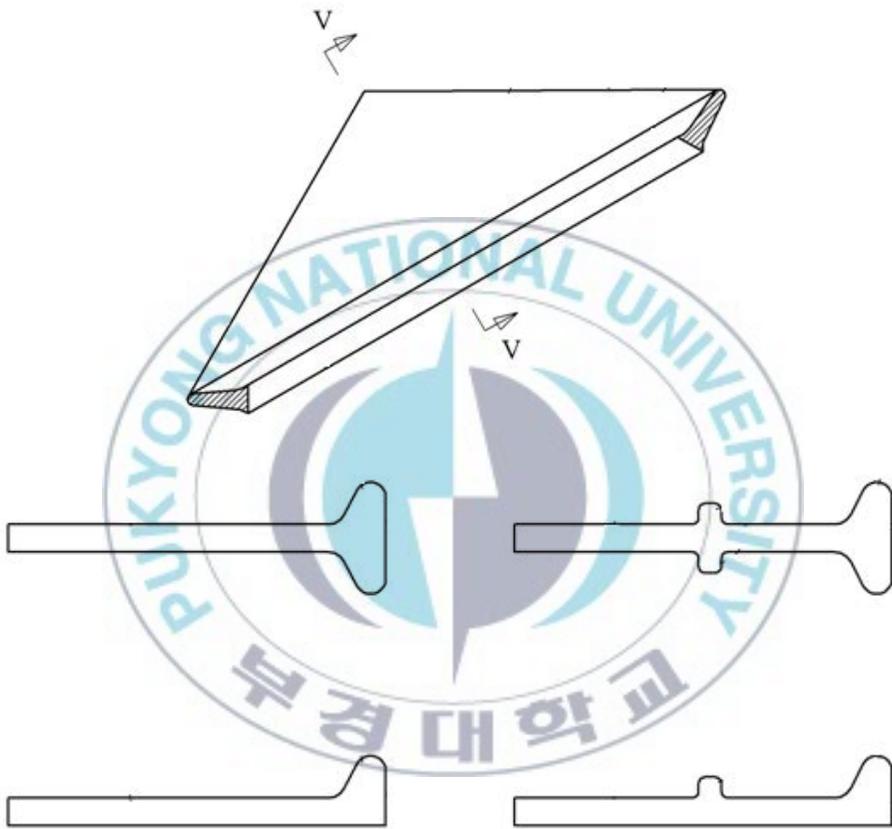


Fig. 4.15 Optional types of bulb design for the bulb bracket

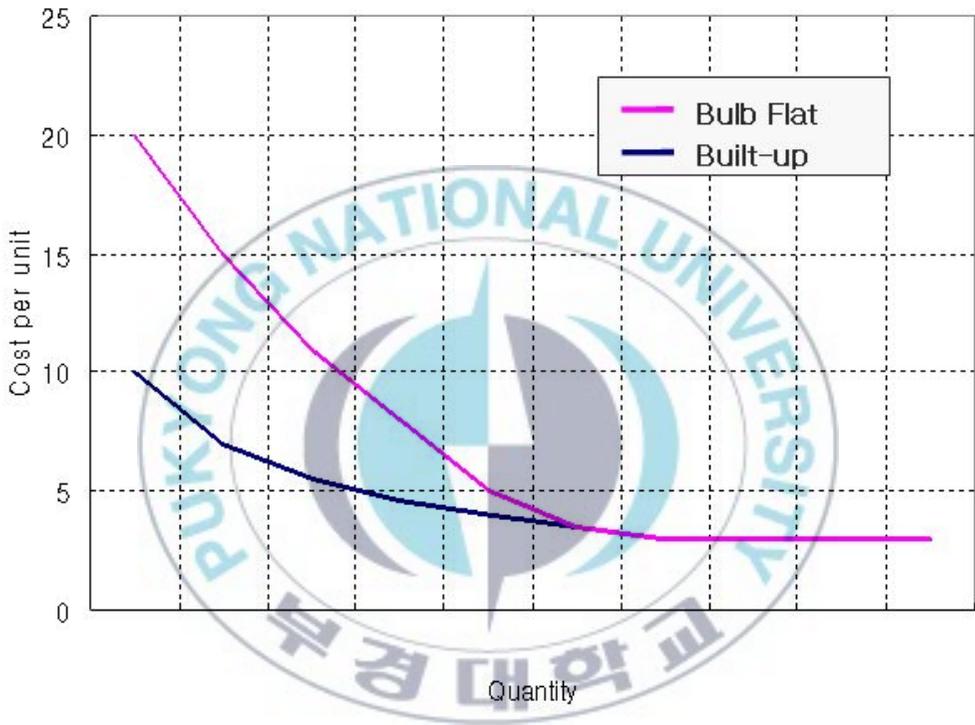


Fig. 4.16 Production cost comparison between built-up and bulb bracket

## V. 요약 및 결론

본 연구에서는 해양구조물의 3대 메가트렌드인 대형화와 심해 및  $-40^{\circ}\text{C}$  이하 극해로 대변되는 극한환경에 적극적으로 대응하고, 복합다기능화를 실현하기 위한 기반기술 확보를 위해 두 가지 연구가 수행되었다.

구체적으로는 해양구조물용 강으로 적합한 원천소재의 경우 저온( $-40^{\circ}\text{C}$ ), 저탄소(0.25% 이하), 고강도(Ref. 1 : 인장강도 550MPa 이상, 항복강도 355 MPa 이상, (Ref. 2 : 인장강도 620MPa 이상, 항복강도 430 MPa 이상)의 주조용 탄소강 소재를 얻기 위한 화학적 조성, 열처리 방법, 용접성능에 관한 표준 데이터를 확보하였다.

원천소재 개발이 완료된 후, 실재 주조용 특수 구조용 부품뿐만 아니라, 표준화된 신개념 보강재(Bracket)에 최적형상을 설계하고 여기에 개발된 원천소재를 적용함으로써, 구조물 내부의 장비 및 의장품의 설치를 위한 공간적 효율 향상이 가능함을 평가를 통해 확인하였다.

첫째, 해양구조물용 저온 고강도 저탄소 주강 소재개발을 시도하였으며, 최종 이에 대한 기계적, 화학적 조성에 대한 성능을 평가하였다. 해양구조물용 응력집중부에 사용되는 저탄소 저온 고강도 Casting steel 부품 소재개발을 위해 탄소함유량을 3가지 조건으로 나누어 시편을 확보하였고, 열처리 조건 변화에 따른 화학적 조성 및 기계적 성질의 비교를 통해 다음 결론을 얻었다.

(1) 개발소재는 탄소함유량 0.125%로 인장강도(600 MPa) 및 항복 강도(456 MPa)를 포함한 기계적 물성치가 우수하며  $-40^{\circ}\text{C}$ 에서의 충격시험값

70J을 얻음으로써 해양구조물용 주강재료로 적합한 수준인 것으로 나타났다.

(2) 열처리 조건에서 뜨임의 경우 580℃에서 5시간을 적용하였을 때 미세조직의 단면이 우수하고, 기계적 성질도 DNV-OS-B101의 NV 620 W에 능가할 정도의 우수한 것으로 밝혀졌다.

(3) 개발소재는 탄소당량(CE) 0.411, 용접균열감수성지수(Pcm) 0.231로 용접성능 요구조건(ASTM A751)인 각각 0.490, 0.250 이하를 충족하였다.

개발소재는 포항산업과학원(RIST)로부터 시험인증을 실시하여 목표수준에 도달하였음을 확인하였다. 또한 인장강도를 항복강도를 500MPa(인장강도 620MPa) 수준으로 향상시키고 저온취성을 더욱 강화하기 위해 화학적 조성에 있어 Mn과 Ni, Mo, Cr, V 등 미량원소의 성분조성에 대해 부분적으로 재조합하는 연구가 보완할 계획으로 있다.

다음으로 개발된 소재를 활용하여 엄격한 중량관리와 공간의 효율적인 사용을 강조하는 해양구조물에 있어 Bracket의 최적형상을 얻기 위해 판재가공 방법이 아닌 압연 또는 주조공정을 이용한 신개념 표준 구조보강재인 Bulb bracket 개발을 시도하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 여러 비교 케이스에 대한 구조해석 결과 Bracket의 최대응력 분포 점은 사선부 형상을 이중 원곡선으로 개선할 경우 중심점 근처로 이동하게 되어 효과적이며, Built-up의 경우 측면보강재를 면재 형태보다는 사면부에 근접 설치하는 것이 효과가 큼을 확인할 수 있었다. 현장에서는 응력집중이 큰 개소에서 면재를 사면부에 설치할 경우 용접비드에 Tow grinding 또는 Ground tow와 같은 후속조치를 적용하고 있다.

(2) 압연방식의 Bulb bracket은 Built-up bracket과 동일재질을 사용함에도 크기와 중량 감소 효과가 각각 약 40% 정도로 나타나 장비설치 효율을 대폭 높일 수 있으며, 대량생산방식 적용이 가능하기 때문에 높은 경제성을 기대된다.

(3) 주조방식을 통한 Bulb bracket 제작은 응력작용 분포특성에 맞추어 부재두께의 조절과 성형이 판재를 사용한 Built-up이나 압연 방식에 비해 매우 자유롭고 특히, 사선부에 타원 또는 이중의 원곡선을 적용할 수 있으며 주조용 고강도 소재를 적용할 경우 압연방식에 비해 크기에서 약 20%, 중량에서 약 50% 감소효과가 기대된다.

(4) 압연방식의 Bulb bracket 제작은 곡률을 반영한 형상 제작이 곤란하지만 돌기가 생성된 판재를 압연한 후 절단하는 방식으로 대량생산이 가능하며, 경제성 측면에서 매우 유리하다.

(5) 주조 및 압연 공법 모두 Bulb bracket의 면재를 포함한 복부판에 설치되는 돌기의 자유로운 형상과 삭제가 가능하기 때문에 하중분포 특성에 따라 필요할 시 이들이 반영된 bulb bracket 또한 재료비를 제외한 별도의 추가적인 비용 부담없이 생산할 수 있다.

이상의 연구결과들은 3개의 특허출원[9][43][44]을 완료하였으며, 각각의 성과들은 대한조선학회 논문집을 통해 성과가 요약 발표[45][46]되었다.

향후 이들 성과들은 해양구조물의 응력집중부에 사용되는 기존 구조용 보강재의 국산화 및 Bulb bracket의 상용화 개발을 위한 기본 자료로 활용될 계획으로 있다. 또한 개발된 원천소재는 잠수함을 비롯한 방위산업용과 원자력 등의 발전설비용 부품 소재로 활용하기 위해 필요한 기계적 물성치 및 미량원소에 대한 화학적 조성비, 열처리 조건 등을 부분적으로 응용, 보강해 나갈 예정이다.

# 발표실적 및 향후계획

## 1. 발표실적

- [1] 이수호, 한기형, 배재류, 김태원, 박상식, 강충길(2008) : “해양구조물용 저온 고강도 Casting Steel 소재 개발”, 대한조선학회 논문집, Vol.45, No.4, pp 425-430.
- [2] 이종훈, 이수호, 배재류, 김태원, 박상식, 김윤석, 강충길(2008) : “주조 공법을 이용한 해양구조물용 Bracket 개발”, 2008 한국해양과학기술협의회 공동학술대회.
- [3] 김윤석, 박상식, 김태원, 이수호, 배재류(2008) : “구조물의 모서리 보강부재와 그 제조방법 및 시공방법”, 대한민국 특허청, 출원번호 10-2008-19468.
- [4] 김태원, 박상식, 김윤석, 강충길, 배재류, 이수호(2008) : “저온 저탄소강 소재 및 제조방법”, 대한민국 특허청, 출원번호 10-2008-39726.
- [5] 이수호, 배재류, 김주열, 조규순, 윤창해(2008) : “선박 및 해양구조물의 보강재”, 대한민국 특허청, 출원번호 10-2008-93955.

## 2. 향후계획

- (1) TS = 620MPa YS = 500MPa 이상 소재 개발
- (2) 저온 저탄소 고강도강을 활용한 해양구조물 부품 상용화 개발
- (3) 발전설비 및 방위산업용 적용성 확인

## 참고문헌

- [1] Lee, S.M.(2007) : “Current Status of Worldwide Casting Industry and Industry Prospects of Each Country”, Journal of the Korean Foundrymen’s Society, Vol. 27, No. 3, pp. 101-116.
- [2] Michael F.A. and David R.H. Jones(1992) : “Engineering Materials 2, Oxford, Pergamon Press”.
- [3] Park, S.G.(2006) : “Optimizing Design For Rudder Horn, Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea”, pp. 77-80.
- [4] 주식회사 포스코(2004) : “고장력 극저탄소강의 정련 방법”, 출원번호 10-2004-0116124, 대한민국 특허청.
- [5] DNV(2001) : “Metallic Materials Offshore Standard DNV-OS-B101”, pp. 31-34.
- [6] 엘에스전선(주)(1984) : “고장력 내마모 주강 주조재”, 특허출원번호 10-1984-0005221, 대한민국 특허청.
- [7] 특허정보원(2007) : “해양구조물용 저온고강도 CASTING STEEL 특허분석 보고서”.
- [8] Katsuragi and Nonomura, Ojiro, Izutsu(2007) : “Casting Steel Having High Strength and Low Thermal Expansion”, EP 1 589 123 A1.
- [9] 이수호, 배재류, 김주열, 조규순, 윤창해(2008) : “선박 및 해양구조물의 보강재”, 대한민국 특허청, 출원번호 10-2008-93955.
- [10] 이수호, 박창수, 길상석, 이중섭, 정휘원, 장성철, 김태형, 이현식 (2008) : “해양구조물용 고압콘트롤 밸브-유동특성 및 구조해석-”, 대한조선학회 춘계 학술대회.

- [11] 이수호.(2008) : “조선해양공학 용어해설”, 한국조선기자재연구원, pp.42.
- [12] Lee, J.S., Lee, D.B., Han, D.H.(2006) : “On the Design of the Brackets without Flange in Ship’s Structure”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 2, pp. 197-205.
- [13] Lee, J.H., Shin, S.H., Kim, D.H. and Kwon, J.C(2004) : “A Study on Size Optimization of the Big Bracket in the Cargo Hold of Crude Oil Tanker”, Proceeding of the Annual Autumn Meeting, Society of Naval Architects of Korea, pp. 852-856.
- [14] Kim, M.S., Seo, I.S., Oh, S.J.(2003) : “The Study of the Elimination of the Big Bracket in the Cargo Holds of Crude Oil Tanker”, TEAM 2003 Conference Proceedings.
- [15] International Maritime Associates, INC(2008) : “Floating Production Systems”, Washington DC USA.
- [16] 이수호 외(2007) : “해양구조물 산업동향 및 특허기술분석”, 한국조선협회.
- [17] 한국산업기술평가원(2005) : “차세대 부유식 해양구조물”.
- [18] International Maritime Associates, INC(2007) : “Floating Production Systems”, Washington DC USA.
- [19] 이수호 외(2007) : “2007 통합기술로드맵-조선해양산업”, 지식경제부.
- [20] 이수호, 배상은, 배재류(2007) : “해양구조물의 개발 동향 및 분류 체계”, 대한조선학회 춘계 학술대회.
- [21] 이수호, 배재류(2008) : “세계 최대 Agbami FPSO Project”, 전산구조공학 제21권 제1호, pp.7-10.
- [22] Bang, H.S., Kim, S.J., Kim, J.M., Jang, W.S. and Kwon, Y.S.(1999)

- : "A Study of Lamella Tearing Being Produced by Corner Joint Welding in Box Column of Ultra Thick Plate", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 4, pp. 95-104.
- [23] 이수호, 배재류(2008) : "잠수함용 수평타 기능을 겸비한 포드 추진장치", 대한민국 특허청, 등록번호 10-2008-52538.
- [24] 이수호, 배재류(2008) : "잠수함용 방향타 기능을 겸비한 포드 추진장치", 대한민국 특허청, 등록번호 10-2008-52535.
- [25] 이수호, 배재류, 추교식(2008) : "연료유 공급선 기능을 겸하는 해저 채굴자원 수송선", 대한민국 특허청, 등록번호 10-2008-21743.
- [26] 이수호, 배재류, 추교식(2008) : "해저 광물자원 채광선의 채굴자원 처리방법", 대한민국 특허청, 등록번호 10-2007-96065.
- [27] 이수호.(2008) : "선박 설계 및 건조 실무 해설", 전남대학교 조선해양공학과 특강자료.
- [28] 이수호, 배재류(2008) : "해양구조물 기자재 국산화 개발 방향", 한국조선기자재공업협동조합회보.
- [29] 한국표준협회(1995) : "KS 저온 고압용 주강품(KS D 4111).
- [30] 두산중공업(주)(1989) : "저온용 주강품 및 그 제조방법", 특허출원번호 10-1989-0002010, 대한민국 특허청.
- [31] 최갑송, 이학주, 정해룡(2007) : "핵심 재료공학", 두양사.
- [32] 이영만 외(2005) : "선박구조설계", 대우조선해양(주).
- [33] 이상윤, 김한균, 김학윤, 구자명, 조정웅, 송광호(2007) : "열처리공학", 원창출판사.
- [34] 김학신(2001) : "금속열처리", 피어슨에듀케이션코리아.
- [35] 김정근, 박해용(2000) : "강의 열처리 공정기술", 도서출판 골드.
- [36] ASM(2006) : "ASM Handbook\_Volune 4 Heat Treating", ASM

International. Handbook Committee, USA.

- [37] 송광호, 양형렬, 김형철, 박인선, 김효준, 강신철(2007) : “기계금속재료”, 도서출판 보문당.
- [38] 김하영, 박해덕, 홍영환(1991) : “열처리의 기초(I), 원창출판사.
- [39] 김문일(2007), “금속조직학”, 도서출판 보문당.
- [40] Thaddeus B.M., Joanne L.M., Lawrence H.B., Hugh B.(1986) : “Binary Alloy Phase Diagrams”, American Society For Metals.
- [41] 대한용접학회(1998) : “용접집합편람”.
- [42] 이수호, 신면섭, 서동식, 최열, 김영민, 백승돈, 한용식((2004) : “상선, 해양구조물 및 잠수함의 설계과정에 대한 비교”, DSME Engineering Review, Vol. 59, pp.55-68.
- [43] 김태원, 박상식, 김윤석, 강충길, 배재류, 이수호(2008) : “저온 고강도 저탄소강 소재 및 제조방법”, 대한민국 특허청, 출원번호 10-2008-39726.
- [44] 김윤석, 박상식, 김태원, 이수호, 배재류(2008) : “구조물의 모서리 보강부재와 그 제조방법 및 시공방법”, 대한민국 특허청, 출원번호 10-2008-19468.
- [45] 이종훈, 이수호, 배재류, 김태원, 박상식, 김윤석, 강충길(2008) : “주조공법을 이용한 해양구조물용 Bracket 개발”, 2008 한국해양과학기술협의회 공동학술대회.
- [46] 이수호, 한기형, 배재류, 김태원, 박상식, 강충길(2008) : “해양구조물용 저온 고강도 Casting Steel 소재 개발”, 대한조선학회 논문집, Vol. 45, No. 4, pp. 425-430.

# Appendix I

## A Specification of the HSLA Carbon Casting Steel

### Table of Contents

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1.0 | Scope and General .....                             | 124 |
| 2.0 | Process Of Manufacture and Chemical Composition ..  | 127 |
| 3.0 | Chemical Properties and Tests .....                 | 130 |
| 4.0 | Heat Treatment .....                                | 130 |
| 5.0 | Qualification Test Sample (QTS) .....               | 133 |
| 6.0 | Mechanical Properties and Tests .....               | 134 |
| 7.0 | Repair Welding .....                                | 138 |
| 8.0 | Non-Destructive Examination (NDE) of Castings ..... | 155 |
| 9.0 | Documentation Package .....                         | 157 |

## 1.0 Scope and General

1.1 This document defines buyer's minimum requirements for the manufacture, testing, and inspection of High Strength Low Alloy Steel Castings in the 355 ~ 620 N/mm<sup>2</sup> specified minimum yield strength (SMYS) range for use in the fabrication of offshore structures or manufacturer of marine equipment as invoked by the Request for Proposal/Quote (RFP/Q), Purchase Order (PO), Construction drawings (AFC drawings). The requirements of DNV-OS-B101 Sec.4 Steel Casting shall be applied for the classification society approval.

### 1.2 Lowest Anticipated Service Temperature (LAST)

The Lowest Anticipated Service Temperature (LAST) shall be 0°C for submerged components and -20°C for components exposed to the atmosphere.

1.3 This document supplements buyer specifications which govern the overall fabrication of offshore structures and manufacture of marine equipment. Unless specifically deleted/waived by this document, all provisions of the applicable buyer specifications shall apply, including the requirement for development and implementation of a quality assurance system. The quality assurance system shall be in compliance with any one of the following:

- a. API Q1
- b. ISO 9001 or ISO 9002
- c. ASME Section VIII - Division 1 - Appendix 10,  
ASME Section VIII - Division 2 - Appendix 18, or  
ASME Section III - NCA 3800

1.4 SMYS, LAST (if different than the default value given in this document, reference Section 1.2), service category (reference

Section 1.6), required Charpy V-notch (CVN) absorbed energy for base-metal (if different than the default values given in Section 6.3.2), required CVN absorbed energy for repair weld procedure qualification (if different than the default values given in Section 7.7.4.7), critical sections for mechanical properties, structural weld thicknesses, and critical regions for Non-Destructive Examination (NDE) will be specified on the AFC drawing. Specific or proprietary chemical compositions may also be specified in the RFP/Q or PO or on the AFC drawings in order to restrict or augment the designations in Section 2.3.

1.5 The fabrication contractor or marine equipment Manufacturer, as applicable, may either use this document directly, with specific requirements addressed in the PO to the casting manufacturer, or he may prepare a detailed materials specification which is compatible with his specification format and Quality assurance system. The materials specification shall include all of the requirements contained herein as well as specific chemical composition ranges, documentation, testing, and other requirements. The fabrication contractor or marine equipment manufacturer shall obtain buyer approval of the materials specification and any subsequent revisions. buyer will treat the fabrication contractor's or marine equipment manufacturer's material specification as confidential. The casting manufacturer and all facilities utilized in the casting manufacturing process shall be approved by buyer. In the event that buyer contracts directly with the casting manufacturer for the supply of castings, then the casting manufacturer shall fulfill all the functions defined for the fabrication contractor or marine equipment manufacturer in this document.

1.6 Service categories are defined as follows:

Service category A: Not intended to contain, or form part of,

structural weldments, other than repair welds.

Service category B: Intended to contain, or form part of, structural weldments.

- 1.7 Critical sections for mechanical properties (generally those with the highest service stresses), critical regions for NDE, and structural weld thicknesses, if applicable, will be designated on the AFC drawings. If buyer contracts with the fabrication contractor or marine equipment Manufacturer for the design and/or procurement of castings, then the primary responsibility for designating critical sections for mechanical properties, critical regions for NDE, and structural weld thicknesses lies with the fabrication contractor or marine equipment Manufacturer, however, buyer approval is required. In the case where buyer contracts directly with the casting Manufacturer for the supply of castings, the buyer will designate critical sections for mechanical properties, critical regions for NDE, and structural weld thicknesses on the AFC drawings.
- 1.8 Castings shall be manufactured and tested in accordance with the general requirements of ASTM A703-89 Standard specification for Steel Castings, General Requirements for Pressure Containing Parts (hereafter referred to as ASTM A703). Modifications to the above specification deletions or identifications of non-applicable parts are given herein. Unless specifically deleted/waived by this document, all provisions of ASTM A703 shall apply. Some statements and/or required values in ASTM A703 may be repeated in this document for clarity or special emphasis.
- 1.9 Full traceability of castings and Qualification Test Samples (QTS's) relative to heat and heat treat lot, as applicable, shall be maintained.

- 1.10 An authorized signature shall be required on all certifications.
- 1.11 Unless specifically stated in the RFP/Q or PO or on the AFC drawings, hydrostatic testing is not required.
- 1.12 The product marking requirements of ASTM A703 Paragraph 17 shall be applied except that a raised pad is not required. The serial number shall be traceable to the heat number, heat treat lot number, PO number, and pattern number.
- 1.13 Prior to the start of manufacturing, a Preproduction meeting shall be held at the Manufacturer facilities. All aspects of the Purchase Order and the Material specification for the castings ordered shall be discussed and agreed upon.

## **2.0 Process of Manufacture and Chemical Composition**

- 2.1 Steel shall be made by the basis electric arc furnace practice followed by either vacuum degassing (VD) or argon oxygen decarburization (AOD).  
Process of manufacture shall be satisfied with the manufacture requirements of DNV-OS-B101, Sec.4.
- 2.2 Steel shall be fully killed prior to casting.

## **2.3 Chemical Composition**

Chemical composition in below category shall be satisfied the requirements of the table B1 of DNV-OS-B101, Sec.4.

- 2.3.1 Chemical composition shall conform to one of the following, as applicable for the specified service category A or B, unless otherwise specified:

Service category A

|                       |   |
|-----------------------|---|
| ASTM                  | A487 Grade 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, or 13                              |
| Sheffield Forgemaster | CSN 355 <sup>(1)</sup> , CSN 500 <sup>(1)</sup>                       |
| Georg Fischer         | M3N2DV50 <sup>(1)</sup>   |
| Lokomo                | OS-340 <sup>(1)</sup> , OS-540 <sup>(1)</sup> , OS-590 <sup>(1)</sup> |
| Atlas                 | Alloy 804 <sup>(1)</sup> , Alloy 806 <sup>(1)</sup>                   |
| ○○○(Korea)            | □□□ <sup>(2)</sup>  |

Service category B

|                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| Sheffield Forgemaster | CSN 355(1), CSN500(1)      |
| Georg Fischer         | M3N2DV50(1)                |
| Lokomo                | OS-340(1), OS-540(1)       |
| Atlas                 | Alloy 804(1), Alloy 806(1) |
| ○○○(Korea)            | △△△ <sup>(2)</sup>         |

Note: 1. These compositions are proprietary to the foundries listed.

Note: 2. These items will be supplied by the new mill.

2.3.2 The chemical compositions listed above are not necessarily equivalent and selection of a specific composition shall take into consideration the specific application as well as the ability of the composition to meet specified requirements in the SMYS and critical section thickness combinations required. Other chemical composition specifications or proprietary compositions considered suitable will be stated in the RFP/Q or PO, or on the AFC drawings, as applicable. The chemical composition specification and allowable elemental ranges selected shall be approved by buyer.

2.3.3 Only those elements specified by the chemical composition specifications given in Section 2.3.1 shall be added and any element specifically limited by the chemical composition

specification or intentionally added shall be reported. For service category B, nitrogen, aluminum, niobium, and titanium shall be reported in addition to those elements included in the IIW Carbon Equivalent (CE) or Ito-Bessyo Composition Parameter (Pcm) equations given in Section 2.3.5.

2.3.4 Specific deviations or modifications to the chemical composition ranges of the specifications listed above shall be described in the materials specification and shall be approved by buyer. Unless more restrictive ranges are required by the chemical composition specifications referenced above, the following elemental limits shall apply to the heat analysis:

| Element | Weight Percent (max.) |
|---------|-----------------------|
| C       | 0.200                 |
| S       | 0.500                 |
| Mn      | 1.400                 |
| P       | 0.015                 |
| S       | 0.007                 |
| Cu      | 0.200                 |
| Cr      | min. 0.200            |
| Ni      | 1.000                 |
| Mo      | 0.150~0.450           |
| V       | 0.050                 |
| Al      | 0.050                 |
| N       | 0.009                 |
| Nb      | 0.040                 |
| B       | 0.0005                |
| Ti      | 0.050                 |
| W/Sn    | 0.015                 |

Note: Values listed for Ti, V, Nb, and Nb+V are maximum allowables for intentional additions, residual levels shall be limited to 0.010 weight percent maximum, each.

2.3.5 The CE and the Pcm, based on final heat analysis, shall

conform to the limits specified in Table 2.3.5 for steels intended for service category B. CE and Pcm shall be calculated utilizing the equations given below:

$$CE = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

$$P_{cm} = C + (Si/30) + [(Mn + Cu + Cr)/20] + (Ni/60) + (Mo/15) + (V/10) + (5B)$$

### 3.0 Chemical Properties and Tests

The final heat analysis for each heat of steel shall be included in the documentation package. CE and Pcm shall be calculated for the final heat analysis of steels for use in service category B and shall be reported in the documentation package for each heat.

### 4.0 Heat Treatment

4.1 Heat Treatment shall be performed in accordance with the DNV-OS-B101 Chapter 2, Sec.4.

4.2 Quality heat-treatment shall be defined as the collective sequence of heat-treatments performed to achieve final properties, including the final austenitization, quench from final austenitization (if applicable), tempering or ageing, and quenching (if applicable) from tempering or ageing.

4.3 Heat treatment process control requirements for quality heat-treatment and post weld heat treatment (PWHT) after repair welding, if applicable, shall be fulfilled by the selection and adherence to any one of the options listed below.

4.3.1 Quality heat-treatment and PWHT of castings and QTS's

conducted in furnaces meeting the requirements of MIL-H-6875G (US Military Standards).

- 4.3.2 Quality heat-treatment and PWHT of castings and QTS's conducted in furnaces meeting the requirements of MIL-STD-1684A except that the furnace uniformity tolerance for tempering or ageing is limited to plus or minus 25°C.
- 4.3.3 Quality heat-treatment and PWHT of castings and QTS's in furnaces meeting the requirements of British Standard M54:1982 Category B for austenitizing and PWHT and Category A for tempering or ageing.
- 4.3.4 Quality heat-treatment and PWHT of castings and QTS's in furnaces meeting the requirements of AMS-2750 except that the furnace uniformity tolerance for tempering or ageing is limited to plus or minus 25°C.
- 4.3.5 Quality heat-treatment and PWHT of castings and QTS's in furnaces with load thermocouples attached to all castings and QTS's. All castings and QTS's shall be maintained at the selected temperatures plus or minus 30°C for quality heat-treatment and PWHT. QTS temperature shall be within -10°C of all castings they are to represent for tempering or ageing.

If it has been demonstrated to buyer's satisfaction that the alloy to be tempered or aged has a relatively flat mechanical properties vs. tempering or ageing temperature response curve and can, therefore, tolerate a wider temperature range than the -10°C tolerance between QTS's and castings for tempering or ageing, then a wider furnace uniformity tolerance or casting and QTS thermocouple reading tolerance, up to plus or minus 30°C maximum, may be approved by buyer.

- 4.4 Quenching equipment, if applicable, shall be located in such a

manner, and handling facilities shall function with sufficient speed, to prevent the castings and QTS's from dropping below the Ar<sub>3</sub> temperature for the alloy prior to immersion in the quench medium. In addition, quenching facilities shall have sufficient agitation and be of sufficient volume such that the following are ensured:

- 4.4.1 If water or water-based (i.e. polymer) quenching is required by the Materials specification, then the temperature of the water or water-based quench medium shall not exceed 35°C at the start of the quench, nor exceed 50°C at any time during the quench. Additionally, castings and QTS's shall not be removed from the quench medium until they have cooled to below 20 0°C, unless otherwise specified in the buyer PPROVED Materials specification.
- 4.4.2 If oil-based quenching is required by the Materials specification, then the temperature of the oil-based quench medium shall be between 15°C and 70°C at the start of the quench and shall not exceed 30°C at any time during the quench. Additionally, castings and QTS's shall not be removed from the quench medium until they have cooled to below 20 0°C, unless otherwise specified in the buyer approved materials specification.
- 4.5 Heat-treatment furnace records or charts shall be maintained showing time and temperature for all heat-treatment operations, including PWHT. These records or charts shall be available for review by the buyer representative and copies shall be provided, when requested.
- 4.6 Heat-treatment temperature and cycle times, furnace identification, and quench facility (tank) identification, if applicable, as well as a description of the methods of cooling, shall be stated in the documentation package for each heat and heat treat lot for all heat treatment cycles, including PWHT.

## 5.0 Qualification Test Sample (QTS)

- 5.1 A QTS shall be utilized to qualify the mechanical properties of all castings on a heat treat lot basis.
- 5.2 QTS's shall conform to the test block requirements of ASTM A703 Supplementary Requirement S26 except that the thickness, T, upon which the dimensions of the QTS are based, shall be defined as the diameter of the largest circle that can be inscribed within the critical section for mechanical properties or the structural weld thickness, as applicable, at quantity heat-treatment. If more than one critical section for mechanical properties has been identified for the casting on the AFC drawings, then the thickest critical section for mechanical properties shall be used as the basis for defining QTS size requirements. If more than one structural weld thickness has been identified for service category B castings on the AFC drawings, then the thickest structural weld thickness shall be used as the basis for defining QTS size requirements. If both critical sections for mechanical properties and structural weld thicknesses have been identified for service category B castings, then one of the following options shall be adhered to: Option 1) one QTS based on the maximum thickness based on the maximum thickness determined above; or Option 2) two QTS's, one with a thickness based on the maximum critical section for mechanical properties and one with a thickness based on the maximum structural weld thickness; or Option 3) a stepped QTS containing thicknesses based on both the maximum critical section for mechanical properties and maximum structural weld thickness. In any case, QTS configuration and dimensions shall be approved by buyer and fully described in the documentation package.
- 5.3 QTS's shall accompany the castings they represent through all heat-treatment cycles, except that QTS's are not required to accompany the castings they represent during PWHT.

- 5.4 For QTS's cast integral to castings, partial severing shall be employed as necessary so that final removal is by mechanical means only.

## 6.0 Mechanical Properties and Tests

Mechanical properties and tests shall be satisfied the requirements of mechanical properties and tests on the DNV-OS-B101, Chapter 2 Sec.4.

### 6.1 Tensile Tests

- 6.1.1 One set of two tensile tests shall be obtained from the QTS after quality heat-treatment, excluding PWHT. Tensile test specimens shall be standard 12.7mm round tension test specimens per ASTM E8-86. Tensile test specimens shall be extracted from within the QTS such that the longitudinal centerline of all specimens fall within  $\frac{1}{4} \times T_f$  of the longitudinal centerline of the T dimension thickness of the QTS, where T is defined as in Section 5.2 and  $T_f$  is defined as the finish machined thickness across the designated critical section for mechanical properties or structural weld, as applicable, of the casting. Additionally, the entire gage length of all specimens shall be at least 1T from any other heat-treated surface.
- 6.1.2 Test results shall comply with the requirements of Table 6.1.2 for the applicable SMYS. For SMYS not listed in Table 6.1.2 but within the ranges given, linear interpolation is acceptable for the determination of minimum and maximum yield strength and minimum ultimate tensile strength requirements. If the results from only one of the specimens fail to meet the specified requirements but are no more than 6.9MPa below the required minimum yield strength, no more than 6.9MPa above

the maximum allowed yield strength, no more than 13.8MPa below the required minimum tensile strength, and no more than two percentage units below the required minimum elongation or reduction in area, then two additional specimens may be extracted from material immediately adjacent to the failed specimen, but still fulfilling the specimen extraction location requirements specified in Section 6.1.1., and retested as above. Results from both the additional specimens shall meet the requirements of Table 6.1.2 for acceptance.

6.1.3 Results of all tensile tests shall be included in the documentation package for each heat treat lot.

## 6.2 Hardness Tests

6.2.1 Brinell Hardness determinations in accordance with ASTM E10-84 shall be made neat as practicable to the center of at least three of the original cast surfaces of QTS's and at locations specified for the castings on the AFC drawings after quality heat-treatment, excluding PWHT. If Brinell Hardness testing in accordance with ASTM E10-84 is impracticable, then portable Brinell Hardness testing in accordance with ASTM E110-82 may be approved by buyer. Other portable hardness measurement methods may be utilized when approved by buyer. The average Hardness units of the average Brinell Hardness units of the average Brinell Hardness of each casting they are to represent.

6.2.2 Each Brinell Hardness determined in Section 6.2.1 on castings shall comply with the range specified in Table 6.1.2 for the applicable SMYS. For SMYS not listed in Table 6.1.2 but within the ranges given, linear interpolation is acceptable for the determination of minimum and maximum Brinell Hardness requirements. In the event that a casting does not exhibit the required minimum hardness level, the casting may be considered to have an acceptable hardness if the measured

value equals or exceeds the value given by the following equation:

$$HB_{\text{cast}} = (UTS_{\text{req}}/UTS_{\text{qts}}) \times HB_{\text{qts}}$$

where:

HB cast = minimum acceptable Brinell Hardness for castings

UTSreq = minimum required ultimate tensile strength for the applicable SMYS

UTSqts = average ultimate tensile strength determined by tensile specimens extracted and tested from the QTS

HBqts = average Brinell Hardness determined on the QTS surface as discussed in Section 6.2.1

6.2.3 If PWHT has been employed after repair welding, castings shall be retested for compliance with Brinell Hardness criteria at locations specified on the AFC drawings. Brinell Hardness thus determined shall comply with Table 6.1.2 for the applicable SMYS or the equation given in Section 6.2.2 of this document.

6.2.4 Results of all hardness determinations, including failures, shall be reported in the documentation package.

### 6.3 Charpy Impact Tests

6.3.1 Three standard Type A Charpy V-notch (CVN) impact test specimens shall be extracted from the QTS after quality heat-treatment, excluding PWHT, and tested in accordance with ASTM E23-88. Specimen extraction locations within the QTS shall comply with the same requirements as the tensile specimens. Test temperature for the CVN tests shall be lower than or equal to minus  $-40^{\circ}\text{C}$ .

6.3.2 Unless otherwise specified, test results shall meet the

requirements of Table 6.3.2(A) or (B), as applicable, for the specified SMYS, service category, and critical section for mechanical properties thickness or structural weld thickness. In the case where critical sections for mechanical properties and structural weld thicknesses have been identified but only one QTS has been produced (reference Section 5.2 - Option 1) then Table 6.3.2(A) shall be used to define CVN requirements for the critical section for mechanical properties and Table 6.3.2(B) shall be used to define CVN requirements for the structural weld thickness and the more stringent of the two shall then be used as the CVN requirement for the QTS. In the case where two QTS's (Option 3 of Section 5.2) have been utilized in order to represent critical sections for mechanical properties and structural weld thicknesses, then CVN requirements for the QTS or portion of the QTS corresponding to the critical section for mechanical properties shall be determined from Table 6.3.2(A) and CVN requirements for the QTS or portion of the QTS corresponding to the structural weld shall be determined from Table 6.3.2(B). For SMYS or thicknesses not listed in Table 6.3.2(A) or (B), as applicable, but within the values given, linear interpolation is acceptable for the determination of the minimum absorbed energy requirements. In addition to the absorbed energy requirements given in Tables 6.3.2(A) and (B), CVN specimens shall display greater than or equal to 50 percent ductile fracture appearance. If the absorbed energy result from only one specimen from a set fails to meet specified requirements but is no less than 0.67 times the required minimum values, or if the ductile fracture appearance from only one specimen from a set fails to meet the 50 percent ductile fracture appearance criterion, then three additional specimens may be extracted from material immediately adjacent to the failed specimen, but still fulfilling the specified specimen extraction location requirements, and retested in accordance with Section 6.3.1. Test results from additional specimens shall meet specified requirements for acceptance.

6.3.3 All CVN absorbed energy and fracture appearance results, including failures, shall be provided in the documentation package.

6.4 Drop-Weight (Pellini) Tests

6.4.1 Two standard P-3 Type Drop-Weight Test (DWT) specimens shall be extracted from the QTS after quality heat-treatment, excluding PWHT, and tested in accordance with ASTM E208-87a. Test temperature shall be lower than or equal to LAST. Both specimens shall exhibit “no break” performance. If only one of the two specimens exhibits “break” performance, then material immediately adjacent to the failed specimen and retested as above. Both retest specimens shall exhibit “no break” performance for acceptance.

6.4.2 Results of all DWT tests, including failures, shall be included in the documentation package.

## **7.0 Repair Welding**

7.1 All repair welding and qualification of repair welding procedures, welders, and operators shall be in compliance with ASME Section IX - Welding and Brazing Qualifications or AWS D1.1-98 Structural Welding Code - Steel or DNV-OS-C401 and DNV-OS-B101 with modifications/clarifications as defined by this Section.

More detailed and special NDE shall be required for the critical part of casting based on design drawings.

7.2 Weld repair processes shall be limited to SAW, SMAW, FCAW (gas-shielded only), or GTAW.

### 7.3 Identification

7.3.1 A system of identification for each welder and welding operator shall be established. The identification shall be unique to an individual and shall not be transferred for the duration of the work. The identification system shall provide assurance that each welder and welding operator is qualified to perform the particular repair welding operation to which he is assigned. The identification systems shall be approved by buyer.

7.3.2 Each welder and welding operator shall present identification upon request by the buyer representative.

### 7.4 Welder Qualification

Records of welder and welding operator qualification test results shall be submitted to the buyer representative upon request.

### 7.5 Welding Consumables

7.5.1 Low hydrogen consumables, as specified in Table 7.5.1, are required for repair welding.

7.5.2 For the purpose of this document, a production lot of welding consumables shall be defined as follows:

7.5.2.1 SAW Fluxes: a production lot shall consist of all flux of one type offered for delivery at one time.

7.5.2.2 SMAW Electrodes: a production lot shall consist of all electrodes manufactured from one heat of core wire with the same flux formulation applied throughout production using chemically analyzed and controlled materials.

7.5.2.3 FCAW Electrodes: a production lot shall consist of all

quantities produced from chemically analyzed and controlled batches of core filler materials and chemically analyzed and controlled mill coils, not to exceed 45tons of electrodes.

7.5.2.4 SAW and GTAW bare solid electrodes: a production lot shall consist of the quantity produced from a single heat of metal.

7.5.3 Each production lot of welding consumables shall have its deposited weld-metal chemical composition, as-deposited mechanical properties, and average diffusible hydrogen level shall be determined and reported as the average of four tests in accordance with AWS A4.3-92.

7.5.4 Average diffusible hydrogen levels in deposited weld-metal higher than those specified in Table 7.5.1 may be permitted if procedure qualification testing includes controlled thermal severity (CTS) testing in accordance with British Standards Institute BS 7363:1990 (BS 7363) (reference Section 7.7.6 of this document) which shows that the particular base-metal/consumable/preheat/heat input combination is not susceptible to delayed cracking at the lowest preheat, lowest heat input, and highest weld-metal average diffusible hydrogen level to be permitted by the WPS.

7.5.5 The casting Manufacturer shall submit a consumable storage and handling plan for buyer review and approval which will ensure that low hydrogen characteristics specified for consumables will be maintained. buyer may audit consumable storage and handling for compliance with the approved plan at any time. This audit may include sampling of consumables and testing for compliance with deposited weld-metal diffusible hydrogen level requirements, at buyer's expense.

7.6 Welding Procedure specification (WPS)

7.6.1 Conditions under which repair welding is to be performed shall

be limited to those described in a buyer approved WPS, which shall include written documentation of allowable ranges for all welding parameters and shall cover all essential variables for the welding process. The test results shall be included in the Procedure Qualification Record (PQR) and shall be submitted to buyer for approval.

- 7.6.2 Joint details for repair welds, including minimum depth, minimum root radius, and minimum length for excavated cavities, shall be shown on the WPS.
- 7.6.3 A WPS written with more than one supporting PQR shall not permit optional processes, but shall uniquely specify the process for each pass.
- 7.6.4 buyer approved WPS's shall be readily available to each welder, welding operator, and the buyer representative.
- 7.6.5 The WPS shall include the following, as applicable:
- a. AWS or ASME and DNV base-metal steel class
  - b. Base-metal chemical composition specification
  - c. Thickness range
  - d. Joint detail and excavated cavity dimensions and tolerances
  - e. Welding position(s)
  - f. Electrode, flux, consumable manufacturer and trade-name
  - g. AWS or ASME and DNV welding consumable classification
  - h. Size of electrodes, voltage, current, travel speed, and heat input for each pass
  - i. Shielding gas mixture
  - j. Bead width and pass sequence (bead map) for welds not receiving PWHT
  - k. Depth of backgouging and method, if applicable
  - l. Preheat and interpass temperature requirements or limitations
  - m. Post-weld treatments

## 7.6.6 Essential Variables

Essential variables for welding procedure qualification shall be as specified in AWS D1.1 or ASME Section IX, DNV-OS-C401 Chapter 2 Section 1 C700 and modified/augmented herein. Changes to essential variables outside the ranges allowed by this Section and AWS D1.1 or ASME Section IX and DNV-OS-C401 Chapter 2 Section 1 C700 shall require requalification of the welding procedure.

### 7.6.6.1 Materials

7.6.6.1.1 The base-metal chemical composition specification shall be considered as an essential variable.

7.6.6.1.2 The proprietary steel name for special non-standard chemical compositions or proprietary modifications to standard chemical compositions shall be considered as essential variables that shall be included on the WPS.

7.6.6.1.3 The CE and Pcm (reference Section 2.3.5) of the base-metal for which the welding procedure qualification results remain valid shall be limited to no more than 0.025 weight percent above those which were successfully tested in the procedure qualification.

7.6.6.1.4 Consumable (electrodes and flux) manufacturer and trade-name shall be considered as essential variables.

### 7.6.6.2 Preheat/Interpass Temperature

7.6.6.2.1 Preheat and minimum interpass temperatures shall be established to develop the specified properties in the weldment, but shall not be less than those recommended by the consumable Manufacturer or Table 7.6.6.2.1 of this document.

7.6.6.2.2 Preheat or interpass temperatures lower than those specified in Table 7.6.6.2.1 may be permitted if procedure qualification testing includes CTS testing in accordance with BS 7363 (reference Section 7.7.6 of this document) which shows that the particular base-metal/consumable/preheat/heat input combination is not susceptible to delayed cracking at the lowest preheat, lowest heat input, and highest average weld-metal diffusible hydrogen level to be permitted by the WPS.

7.6.6.2.3 The maximum interpass temperature for production repair welding shall not exceed that recommended by the consumable manufacturer or  $-5^{\circ}\text{C}$  above that which was achieved during welding of the procedure qualification test weld, whichever is lower, on a per pass basis.

#### 7.6.6.3 Welding Parameters

7.6.6.3.1 The mode of metal transfer across the arc shall be considered as an essential variable.

7.6.6.3.2 The type of welding current and polarity shall be considered essential variables.

7.6.6.3.3 Weld procedure qualification, relative to Charpy testing requirements, is limited to a plus or minus 25 percent variation in heat input per pass. Voltage and current shall be determined with calibrated meters and recorded for each pass during procedure qualification test welding. Travel speed shall also be recorded for each pass. These data shall be included in the PQR documentation. A wider tolerance on qualified heat input range may be achieved by successfully testing procedure qualification test welds which have been made at both the highest and lowest heat inputs to be allowed for production welding, as governed by the WPS. Changes to heat input outside the plus or minus 25 percent discussed above, but

within DNV-OS-C401 Ch.2 Sec.1 C700, AWS D1.1 or ASME Section IX allowables, will require supplemental procedure qualification testing relative to Charpy testing only.

#### 7.6.6.4 Post Weld Heat Treatment (PWHT)

Procedure qualification is limited to a plus or minus 40°C tolerance on PWHT temperature relative to the temperature actually utilized during PWHT of the procedure qualification test weld(s).

### 7.7 Repair Weld Procedure Qualification Requirements (PQR)

#### 7.7.1 General

7.7.1.1 Repair welding procedures shall be qualified by NDE and mechanical testing as specified in AWS D1.1 or ASME Section IX and modified/augmented by this Section.

DNV-OS-B101 Ch.2 Sec.4 A1100 "Repair" shall be applied for the casting repair.

7.7.1.2 Procedure qualification welding, NDE of procedure qualification test welds, and specimen layout for mechanical properties tests shall be witnessed by buyer or a buyer approved third party. Mechanical testing shall be performed by a buyer approved testing laboratory

7.7.1.3 The results of testing, original photomicrographs, and copies of certificates for base-metals and consumables shall be included in the PQR documentation.

7.7.1.4 Test plates for repair weld procedure qualification testing shall be at least 40mm in thickness and grooves for repair weld procedure qualification shall be either single V-groove or single U-groove, either with or without a backweld.

#### 7.7.1.5 PWHT

If PWHT is to be specified in the WPS, then the qualification test weld(s) shall be either; (a) cycled through two distinct PWHT treatments or (b) held at the required PWHT temperature for 3-3.5 times the required minimum hold time. Actual hold temperature and time and method of heat-up and cool-down shall be recorded and included in the PQR documentation. PWHT temperature shall be between -5°C and 10°C below previous final tempering or aging temperatures for the base-metal.

#### 7.7.2 Non-Destructive Examination (NDE) of Procedure Qualification Welds

7.7.2.1 Procedure qualification test welds shall receive Visual Examination (VE) over 100 percent of the length of weld surfaces. 50mm at the beginning and end of each test weld may be disregarded. Acceptance by the buyer representative or buyer approved third party shall be required prior to sectioning of test welds for mechanical testing. Test welds shall meet the same requirements for weld profiles and VE as that specified for production repair welding.

7.7.2.2 Procedure qualification test welds shall be examined by the NDE methods given below with 100 percent coverage except that 50mm at the beginning and end of each test weld may be disregarded. NDE shall be performed after a minimum waiting period of 48-hours for test welds to be left in the as-welded condition or after PWHT for test welds receiving PWHT. Test weld NDE results shall be accepted prior to sectioning of test welds for mechanical testing. Repair welding of test welds is not permitted.

7.7.2.2.1 Test welds shall be either Radiographically Examined (RE) or Ultrasonically Examined (UE).

7.7.2.2.2 All test welds in the PWHT condition shall be examined by UE.

7.7.2.2.3 Test welds shall be examined by either the Liquid Penetrant (LP) or Magnetic Particle (MP) methods.

7.7.2.2.4 Acceptance criteria for NDE of test welds shall be the same as that specified for production repair welds.

### 7.7.3 Tensile Test of Procedure Qualification Welds

#### 7.7.3.1 Weld-Metal Tensile Test

7.7.3.1.1 A weld-metal tensile test in accordance with AWS D1.1, Figure 4.18, shall be extracted and tested from the procedure qualification test weld for each combination of base-metal and welding consumables. The longitudinal axis of the tensile test specimen shall coincide with the procedure qualification test weld axis. The tensile specimen size and location within the procedure qualification test weld wall thickness shall be such that a minimal amount of HAZ and base-metal is included in the specimen gage length; however, the largest Tensile specimen per AWS D1.1, Figure 4.18, that fulfills this criteria shall be utilized.

7.7.3.1.2 Percent elongation and percent reduction in area for the weld-metal specimen shall be greater than or equal to the minimums specified for the base-metal. Yield strength for the weld-metal specimen shall be no more than 5 ksi below the specified maximum yield strength for the base-metal and not more than 20 ksi above the specified maximum yield strength for the base metal. If results from the weld-metal specimen fail to meet the criteria stated above, then two additional weld-metal tensile specimens may be extracted from the test weld and tested as per Section 7.7.3.1.1. Results from both

specimens shall meet all specified criteria for acceptance.

#### 7.7.3.2 Reduced-Section Tensile Tests

Reduced-section tensile test results shall meet or exceed the specified requirement for the base-metal with respect to yield strength, percent elongation, and percent reduction in area.

#### 7.7.4 Charpy Impact Testing of Procedure Qualification Welds

7.7.4.1 Test locations for Charpy V-Notch (CVN) specimens shall be as shown on Figure 7.7.4.1. Six standard Type A CVN specimens shall be machined and tested in accordance with ASTM E23-88 from each of the locations shown.

7.7.4.2 Test temperature shall be lower than or equal  $-40^{\circ}\text{C}$  for fusion line and HAZ specimens (test locations B, C, and D) and weld-metal specimens (test locations A and E).

7.7.4.3 Absorbed energy, lateral expansion, and fracture appearance (percent ductile fracture, for fusion line and HAZ weld-metal specimens) shall be reported in the PQR documentation for all specimens tested.

7.7.4.4 Fusion line and HAZ tests shall be conducted for all base-metals to be qualified. Weld-metal tests shall be conducted for all combinations of base-metals and welding consumables to be qualified.

7.7.4.5 The longitudinal centerline of each specimen shall be transverse to the weld axis. The base of the notch shall be perpendicular (normal) to the test piece surfaces (see Figure 7.7.4.1).

7.7.4.6 The scribing of CVN specimen blanks for machining of V-Notches shall be accompanied by:

- a. Machining over-length specimen blanks out of the test weld at the specified depths from the test piece surfaces
- b. Etching the specimen blanks with a 5-10 percent Nital solution to reveal the location of the weld-metal, fusion line, and HAZ
- c. Scribing the notch centerline by using the fusion line, as shown on the plane of the specimen perpendicular to the axis of the weld and the test piece surfaces, as a reference.

7.7.4.7 The second lowest absorbed energy value from each test location shall be designated as the Characteristic CVN for that particular location. For repair welds in regions designated as critical for NDE which do not receive PWHT, each location's Characteristic CVN shall equal or exceed the value given in Table 7.7.4.7 as applicable for the maximum excavated cavity depth to be qualified and the base-metal SMYS. For repair welds in regions designated as critical for NDE which receive PWHT, or all repair welds in regions not designed as critical for NDE, each locations Characteristic CVN shall equal or exceed the CVN requirement specified for the base-metal (reference Section 6.3.2). In addition, no more than one CVN specimen from each test location of fusion line, HAZ, and weld-metal specimens tested at minus 40°C shall display less than 50 percent ductile fracture appearance.

7.7.5 Macrosection, Microhardness Survey, and Bead-On-Plate Tests of Procedure Qualification Welds

7.7.5.1 Macrosection Evaluation

7.7.5.1.1 One macrosection shall be extracted from near the middle of the procedure qualification test weld. Macrosections shall be polished to a metallographic finish and etched in a 5-10 percent Nital solution. Evaluation of the macrosection shall show full fusion at the root, no cracks, and thorough fusion

between adjacent layers of weld-metal and between weld-metal and base-metal. Photomicrographs of macrosections at approximately three times magnification shall be included in the PQR documentation.

7.7.5.1.2 For procedure qualification welds in the PWHT condition, macro-section evaluation shall include metallographic examination at a minimum of 200 times magnification of the HAZ and weld-metal for any stress-relief cracking. representative photomicrographs shall be included in the PQR documentation.

#### 7.7.5.2 Macrosection Microhardness Survey

7.7.5.2.1 A Vickers microhardness survey shall be performed on a macrosection from the test weld. Microhardness measurements shall be in accordance with ASTM E92-82 or ASTM E384-89. Weld-metal and unaffected base-metal (reference Sections 7.7.5.2.2, 7.7.5.2.4 and 7.7.5.3.2) hardness determinations may be Rockwell A, B or C hardness measurements, as applicable, made in accordance with ASTM E18-89a. ASTM E92 with an applied load of 10 kgf is preferred. Conversions from Rockwell hardness to Vickers microhardness shall be in compliance with ASTM E140-88. converted hardness values along with the actual readings determined with the hardness measurement technique utilized shall be noted in the PWR documentation.

7.7.5.2.2 The location of microhardness determinations for the microhardness survey shall be as shown in Figure 7.7.5.2.2.

7.7.5.2.3 The traverse lines for the microhardness survey shall be approximately 1mm from both outer surfaces and approximately at the 1/2 T location of the test weld, subject to the limitations given in ASTM E92, ASTM E384 or ASTM E18, as applicable.

7.7.5.2.4 A minimum of three equally spaced determinations shall be made in the weld-metal for each traverse. In the HAZ, microhardness determinations shall start as close as practicable to the fusion line. A minimum of three HAZ microhardness determinations shall be made on each side of the weld for each traverse. One additional reading shall be taken at least 20mm from the fusion line on each traverse in order to represent unaffected base-metal.

### 7.7.5.3 Bead-On-Plate Test

7.7.5.3.1 A bead-on-plate (BOP) weld pass and Vickers microhardness survey shall be made on each base-metal to be permitted by the WPS. The length of the deposited bead shall not exceed the minimum permissible bead length for repair welds. This pass shall be made with the lowest permissible heat input and preheat temperatures applicable to the repair welding procedure being qualified.

7.7.5.3.2 Location of hardness readings shall be as shown in Figure 7.7.5.2.2. Hardness measurements shall be in compliance with Section 7.7.5.2.1.

7.7.5.4 The maximum acceptable microhardness for the hardness traverses required by Sections 7.7.5.2 and 7.7.5.3 shall be 350 HV10. The minimum microhardness shall not be lower than that specified below for the applicable SMYS.

|         |          |
|---------|----------|
| SMYS 50 | 151 HV10 |
| SMYS 60 | 168 HV10 |
| SMYS 70 | 185 HV10 |
| SMYS 80 | 202 HV10 |
| SMYS 85 | 210 HV10 |

### 7.7.6 Procedure Qualification Cracking Tests

#### 7.7.6.1 Delayed Cracking Tests

If the casting Manufacturer wishes to utilize consumables with average deposited weld-metal diffusible hydrogen levels in excess of those allowed by Section 7.5 or preheat/minimum interpass temperatures lower than those allowed by Section 7.6.6.2, then CTS testing in accordance with BS 7363 shall be performed as part of procedure qualification testing in order to show that the particular base-metal/consumable/preheat/heat input combination will not be susceptible to delayed cracking. Tests shall be conducted utilizing the lowest preheat, lowest heat input and highest weld-metal average diffusible hydrogen level to be permitted by the WPS. Both top and bottom blocks for CTS testing shall be 40mm.

#### 7.7.6.2 Stress Relief Cracking Tests

If PWHT is to be specified by the WPS, then the delayed cracking test assemblies specified in Section 7.7.6.1 shall be cycled through a simulated PWHT cycle prior to examination for cracks in order to show that the particular base-metal/consumable combination will not be susceptible to stress-relief cracking. Test assemblies shall be prepared by first welding, as specified in BS 7363, and then subjecting the welded test assembly to a simulated PWHT cycle prior to examination for cracks. The simulated PWHT cycle shall employ holding of the welded assembly for 3 to 3.5 times the specified minimum hold time at the specified PWHT temperature, plus or minus 35°C. PWHT of the welded assembly shall not commence until the lesser of either 72hours or the specified maximum allowable elapsed time prior to PWHT, as allowed by the WPS, has transpired.

### 7.8 Repair Weld Workmanship and Technique

- 7.8.1 Preheat and interpass temperatures shall be as required by the buyer approved WPS and Section 7.6.6 of this document.
- 7.8.2 Preheat temperature shall be measured a minimum of 75mm from the edge of the weld bevel. The interpass temperature shall be measured within 25mm of the weld groove. Interpass temperature measurement shall be made adjacent to the weld-start location of the subsequent pass within 2minutes prior to commencement of welding. Temperature indicating crayons shall not be marked on weld bevels, weld beads or surfaces to be welded.
- 7.8.3 Preheat shall be applied to establish and maintain the required temperatures for a distance equal to the thickness of the casting at the location to be repair welded, but not less than 75mm in all directions (including through-thickness) from the point of welding.
- 7.8.4 Electrode and flux moisture control (baking, storage ovens, exposure times, etc.) shall be in accordance with Paragraphs 5.3.2.1 and 5.3.3.2 of AWS D1.1 and Section 7.5.5 of this document, except that redrying or bakeout temperatures shall be superseded by the temperature ranges specified by the consumable Manufacturer(s). Baking shall be mandatory for EXX18 low hydrogen electrodes and exposure time shall be limited to 2-hours. Exposure time for EXX18 electrodes may be extended, subject to buyer approval, if moisture resistant electrodes manufactured and tested in accordance with MIL-E-0022200/10A(SH) are used. In these cases, the casting Manufacturer shall submit a test report showing initial moisture content and moisture pick-up characteristics for the consumable.
- 7.8.5 The use of manual slag hammers, chisels and lightweight vibrating tolls for the emoval of slag and spatter is permitted and is not considered peening, except that excessive mechanical

working of the surface that may mask surface defects or otherwise inhibit a proper visual inspection is prohibited.

7.8.6 Arc strikes outside of the weld groove shall not be permitted. Repair of inadvertent arc strikes shall be done by grinding followed by VE and MP or LP examination, including a written report.

7.8.7 The removal of weld-metal or portions of base-metal may be accomplished by machining, grinding, chipping or air-arc gouging. Oxyfuel gouging shall not be permitted.

7.8.8 The root side of complete penetration repair welds shall be backgouged, using grinding, air-arc gouging or chipping, to sound metal before any weld is applied to the backside. The groove shall be prepared by grinding to provide the proper shape and bevel for the welding procedure. Oxyfuel gouging shall not be permitted.

7.8.9 Surfaces produced by carbon-arc gouging or cutting, or surfaces showing carbon deposits due to oxy-fuel heating shall be dressed by blasting, grinding, brushing, or chipping, as required, to remove carbon or oxide residue.

7.8.10 Excavated cavities in regions not designated as critical for NDE will not be required to be repair welded as long as their depth does not exceed 3.2mm and as long as dimensions comply with AD & PL or AFC drawings tolerances. Unwelded cavities shall be faired smoothly into surrounding base-metal.

7.9 Non-Destructive Examination (NDE) of Repair Welds

7.9.1 VE of Repair Welds

7.9.1.1 Excavated cavities for repair welding shall receive VE in

accordance with Section 8.1 of this document prior to welding. Acceptance criteria shall be the same as that specified for base-metal in the same region of the casting and the applicable criteria of ASME Section IX or AWS D1.1 and DNV-OS-B101.

7.9.1.2 Repair weld areas shall be properly dressed or blended flush with base-metal to conform to AFC drawing requirements.

7.9.1.3 Completed repair welds shall receive VE in accordance with Section 8.1 of this document. Acceptance criteria shall be the same as that specified for base-metal in the same region of the casting and the applicable criteria of ASME Section IX or AWS D1.1 and DNV-OS-B101.

#### 7.9.2 NDE of Repair Welds for Surface Defects

7.9.2.1 Excavated regions for repair welding shall be examined for surface defects in accordance with ASTM A703 Supplementary Requirement S10.

7.9.2.2 Completed repair welds shall be examined for surface defects in accordance with Section 8.2 of this document. Acceptance criteria shall be the same as that specified for base-metal in the same region of the casting and the applicable criteria of ASME Section IX or AWS D1.1. For welds receiving PWHT, NDE for surface defects shall occur after PWHT.

#### 7.9.3 NDE of Repair Welds for Subsurface Defects

7.9.3.1 Completed repair welds shall be examined for subsurface defects in accordance with Section 8.3 of this document. Acceptance criteria shall be the same as that specified for base-metal in the same region of the casting and the applicable criteria of ASME Section IX or AWS D1.1. For welds receiving PWHT, NDE for subsurface defects shall occur

after PWHT.

7.9.3.2 All completed repair welds subjected to PWHT shall receive UE in accordance with Section 8.3 of this document, after PWHT.

#### 7.10 Repair Weld Record Management

Repair weld charts, documenting all major repair welds and all repair welds in regions designated as critical for NDE on AFC drawings shall be prepared for each casting and included in the documentation package. Repair welds shall be considered major when they are made to correct leakage on hydrostatic testing, or when the depth of the excavated cavity exceeds 20 percent of the actual wall thickness or 25mm, whichever is smaller, or when the extent of the cavity exceeds 6450mm<sup>2</sup>. Repair weld charts shall be sketches or photographs or both showing the location and major dimensions (length, width, and depth) of excavated cavities.

### 8.0 Non-Destructive Examination (NDE) of Castings

The NDE for the casting shall be applied in accordance with DNV-OS-B101 Chapter 2 Section 4 A1000 and below requirements. The most severe requirements in DNV and below requirements should be applied.

#### 8.1 VE of Castings

VE with 100 percent coverage of each casting shall be conducted in compliance with MSS SP-55, except where surface defects will be removed by subsequent machining. There shall be no porosity on surfaces designated for painting.

#### 8.2 NDE of Castings for Surface Defects

Each casting shall be examined by either MP per ASTM A703 Supplementary Requirement S4 or LP per ASTM A703 Supplementary Requirement S6. Final examination shall occur after final heat treatment, excluding PWHT, but may occur after PWHT. Coverage shall be 100 percent except for those regions designated on AFC drawings as requiring no surface NDE. Acceptance criteria shall be per ASTM E125 Severity Degree 2 or better for Surface indication Types II through V and 4.75mm maximum for surface indication Type I Linear Discontinuities, except for those regions designated as critical for NDE on AFC drawings, which shall be subjected to the acceptance standards of ASME BPV Code Section VIII Division 1 Appendix 7.

### 8.3 NDE of Castings for Subsurface Defects

Each casting shall be examined for internal, or subsurface, defects by RE as per ASTM A703 Supplementary Requirement S5 or by UE as per ASTM A703 Supplementary Requirement S7. Coverage shall be 100 percent except for those regions indicated on the AFC drawings as requiring no NDE for subsurface defects.

8.3.1 RE acceptance criteria shall be Severity Level 3 or better for all imperfection categories except those regions designated as critical for NDE on AFC drawings which shall be subjected to the acceptance criteria of ASME BPV Code Section VIII Division 1 Appendix 7.

8.3.2 UT shall be in accordance with ASTM A609-86a Method A - Flat-Bottomed Hole Calibration Methods. Scan plans shall be submitted for buyer approval prior to examination. Regions of the castings designated as critical for NDE, as indicated on the AFC drawings, shall be examined such that 100 percent UE coverage from three mutually orthogonal directions is achieved.

If, due to shape or configuration, critical regions for NDE cannot be 100 percent volume inspected from three mutually orthogonal directions using longitudinal beam, angle beam examination in accordance with ASTM A609-86a Supplementary Requirement S1 may be used, as necessary, to effect 100 percent coverage. UT indications less than 25mm apart shall be evaluated as one discontinuity. UT acceptance criteria shall be Quality Level 3 plus no planar discontinuities except for regions designated as critical for NDE on AFC drawings, for which acceptance criteria shall be no planar discontinuities plus Quality Level 1 to a depth of  $\frac{1}{4}$  T from the surface and Quality Level 2 for the remainder of the wall thickness. The VE acceptance criteria shall be based on Paragraphs 10.2.1, 10.2.2 and 10.2.3 of ASTM A609.

#### 8.4 NDE Procedures

All NDE procedures shall be approved by buyer.

#### 8.5 NDE Record Management

Results of all NDE shall be included in the documentation package.

### 9.0 Documentation Package

Unless specifically deleted/waived by the RFP/Q, PO or applicable buyer specifications, an additional copy of the documentation package shall be sent to buyer.

**Table 2.3.5 Maximum CE and Pcm Allowables(1)  
- service category B**

| Maximum CE and Pcm Allowables <sup>(1)</sup> - service category B |                     |            |     |     |     |
|---|---------------------|------------|-----|-----|-----|
| Thickness of the Critical Section for Mechanical Properties (mm)  | CE (Max), Pcm (Max) |            |     |     |     |
|   | SMYS                |            |     |     |     |
|   | 50                  | 60         | 70  | 80  | 85  |
| t < 152.4   | 0.46, 0.24          | 0.47, 0.25 | (2) | (2) | (2) |
| t ≥ 152.4   | 0.47, 0.25          | (2)        | (2) | (2) | (2) |

(1) These allowables may be further restricted by the materials specification or by essential variable limitations on CE and Pcm ranges relative to the actual casting chemical analysis tested during Repair Weld Procedure Qualification.

(2) The maximum allowed CE and Pcm values for these cases shall be proposed by the casting Manufacturer for buyer approval.

**Table 6.1.2 Tensile Properties and Hardness Requirements**

|   | SMYS(MPa) |         |        |   |   |
|---|-----------|---------|--------|---|---|
|   | 345       | 410     | 480    | - | - |
| 0.2 Percent Offset<br>(N/mm <sup>2</sup> )                              | 355       | 430     | 480    |   |   |
| Maximum<br>Yield Strength<br>0.2 Percent Offset<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 480       | 620     | 620    |   |   |
| Minimum Tensile<br>Strength<br>(N/mm <sup>2</sup> )                     | 480       | 550     | 620    |   |   |
| Maximum Yield<br>Strength To Tensile<br>Strength Ratio                  | 0.87      | 0.88    | 0.9    | - | - |
| Minimum Percent<br>Elongation In<br>50mm<br>Gauge Length<br>(%)         | 18        | 18      | 17     | - | - |
| Minimum Percent<br>Reduction in Area<br>(Percent)                       | 35        | 35      | 35     | - | - |
| Brinell Hardness<br>Range<br>(HB)                                       | 140~197   | 167~223 | 187~35 | - | - |



**Table 6.3.2(A) Charphy Impact Requirements**

| Thickness*<br>(mm) | CVN(J)    |     |     |     |     |
|--------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|
|                    | SMYS(MPa) |     |     |     |     |
|                    | 345       | 410 | 480 | 550 | 620 |
| 12.7               | 33        | 33  | 33  | 33  | 33  |
| 19.1               | 33        | 33  | 33  | 33  | 33  |
| 25.4               | 33        | 33  | 33  | 33  | 33  |
| 38.1               | 33        | 33  | 33  | 39  | 43  |
| 50.8               | 33        | 33  | 41  | 50  | 55  |
| 63.5               | 33        | 38  | 49  | 60  | 66  |
| 76.2               | 33        | 43  | 56  | 69  | 76  |
| 88.9               | 37        | 49  | 64  | 79  | 85  |
| 101.6              | 41        | 56  | 70  | 87  | 96  |
| 114.3              | 45        | 61  | 77  | 95  | 104 |
| 127.0              | 49        | 65  | 84  | 103 | 114 |
| 139.7              | 53        | 70  | 91  | 111 | 123 |
| 152.4              | 57        | 76  | 96  | 119 | 131 |
| 165.1              | 61        | 81  | 103 | 127 | **  |
| 177.8              | 64        | 85  | 110 | **  | **  |
| 190.5              | 68        | 91  | 115 | **  | **  |
| 203.2              | 72        | 95  | 122 | **  | **  |
| >203.2             | **        | **  | **  | **  | **  |

\* **Service Category A** is not intended to contain, or form part of, structural weldments, other than repair welds.

\* Thickness is critical section for mechanical properties (mm).

\*\* These CVN requirement will be calculated by buyer on a case-by-case basis.

**Table 6.3.2(B) Charphy Impact Requirements**

| Thickness*<br>(mm) | CVN(J)    |     |     |     |     |
|--------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|
|                    | SMYS(MPa) |     |     |     |     |
|                    | 345       | 410 | 480 | 550 | 620 |
| 12.7               | 33        | 33  | 33  | 34  | 38  |
| 19.1               | 33        | 33  | 38  | 47  | 51  |
| 25.4               | 33        | 38  | 47  | 60  | 65  |
| 31.8               | 34        | 45  | 57  | 70  | 77  |
| 38.1               | 39        | 51  | 66  | 81  | 89  |
| 44.5               | 43        | 58  | 75  | 92  | 102 |
| 50.8               | 49        | 65  | 83  | 103 | 112 |
| 57.2               | 53        | 72  | 91  | 112 | 123 |
| 63.5               | 58        | 77  | 99  | 122 | 134 |
| 69.9               | 62        | 84  | 107 | 131 | **  |
| 76.2               | 66        | 89  | 114 | **  | **  |
| 88.9               | 76        | 102 | 129 | **  | **  |
| 101.6              | 84        | 112 | **  | **  | **  |
| 114.3              | 92        | 123 | **  | **  | **  |
| 127.0              | 100       | 134 | **  | **  | **  |
| 139.7              | 108       | **  | **  | **  | **  |
| 152.4              | 117       | **  | **  | **  | **  |
| 165.1              | 122       | **  | **  | **  | **  |
| 177.8              | 131       | **  | **  | **  | **  |
| 190.5              | **        | **  | **  | **  | **  |
| 203.2              | **        | **  | **  | **  | **  |
| >203.2             | **        | **  | **  | **  | **  |

\* **Service Category B** is included to contain, or form part of, structural weldments.

\* Thickness is critical section for mechanical properties (mm).

\*\* These CVN requirement will be calculated by buyer on a case-by-case basis.

**Table 7.5.1 Maximum Allowable Deposited Weld-metal  
Average Diffusible Hydrogen Level**

| Base Metal SMYS(MPa) | SMAW            | FCAW <sup>(3)</sup>                 | SAW                                 |
|----------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| SMYS ≤ 410           | 6               | 8                                   | 8                                   |
| 410 < SMYS ≤ 480     | 5               | 6                                   | 7.5                                 |
| SMYS > 480           | 3.2 (Ø ≤ 3.2mm) | 4 <sup>(1)</sup> , 3 <sup>(2)</sup> | 6 <sup>(1)</sup> , 4 <sup>(2)</sup> |
|                      | 3.5 (Ø ≥ 4.0mm) |                                     |                                     |

NOTES: (1) Applies if:

- a)  $t \leq 12.7\text{mm}$  and preheat temperature  $\geq 15^\circ\text{C}$
- b)  $12.7\text{mm} < t < 28.6\text{mm}$  and preheat temperature  $\geq 50^\circ\text{C}$
- c)  $t \geq 28.6\text{mm}$  and preheat temperature  $\geq 90^\circ\text{C}$

(2) Applies if:

- a)  $t \leq 12.7\text{mm}$  and preheat temperature  $< 15^\circ\text{C}$
- b)  $12.7\text{mm} < t < 28.6\text{mm}$  and preheat temperature  $< 50^\circ\text{C}$
- c)  $t \geq 28.6\text{mm}$  and Preheat Temperature  $< 90^\circ\text{C}$

(3) Tests shall be conducted with the same type shielding gas mixture as specified by the WPS.

(4) Weld-metal average diffusible hydrogen level for a production lot of consumables shall be reported as the average of four tests as per AWS A4.3.

**Table 7.6.6.2.1 Minimum Preheat/Interpass Requirements For Repair Welding**

| Base-metal Thickness at Location to be Repair Welded(mm) | Min. Required Preheat/Interpass Temperature (°C) |            |            |            |            |            |        |
|--|--|------------|------------|------------|------------|------------|--------|
|  | Susceptibility Index <sup>(1)</sup> (SI)         |            |            |            |            |            |        |
|  | SI<3.1   | 3.1<SI<3.6 | 3.6<SI<4.1 | 4.1<SI<4.6 | 4.6<SI<5.1 | 5.1<SI<5.6 | 5.6≤SI |
| t < 9.5  | <18  | <18        | <18        | 35         | 110        | 150        | 160    |
| 9.5 ≤ t < 19.0   | <18  | 18         | 65         | 105        | 135        | 160        | 160    |
| 19.0 ≤ t < 38.1  | 18   | 85         | 115        | 135        | 150        | 160        | 160    |
| 38.1 ≤ t < 76.2  | 115  | 130        | 150        | 150        | 160        | 160        | 160    |
| 76.2 ≤ t   | 115  | 130        | 150        | 150        | 160        | 160        | 160    |

(1) Susceptibility Index (SI) = (12 × P<sub>cm</sub>) + log<sub>10</sub> (H)

where P<sub>cm</sub> = C + (Si/30) + (Mn + Cu + Cr)/20 + (Ni/60) + (Mo/15) + (5B); weight percent

H = maximum allowable deposited weld-metal diffusible hydrogen level; ml/100 gm

**Table. 7.7.4.7 Repair Weld Procedure Qualification CVN Absorbed Energy Requirements**

| Max.<br>Excavated<br>Cavity Depth<br>Qualified*<br>(mm) | CVN(J)    |     |     |     |     |
|---|-----------|-----|-----|-----|-----|
|   | SMYS(MPa) |     |     |     |     |
|   | 345       | 41  | 480 | 550 | 620 |
| 12.7  | 33        | 33  | 33  | 34  | 38  |
| 50.8  | 41        | 53  | 69  | 85  | 95  |
| 63.5  | 49        | 65  | 83  | 103 | 112 |
| 76.2  | 56        | 75  | 96  | 117 | 130 |
| 88.9  | 64        | 84  | 108 | 134 | **  |
| 101.6   | 70        | 93  | 120 | **  | **  |
| 114.3   | 77        | 103 | 131 | **  | **  |
| 127.0   | 84        | 113 | **  | **  | **  |
| 139.7   | 91        | 120 | **  | **  | **  |
| 152.4   | 97        | 130 | **  | **  | **  |
| 165.1   | 103       | **  | **  | **  | **  |
| 177.8   | 110       | **  | **  | **  | **  |
| 190.5   | 116       | **  | **  | **  | **  |
| 203.2   | 122       | **  | **  | **  | **  |
| >203.2  | **        | **  | **  | **  | **  |

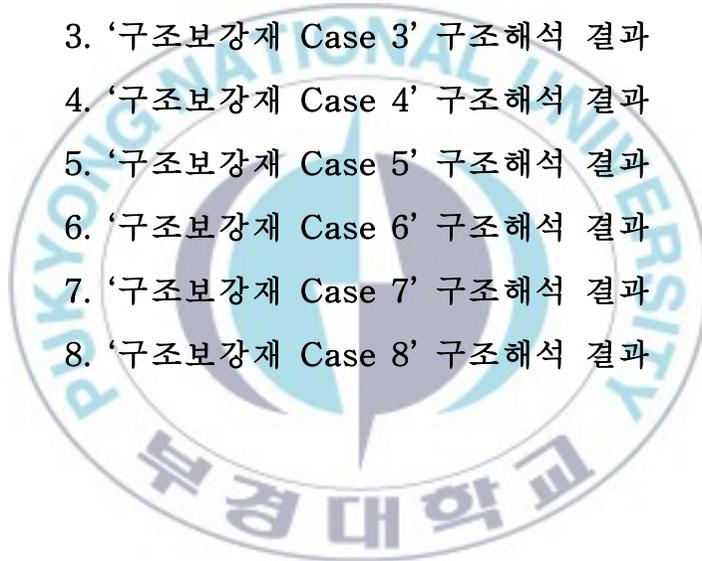
\* Repair welds in regions designated as critical for NDE which do not receive PWHT.

\* These CVN requirements will be calculated by the buyer on a case-by-case basis.

\*\* Excavated cavity depth for double “V” or double “U” repair welds is defined as the total repair weld thickness.

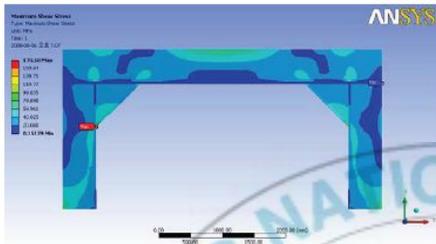
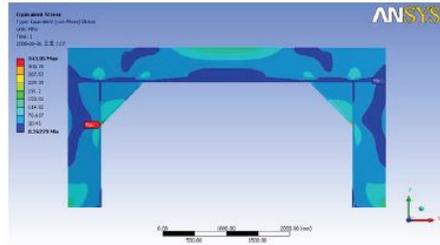
## Appendix II

1. '구조보강재 Case 1' 구조해석 결과
2. '구조보강재 Case 2' 구조해석 결과
3. '구조보강재 Case 3' 구조해석 결과
4. '구조보강재 Case 4' 구조해석 결과
5. '구조보강재 Case 5' 구조해석 결과
6. '구조보강재 Case 6' 구조해석 결과
7. '구조보강재 Case 7' 구조해석 결과
8. '구조보강재 Case 8' 구조해석 결과

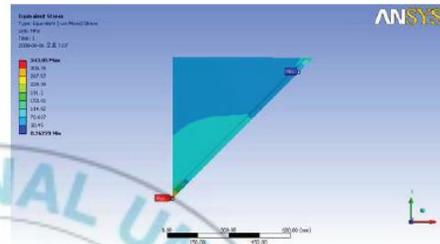


**Case 1**

Equivalent Stress : 343.95Mpa  
Displacement : 3.045mm  
H : 483.661mm



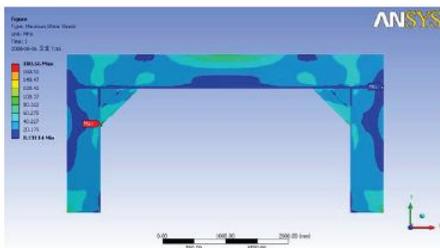
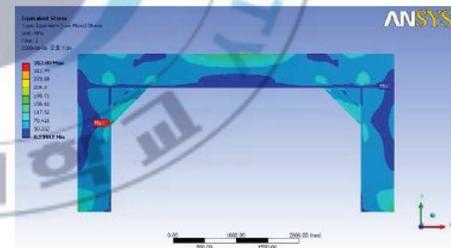
Maximum Shear Stress



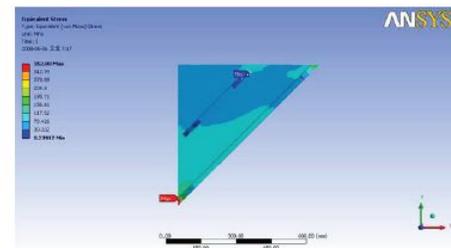
Equivalent Stress

**Case 2**

Equivalent Stress : 352.08Mpa  
Displacement : 3.342mm  
H : 424.264mm



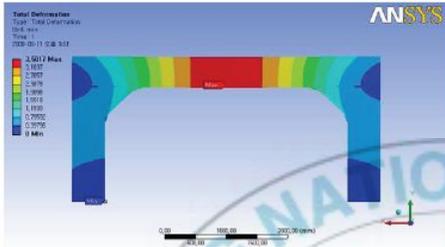
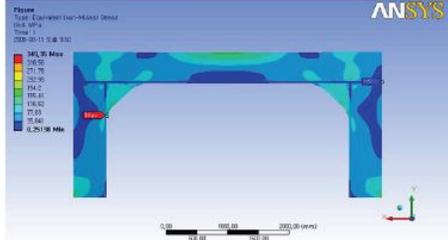
Maximum Shear Stress



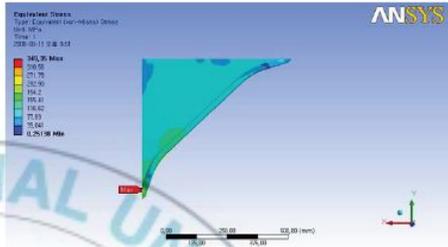
Equivalent Stress

**Case 3**

Equivalent Stress : 349.35Mpa  
 Displacement : 3.5817mm  
 H : 359.055mm



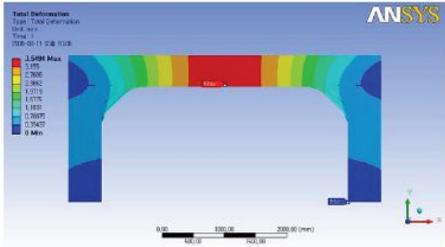
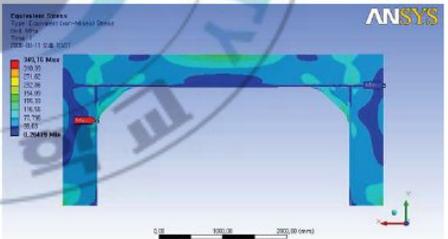
Maximum Shear Stress



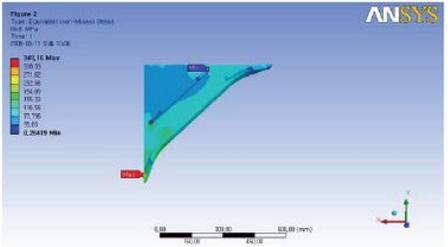
Equivalent Stress

**Case 4**

Equivalent Stress : 349.16Mpa  
 Displacement : 3.5494mm  
 H : 359.055mm



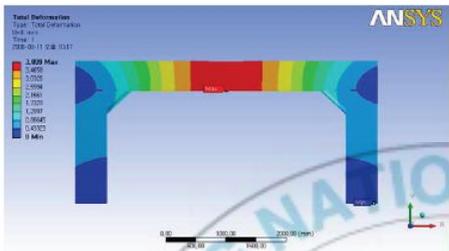
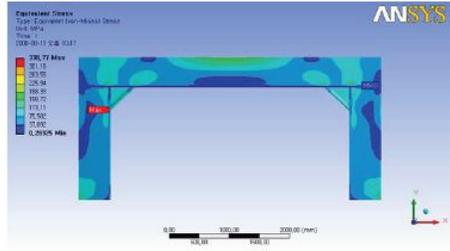
Maximum Shear Stress



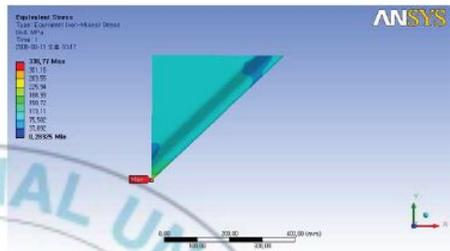
Equivalent Stress

**Case 5**

Equivalent Stress : 338.77Mpa  
 Displacement : 3.899mm  
 H : 286.335mm



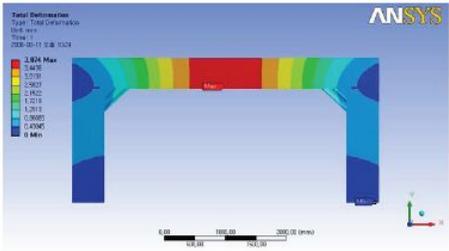
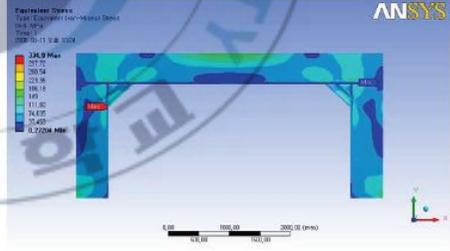
Maximum Shear Stress



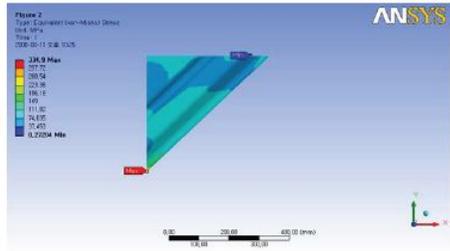
Equivalent Stress

**Case 6**

Equivalent Stress : 334.9Mpa  
 Displacement : 3.874mm  
 H : 286.335mm



Maximum Shear Stress

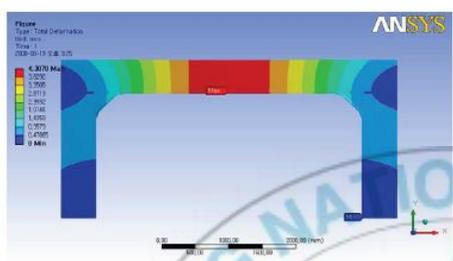
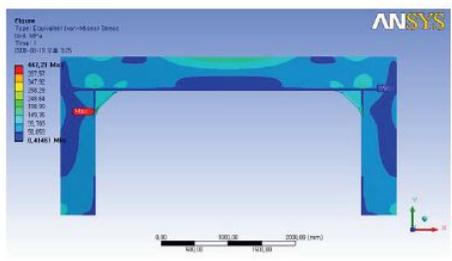


Equivalent Stress

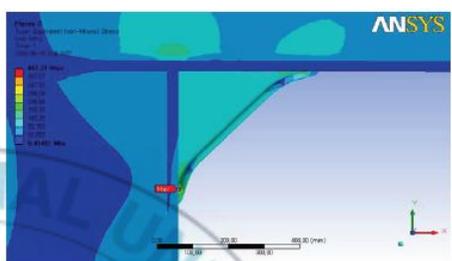
**Case 7**



Equivalent Stress : 447.21Mpa  
 Displacement : 4.3075mm  
 H : 234.038mm



Maximum Shear Stress

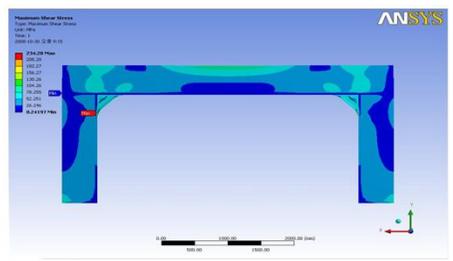
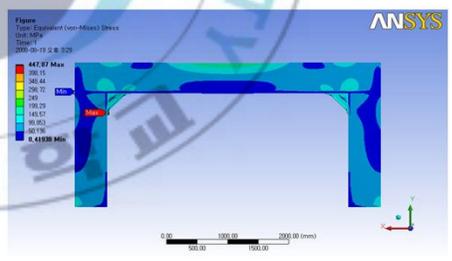


Equivalent Stress

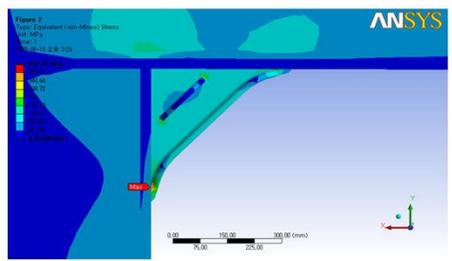
**Case 8**



Equivalent Stress : 447.87MPa  
 Displacement : 4.3191mm  
 H : 230.483mm



Maximum Shear Stress



Equivalent Stress

## 감사의 말씀

배움의 과정이 결코 쉽지 않음을 절실히 느낀 시간들이었습니다. 이제 혼자서 그 길을 만들고 개척해 나가야한다는 책임감이 과정을 끝낸다는 안도감에 앞서 더욱 크게 느껴집니다.

보다 더 충실한 연구결과를 정리해야겠다는 마음가짐과는 다르게 부족함이 항상 앞섭니다만, 성심을 다해 지도해 주시고 채워 주신 심사위원님들께 깊이 감사를 드립니다. 흔쾌히 주심을 맡아 주신 나원배 교수님, 부심을 맡아 주신 이인철 교수님, 부산대학교 기계공학부 강충길 교수님, 한국조선기자재연구원 김정환 박사님으로부터 크나 큰 은혜를 입었습니다.

그리고 부족한 제자를 언제나 사랑으로 품어 주시고 기다려 주신 윤길수 교수님, 학문의 길을 가르쳐 주신 정창식 교수님께도 감사드립니다.

학부에서부터 지금까지 자상하신 가운데 때로는 엄하게 가르침을 잊지 않고 베풀어 주신 해양공학과 류청로 교수님, 류연선 교수님, 김헌태 교수님, 김정태 교수님, 김운태 교수님, 조현만 교수님께도 깊이 감사드립니다.

본 연구는 지식경제부가 주관하는 2007년 부품소재기술개발사업 ‘해양 구조물용 저온·고강도 Casting Steel 부품 개발’ 및 지식경제부와 경상남도, 경남 테크노파크가 주관하는 2008년 지역산업공통기술개발사업 ‘저온강을 이용한 신개념 표준 형강재(Bracket) 설계 및 개발’ 과제의 일부로 수행되었습니다. 두 기관의 적극적인 지원과 설계 및 해석, 시험편 제조 및 시험을 함께 수행한 (주)석진금속 김윤석 대표님, 박상식 연구소장님, 김태원 대리님, 천은영 연구원 이하 부설연구소 연구원들과 부산대학교 대학원 강성식 선생, 한국특허정보원 정범영 팀장님의 노고에 깊이 감사드립니다.

또한 본 연구진행 과정을 깊은 관심과 애정으로 지켜봐 주신 대우조선해양(주) 기술본부장 이영만 전무님, 정방언 전무님, 장철수 전무님, 어려운 여건에서도 배려를 아끼지 않으신 배재류 팀장님 그리고 기술기획팀 동료분들, 허만주 용접기술연구팀장님과 한기형 차장님, 구매기획팀 최영권 부장님, 해양특수선구조설계팀 신장용 파트장님,곽정호 파트장님, 해

양특수선생산설계팀 이종훈 과장님, 해양구매팀 김준호 차장님, 소음진동 연구팀 공영모 박사님, 기술자산보호파트 식구들 그리고 김성진 부장님, 정대명 위원님, 이구호 부장님, 전경중 부장님, 박영수 부장님, 조언래 부장님, 한용식 대표님, 손응현 부장님, 박병문 차장님, 이철우 부장님, 이호태 부장님, 김종규 부장님, 신면섭 부장님, 서동식 팀장님, 김대영 차장님, 안호균 팀장님을 비롯한 여러 선배, 후배, 동료 분들께 마음 깊이 고마움을 전합니다.

대우조선해양(주) 해양특수선설계담당 정경배 이사님, 김주호 부장님, 최열 부장님, 신윤길 이사님, 손성호 부장님, 정태동 부장님, 이병옥 위원님, 천우석 부장님, 이상진 부장님, 박창수 박사님, 박순석 차장님, 김영홍 차장님, 김광수 차장님, 민광기 차장님, 한점환 차장님, 문영석 과장님, 김한수 과장님, 김종필 과장님, 백승돈 차장님, 유현남 차장님, 서석진 파트장님, 조재효 차장님, 국제민 파트장님을 비롯한 해양을 사랑하시는 많은 분들의 관심과 격려에서 큰 힘을 얻었습니다.

조선해양산업의 발전을 위해 열심히 노력하시고, 저에게 사회생활의 사표가 되어 주신 (주)DSEC 신준섭 전무님, 서울대학교 조선해양공학과 신종계 박사님, 인하대학교 이영길 박사님, 한국해양연구원 반석호 박사님, 홍섭 박사님, 홍사영 박사님, 박정기 박사님, 산업경제연구원 홍성인 연구위원님, 한국조선협회 유병세 본부장님, 지식경제부 이진모 사무관님, 삼성중공업(주) 김종갑 부장님, 특허청 박성우 심사관님께 이 자리를 빌어 마음으로부터 우러나오는 깊은 감사의 인사를 드립니다.

학위과정 동안 끊임없는 격려로 힘을 보태주신 삼원기술(주) 윤강로 대표님과 장성철 연구소장님, (주)화영 손화현 대표님과 최경관 연구소장님께도 깊이 감사드립니다.

논문을 준비하는 동안 의욕이 잦아 들 때면 끊임없이 에너지를 채워 주었던 ‘조선해양공학 용어해설’ 증보판 작업에 전문위원으로 참여하고 계신 전남대학교 김종규 박사님, 부산대학교 신성철 박사님, 한국지질자원연구원 김영주 박사님, 한국조선협회 최병철 차장님, 한국조선기자재연구원 이현식 본부장님, 차지협 팀장님, 김태형 팀장님, 정인 팀장님, 김명수 연구

원과 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

제누스국제특허법률사무소 신동기 대표변리사님, 한국조선협회 강사준 팀장님, 유재원 팀장님, 이성우 과장님, 김성현 과장님, 권봉기 대리님, 조선인적자원개발센터 김영훈 소장님, 두원공과대학 변량선 박사님, 목포대학교 심천식 박사님, STX조선(주) 전경렬 상무님, 새거제신문 신기방 편집국장님, TBG전략연구원 김홍규 박사님께 감사드립니다.

튼튼한 후원자로서 항상 격려해 주신 거제대학 메카트로닉스 계열 이찬규 박사님, 정선국 박사님, 한민구 박사님, 권영철 박사님, 김정우 박사님, 박용호 박사님, 손호재 박사님, 박상철 박사님, 선박기술계열 추영배 박사님, 안남현 박사님, 조선정보기술계열 김선일 박사님, 강승모 박사님, 이현 박사님, 관광중국어전공 김영주 교수님을 비롯한 선배교수님들께 깊이 감사드립니다.

대우조선해양(주) 동기 길상석 파트장, 김태희 차장, 노종화 차장, 박현제 차장, 김현홍 차장과 튼튼한 부경대학교 해양공학과 동문후배 장기욱 군, 박태진 군, 박기훈 군, 강현지 군, 조명진 군과 함께 기쁨을 나눕니다.

학부 과정을 함께한 이후 오랜 우정을 이어가고 있는 강동훈 부장, 김진광 부장, 박금식 상무, 사이버연구소 멤버 조현욱 선생 그리고 심사과정 동안 번거로움을 내색하지 않고 진심으로 도움을 준 해양공학과 사무실 이정미 선생께도 고마운 마음을 전합니다.

고향친구 광재, 석일, 은경, 오주, 남규, 영걸, 규태, 한호와 함께 오랜 시간동안 일과 철학을 함께 나눈 건축가 안상기 형님, 대우건설(주) 이준혁 형님, 대우E&P 주시보 형님과도 기쁨을 함께 합니다.

오랜 시간 사랑과 인내로 지켜 봐 주신 어머니, 아내 성미와 두 아들 회원과 지원, 누님들과 동생 내외분과 조카들, 사촌형제남매분들, 그리고 장모님과 처남 내외분에게 그동안의 미안함에 대해 이 한편의 책으로 이해를 구하며 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

배움의 과정이 끝이 없다는 것을 명심하고, 도움을 주시고 지켜봐 주신 많은 분들의 은혜에 보답하기 위해 늘 탐구하고 그 결과를 세상과 유익하게 나눌 수 있도록 낮은 자세로 초심을 간직하겠습니다.