



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

공학석사 학위논문

선박용 엔진 Crank Throw 부품의 기계적 특성 및 피로한도에 관한 연구



2016년 2월

부경대학교 산업대학원

기계시스템 및 조선공학과

송 현 철

공학석사 학위논문

선박용 엔진 Crank Throw 부품의 기계적 특성 및 피로한도에 관한 연구

지도교수 김 동 준

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2016년 2월

부경대학교 산업대학원

기계시스템 및 조선공학과

송 현 철

송현철의 공학석사 학위논문을 인준함.

2016년 2월 26일



주심 공학박사 김인철



위원 공학박사 김용직



위원 공학박사 김동준



목차

1. 서론.....	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	3
2. 이론적 배경.....	5
2.1 Crank Throw 자유단조	5
2.2 피로(Fatigue)	8
3. 크랭크스로우 시험 재료	9
3.1 시험편 화학 조성 및 열처리 조건	9
3.2 시험편 채취 위치 및 정보.....	11
4. 기계적 특성 시험 결과.....	12
4.1 기계적 시험	12
1) Test 규격.....	12
2) 시험편 수량 및 위치	13
4.2 시험 결과	14
1) 인장시험	14
2) 충격시험.....	18
3) Hardness Test	18
4) Microstructure examination	19
5) Sulphur Print	22
6) Cleanliness	23
5.1 피로한도.....	24
1) 피로시험 절차.....	24
2) 시험 조건.....	26
3) 시험 장치.....	27
5.2 피로한도 시험 결과.....	28
5.3 피로한도 예측	31
6. 결론.....	31
◆ 참고문헌.....	33

A Study on the mechanical properties and fatigue limit of crank throw
for marine diesel Engine

Hyun-Chul Song

Department of Mechanical System and Naval Architecture Engineering

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

The crank throw is the most critical component of marine diesel engine with regard to the lifetime of the vessel. Because of the severe service environment, The mechanical properties including the reliability of fatigue limit must be satisfied. The crank throw was manufactured using free forging method. The material of crank throw is S34MnV for MAN B&W used at crankshaft widely. This paper is aimed at estimating both mechanical properties and fatigue limits. To obtain specimens for this dissertation, the crank throw was fully destroyed as several parts. The mechanical properties consist of Tensile strength, Impact Test, Microstructure and Sulphur print. To sum up, the crank throw's comprehensive test results are as follows. The microstructure of crank throw is composed of pearlite and ferrite with grain size No.9 in accordance with ASTM E114 after Normalized and Tempered Heat Treatment. When it comes to the mechanical properties, The overall results were approximately 700Mpa for Tensile Strength , 190~210HB for Surface Hardness, 25J for Charpy 2v Notch impact on Room Temperature respectively. To estimate the fatigue limit, the staircase method proposed by Dixon and Mood formulas was carried out. The condition of fatigue testing was axially loaded with push/pull load, namely $R=-1$ stress ratio. With the result of staircase method Testing, the determined mean strength and standard deviation were 296.3 MPa and 10.6 MPa, respectively.

1. 서론

1.1 연구배경

박용 엔진의 크랭크샤프트는 선박의 가장 중요한 부품 중의 하나이다. 따라서 크랭크샤프트의 내구성 및 안전성에 관한 엔진 제작사 및 선주/선급의 관심 또한 매우 높으며, 이를 개선하고자 하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 크랭크샤프트는 내구성 및 안전성 향상을 위하여 많은 변화를 보이고 있다. 이러한 변화의 양상은 두 가지 형태를 보이고 있다. 주조형에서 자유단조형으로 제작 방식이 변경되었고 또한 선박의 대형화에 따라 일체형에서 저널, 플랜지, 크랭크스로우를 열박음을 통하여 합체시키는 Built-Up 타입으로 발전되었다. Dr. Diesel 고안한 디젤기관은 1897년 첫 시운전을 이후로 비약적인 발전을 거듭하여 왔다. 이후 선박용 디젤 기관은 한 세기를 지나는 동안 연료 분사장치 개발, 과급기의 적용, 저질 연료의 사용, 기관이 초대형화, 전자 제어기관의 출현 등으로 눈부신 발전을 이룩하였다. 현재 국내 선박용 엔진 완성품 제작사는 현대중공업, 두산엔진, STX 엔진 등이 있으며 MAN Diesel & Turbo사(이하 MAN社)와 Wartsila사의 라이선스에 의해 제작되고 있다. 국내 박용 엔진은 상기의 완성품 제작사에서 핵심부품을 제외하고 거의 모든 부품을 국내 기자재 업체에서 제작된 부품을 받아 조립하여 국내 조선사 납품 혹은 국외로 수출을 하고 있으나 중국의 저가 정책과 일본의 환율 정책에 의해 박용 엔진 시장은 조선업 전체와 더불어 치열하게 경쟁을 하고 있다. 본 연구에서 수행되어지는 크랭크스로우는 박용엔진에서 가장 핵심적인 부분으로 개발 및 상용화하는데 많은 노하우와 기술이 요구된다. 그러나 현재 몇몇의 대형 엔진제작사 외에 크랭크스로우의 기계적 특성과 피로수명에 대한 데이터는 확보하기 쉽지가 않다. 즉, 국내에서 출하되는 선박엔진 규모에 비해 소재에 대한 연구가 많이 부족하고, 또한 연구 분야에 대한 공유가 부족한 점을

주목하였다. 본 연구는 실제 산업체에 사용되는 규격과 절차를 최대한 가져와 필요 시에 바로 참조 및 활용이 가능하도록 소재의 기본적이고 종합적인 데이터 확보에 중점을 두었다. 이를 통해 유사한 연구가 실행될 때 시간적, 비용적 절감을 통하여 빠른 시일 내 결과가 도출될 수 있도록 시험치를 제시하여 추후 연구에 활용될 수 있는 데이터를 구성하고자 하였다.



1.2 연구목적

크랭크스로우(Crank Throw)는 선박의 수명이 끝날 때 까지 사용되는 매우 중요한 부품이다. 또한 사용환경 또한 매우 혹독하여 높은 내구성과 신뢰도가 요구된다. 따라서 선급협회에서는 크랭크축에 관한 설계기준을 정립하였는데, 이 기준이 바로 IACS UR M53이며, 각 엔진 제작사는 이 기준에 의거하여 응력 및 피로강도를 설계하고 제작하였다.

IACS UR M53의 부록 IV에서는 피로시험에 관한 지침을 정의하였고 여기서 Staircase 방법에 의거하여 실제 시험편의 피로 거동을 평가하도록 하였다. 이 지침에서는 피로시험의 신뢰성을 확보하기 위해서 반드시 화학적 조성, 기계적 특성(물성치), 표면 경도를 측정하도록 규정하였다. 박용 엔진은 선급협회의 Rule에 반드시 준하여 설계가 되어야 하는데, MAN社 또한 이 Rule에 만족시키는 고유의 피로 설계 기준을 만들어 자사의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 본 연구에서 거론되는 크랭크스로우는 MAN社의 S70ME-C Type의 엔진으로 S34MnV의 재질의 자유단조로 만들어진 제품을 실제로 파단하여 연구를 수행하였다. Staircase Method는 MAN社가 제시한 규격으로 시험을 실시하였고 이 규격의 바탕인 IACS UR M53의 부록 IV에서 필수적으로 규정한 시험체의 기계적 특성을 연계하여 연구하고자 한다.

본 연구에서 제시된 결과는 국내/외 소수의 엔진제조사 및 원천기술을 보유한 MAN社에 국한적인 연구실적을 가지고 있으며 연구 결과는 재료 조직학적 분석보다는 이론적, 시뮬레이션적인 분석이 우세한 것이 사실이다. 따라서 본 연구의 최종 목적은 크랭크스로우의 부품의 피로한도 신뢰도 예측이나, 이러한 피로한도 수명 결과를 가져오는 단조공정 및 기계적 물성 또한 매우 중요하고 상호연관을 가지고 있는 판단하여, 이 점을 다소 상세하게 다루고자 하였다. 결론적으로 부품의 기계적, 화학적 거동 확보를 통하여 소재와 피로수명 한도의 연관성을 규명하

고자 하였다. 이러한 점을 염두 하여 아래의 2가지 거동을 중점적으로 연구하고자 한다.

① 크랭크스로우의 기계적 특성을 확보하고자 하였다.

② Staircase Method 피로시험 방법에 의거하여 크랭크스로우의 피로한도 신뢰도를 예측하고자 하였다.



2. 이론적 배경

2.1 Crank Throw 자유단조

일반적인 Built-up type Crankshaft 형상은 아래의 Fig.1과 같다.

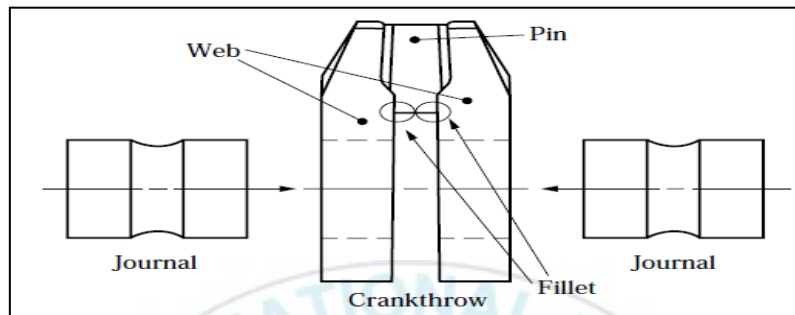


Fig. 1 Illustration of built-up type crankshaft

이는 대형 엔진의 구조로써 크랭크샤프트를 구성하는 저널, 웹, 핀, 플랜지 등을 각기 따로 제작하여 열박음을 실시한다. 크랭크스로우는 Fig.1의 가운데를 지칭하는 부품으로 높은 내구성과 소재 내부의 건전성이 요구되기 때문에 현재 거의 대부분의 대형엔진의 크랭크스로우는 자유단조 공법으로 바뀌고 있는 추세이다. 박용 엔진에 조립되는 단조부품은 선급에서 요구하는 단조비를 반드시 만족시켜야 한다. 아래의 표는 한국선급에서 규정하는 단조비를 표로 구성하였다.

Table. 1 Forging Ratio

제조방법	제품의 모양 ⁽¹⁾	단조비 ⁽²⁾ (3)
직접 강괴로부터 또는 단조블룸(bloom)이나 단조빌릿(billet)으로부터 제조할 경우	$L > D$	3 : 1
	$L \leq D$	1.5 : 1
압연품으로부터 제조할 경우	$L > D$	4 : 1
	$L \leq D$	2 : 1
(비고) (1) L 및 D는 각각 단강품 주요부의 길이 및 지름을 나타낸다. (2) 단조비는 강괴의 단면적에 대한 비로 계산한다. 다만, 이미 열처리 방법으로 가공된 재료를 사용할 경우에는 열처리 가공 후의 평균단면적을 기준으로 하여 계산한다. (3) 단순모양의 부품에 사용되는 봉강의 단조비는 6:1 이상이어야 한다.		

여기서, 크랭크스로우는 직접 강괴(ingot)로부터 자유단조 공법으로 진행되기 때문에 단조비는 최소 3:1을 만족시켜야 한다. 실제 제품에서 단조비는 각각 핀(Pin)부 4.4 : 1, 웹(Web)부 6.1 : 1 로 충분히 단조비를 만족시켜주고 있다.

다음은 크랭크스로우 제작의 상세 공정도이다. 여기서 본 연구의 핵심 공정인 굽힘(벤딩) 공정을 주목할 필요가 있다. 이미 많은 연구에서 벤딩부의 응력집중현상을 연구하였고 실제 제작 과정상 겹침과 두께 감소 등이 발생되어 세밀한 주의가 요구되는 공정이다. 대표적인 엔진메이커인 MAN社와 Wartsila사는 굽힘 구역(Fillet Area)에서 시편을 채취하여 피로한도를 구하도록 절차를 규정하였고, 이는 선급 Rule에서 규정된 사항을 따르는 것이다. 본 시험편 채취 기준은 IACS UR M53을 따랐다.



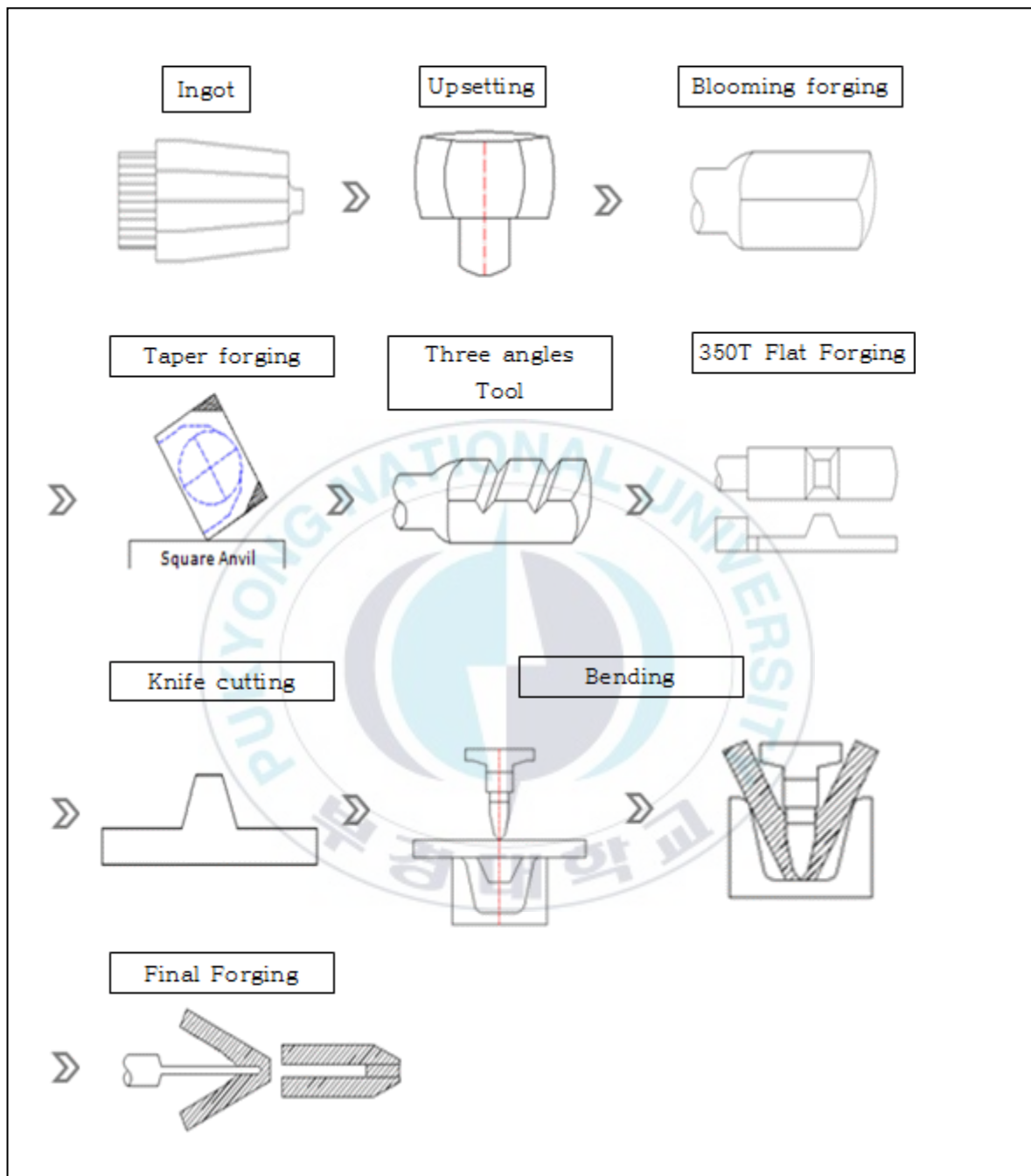


Fig. 2 Manufacturing Process of Crank Throw

2.2 피로(Fatigue)

크랭크스로우의 피로 계산 이론은 IACS UR M53에 의거한다. 엔진 메이커 및 이와 관련된 제작 업체는 피로 강도 개념 설계 단계와 제작상 혹은 운영상 문제가 발견될 시 우선으로 이 이론에 의거하였는지 검토하여 크랭크 축의 신뢰성을 평가한다. IACS UR 53의 크랭크스로우의 피로 설계 기준은 Von Mises Criteria를 이용하고 있으며,본 연구에서는 IACS UR 53의 부록 IV 에 제시된 Staircase 방법을 적용하고자 한다. Staircase 방법은 Dixon and Mood가 제안한 방법으로 1940년대 이 이론적 방법이 제시가 되었다. 실제 산업체 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 방법 중의 하나인데, 15개의 시편만으로 평균 피로 강도가 계산이 가능하여 비교적 빠른 시간 내에 피로 강도를 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 크랭크스로우 시험 재료

3.1 시험편 화학 조성 및 열처리 조건

본 연구에서 수행한 단조강 크랭크스로우의 재질은 S34MnV로써 MAN社 엔진의 크랭크샤프트에 사용되는 탄소강이다. 아래는 S34MnV의 화학조성과 실제 사용된 강괴의 Laddle 화학성분 분석치, 실제 시험편으로부터 분석된 화학성분 분석치는 Table.2와 3과 같다.

Table.2 Chemical Composition of Crank Throw

Material		C	Si	Mn	P	S	Cr	V	—
S34MnV	Max	0.50	—	1.40	0.020	0.020	0.30	0.12	—
	Nominal	0.34	0.25	—	—	—	—	—	—
	Min	—	—	1.00	—	—	—	0.60	—
Laddle		0.44	0.26	1.00	0.012	0.002	0.12	0.06	—

Table.3 Product Chemical Composition of Crank Throw

Ele.Name	Ave.	N = 1	N = 2	Ele.Name	Ave.	N = 1	N = 2
Fe	97.884	97.879	97.890	W	.00000	.00000	.00000
C	.43802	.44307	.43296	Co	.00000	.00000	.00000
Si	.24122	.24447	.23796	N	.00424	.00410	.00437
Mn	1.0452	1.0432	1.0473	INT	5.1172	5.1296	5.1049
P	.01643	.01611	.01675				
S	.00498	.00496	.00500				
Cu	.05928	.05839	.06016				
Ni	.05652	.05713	.05591				
Cr	.14675	.14720	.14629				
Sn	.00459	.00432	.00486				
Ti	.00000	.00000	.00000				
V	.06793	.06665	.06921				
Mo	.03045	.03154	.02936				
Nb	.00000	.00000	.00000				
B	.00015	.00009	.00020				
Al	.00000	.00000	.00000				

D:000 P:M0000 F:M CT:M N:2 SeohanENP QM Lab.

Group NEW Lowalloy Sample No. I150707_137205

기계적 물성과 피로시험에 요구되는 시편은 실제 제품을 파단하여 획득하였으며, 이때 실제 제품의 열처리 조건은 Table.4과 같다

Table.4 Conditions of Heat Treatment

Heat Treatment	Temperature(° C)	Holding Time(hr)	Cooling Method
Normalizing	880	17	Air
Tempering	600	17	Air



Fig. 3 The Crank Throw before Heat Treatment

Table.5 Operating Date of Furnace

Heat Treatment	Date
Normalizing	10. 2015 ~ April 11. 2015
Tempering	May 06. 2015 ~ May 07. 2015

본 연구에서 진행된 열처리는 단조강에서 가장 일반적으로 실시하는 불림과 뜨임을 순으로 실시하였다. 불림과 뜨임의 온도 및 유지시간은 ASTM A350/A350M 규격에 준하여 실시하였다. 본 제품은 ASTM 규격에서 요구하는 유지시간, 즉 소재 두께 기준으로 Inch당 최소 30분을 설정하되 하되, 충분한 확산효과를 주고 형상효과를 최소화하기 위해 각각 17시간으로 진행하였다.

3.2 시험편 채취 위치 및 정보

크랭크스로우의 자유단조에 의한 각 부위별 시험편 채취 위치 및 정보는 Fig.4와 Table에 나타내었다. 채취 부위는 크게 4영역(Fillet, Pin Hole, Web, Location A)으로 구분하였고 IACS UR M53와 MAN社에서 규정한 구역의 이름으로 구분하도록 한다. Location A는 선급 규정에 따라 양산품에 적용시 인장강도, 충격치, 경도값을 측정하는 위치이다. 각 선급별 규정이 약간은 상이하나, 보통은 Location A와 그 반대편 동일 위치 각 2sets로 채취하도록 하고 있다.

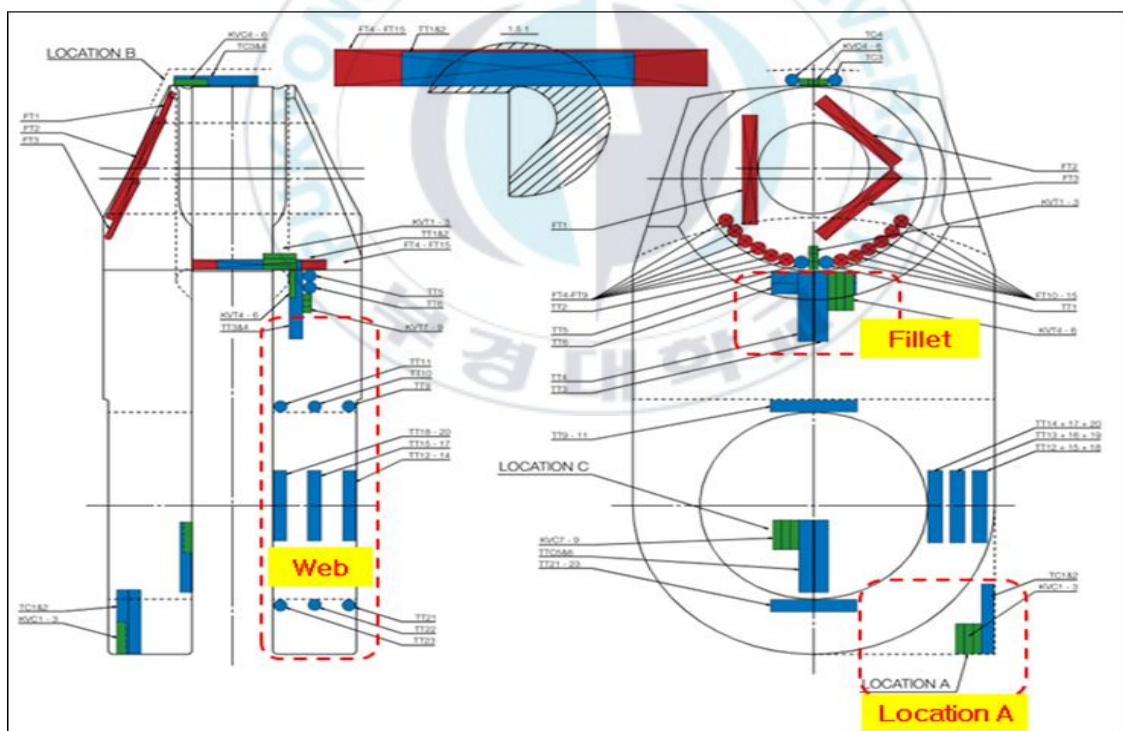


Fig. 4 Position of Test Pieces

4. 기계적 특성 시험 결과

크랭크스로우의 기계적 특성을 확보하기 위하여 본 연구는 IACS UR M53의 부록 IV에서 필수적으로 규정한 시험체의 기계적 특성을 시험 및 평가하였다. IACS에서 필수적으로 규정한 특성(chemical composition, mechanical properties, surface hardness)외에 제품 소재의 청정도 분석, 미세조직 관찰, 결정립도, sulphur print를 분석하였다. 따라서 본 연구에서 기대하였던 피로한도 예측에 요구되는 기본적인 데이터 확보를 통하여 더욱 신뢰성을 높이하고자 하였고, 본 연구 결과가 직접적으로 유사한 추후 연구에 도움이 되도록 하고자 하였다.

4.1 기계적 시험

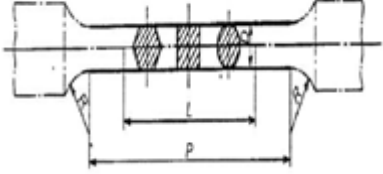
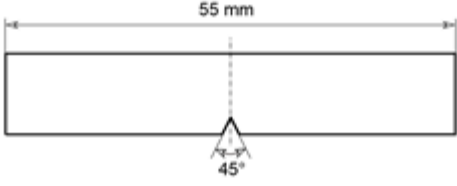
1) Test 규격

본 시험에 사용된 규격 및 시험편 형상은 Table.6 및 Table.7 과 같다.

Table. 6 기계적 물성 시험 적용 규격

시험 종류	적용 규격
인장	ISO 6892 ; Metallic materials – Tensile testing
충격	ISO 148 ; Steel – Metallic materials – Charpy pendulum impact test
경도	ISO 6506 ; Metallic materials – Brinell hardness test
Sulphur Print	ISO 4968 ; Steel – Macrographic examination by sulphur print (Baumann method)
청정도	ISO 4967 ; Steel –Determination of content of non-metallic inclusions – Micrographic method using standard diagrams
Grain Size	ASTM E114

Table. 7 Test Piece Geometry

구분	Tensile Test	Impact test
Size	$\Phi 14XL70$	$\square 10XL55$ Notch 2v
Geometry	 L : 70mm, D : 14mm	

2) 시험편 수량 및 위치

본 시험에 사용된 기계적 물성의 시험편의 구성은 Table. 8 과 같다.

Table. 8 Test Pieces Information

Kind of Test	Position			
	Location A	Fillet Area	Web	Q' ty
Tensile test	TC1-1, TC1-2 TC2-1, TC2-2	TT1~TT6	TT9~TT23	25
Impact test	KVC1~KVC3	KVT1~KVT9	—	12
Hardness	TC1, TC2	—	TT12, TT16, TT20	5
Microstructure	TC1	TT1	TT12	3
Surface for sulphur print and microstructure				1

4.2 시험 결과

1) 인장시험

본 연구에서 진행된 인장시험은 ISO 6892에 의거하여 단면직경이 $\phi 14$, 표점 거리가 70mm인 Round형 인장시험편을 사용하였다. 시험편의 위치 및 수량은 MAN社에서 제시하는 기준에 따라서 채취하였다. 시험편의 채취는 크게 3부분으로 나누어져 있으며, 각각 Fillet Area, Web, Location A 부분으로 크랭크스로우 형상과 연계하여 명칭을 부여하였다. 여기서 Location A는 실제 제품 사용시 포함되지 않는 구획으로, 양산품이 생산되었을 때 기준 물성을 부여하는 부위로 사용된다. 여기서 획득하여진 인장강도는 MAN社의 피로시험의 초기하중에 관련된다.

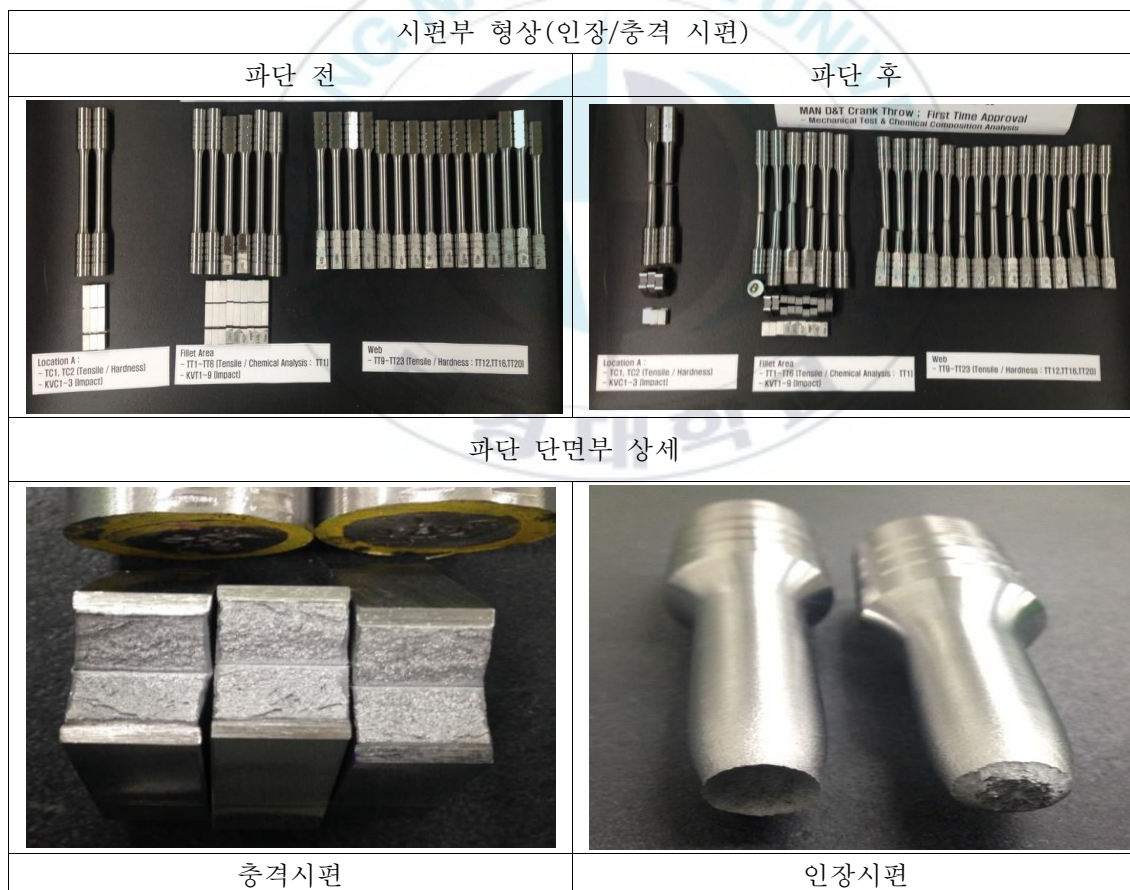
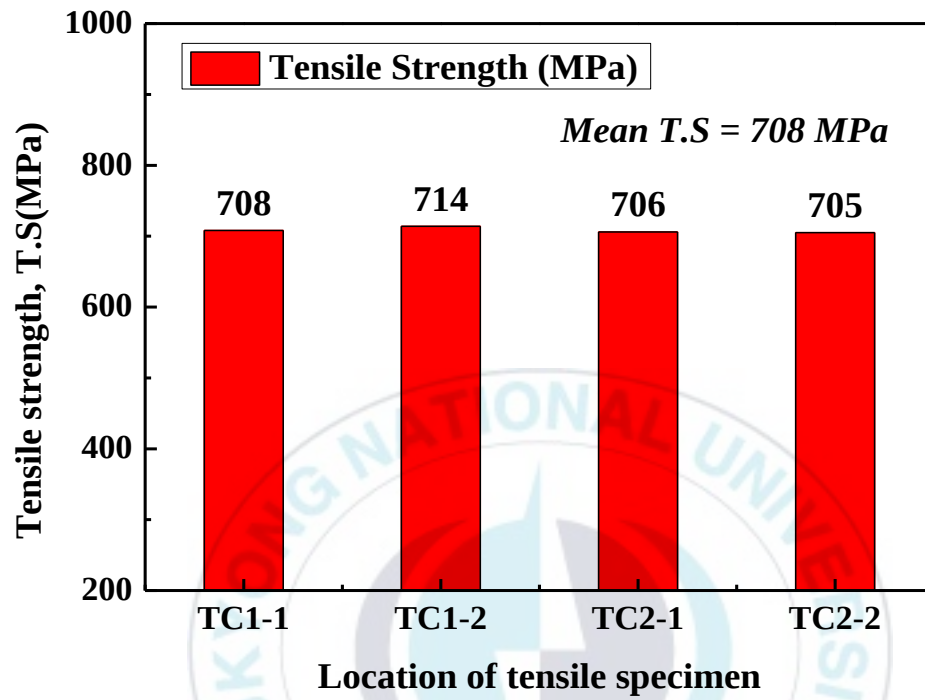


Fig. 5 인장시험 및 충격시험 전/후 시험편

Table.9 Mechanical Properties of Crank Throw

Position	T.P Number	Mechanical Test					Remark
		MPa		%	%	HB	
		Y.S ¹	T.S ²	E.L ³	R.A ⁴		
Location A	TC1-1	418	708	20	45	206	1. Yield Strength 2. Tensile Strength 3. Elongation 4. Reduction Area
	TC1-2	430	714	21	47	206	
	TC2-1	411	706	21	46	206	
	TC2-2	419	705	21	46	206	
Fillet Area	TT1	429	716	20	49	—	
	TT2	443	715	20	49	—	
	TT3	424	696	22	47	—	
	TT4	415	684	23	47	—	
	TT5	449	710	21	49	—	
	TT6	425	714	21	50	—	
Web	TT9	443	706	21	48	—	
	TT10	444	706	20	47	—	
	TT11	442	707	20	47	—	
	TT12	445	715	20	46	212	
	TT13	432	696	20	47	—	
	TT14	424	705	22	48	—	
	TT15	430	718	20	49	—	
	TT16	440	710	21	49	212	
	TT17	461	707	21	50	—	
	TT18	451	706	21	50	—	
	TT19	442	708	22	50	—	
	TT20	437	700	21	49	206	
	TT21	436	716	21	51	—	
	TT22	429	706	21	51	—	
	TT23	390	701	21	49	—	

Table.10 Test results of Tensile Strength



2) 충격시험

충격시험의 경우 2mm V-Notch를 갖는 샤르피 충격시편으로 제작하여, Fillet Area와 Location A에서 채취하였다. 충격시험의 경우, MAN社가 제시한 기준이 외에 0° C에서의 물성도 포함하여 시험을 실시하였다.

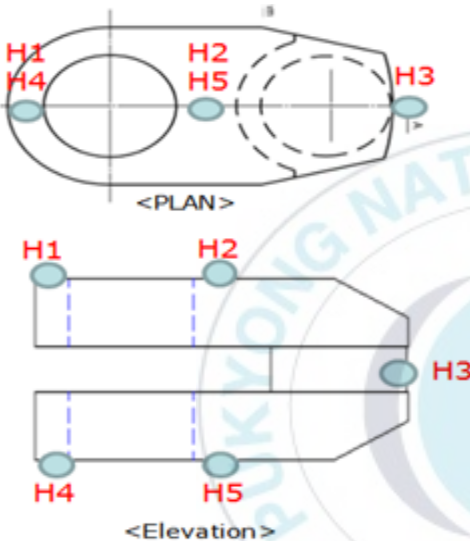
Table.11 Test results of Impact Test

Position	T.P Number	Impact Test : Notch 2V					Remark
		Temp(° C)	Value			Avg	
Location A	KVC1~3	20° C	36	36	28	33	
	KVC1~3	20° C	39	36	28	37	
	KVC1~3	0° C	21	32	23	25	
	KVC1~3	0° C	29	22	20	24	
	KVC1~3	0° C	28	25	25	26	
	KVC1~3	0° C	27	25	23	25	
Fillet Area	KVT 1~3	20° C	34	37	35	35	
	KVT 4~6	20° C	31	29	28	29	
	KVT 7~9	20° C	28	27	26	27	

3) Hardness Test

표면 경도 값의 경우 총 5개 구역에서 3회에 걸쳐 휴대용 반발식 경도계인 에코팁 경도기로 측정하였다.

Table.12 Test results of Surface Hardness

Surface Hardness	Position	Test Result (HB)			
		1	2	3	Avg
 <PLAN> <Elevation>	H1	211	211	214	212
	H2	212	212	212	212
	H3	209	202	205	205
	H4	197	197	198	197
	H5	209	202	205	203
Actual Figure of Crank Throw					
					

4) Microstructure examination

미세 조직 시험은 인장시험편의 Grip부를 절단하여 분석하였다. 시험편은 각각 Location A, Fillet Area, Web에 위치하는 조직을 분석하였는데, 이를 통해 크랭크스로우의 각 부위별 미세조직의 형태를 알 수가 있었다. 본 시험에서는 페라이트와 펄라이트의 균일한 미세조직과 결정립도가 약 ASTM E114 기준 No.9을 얻을 수가 있었다.

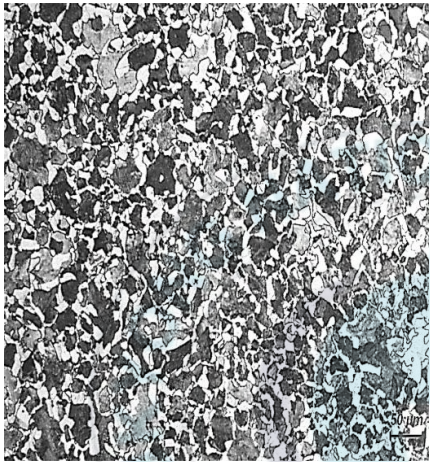
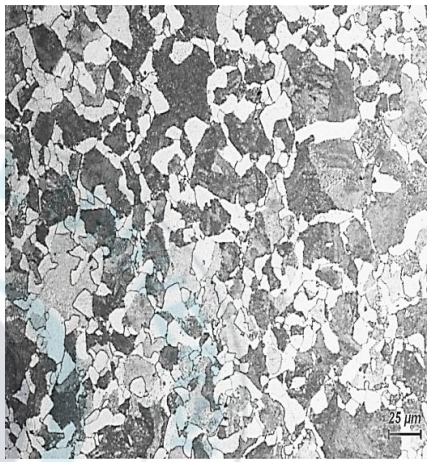
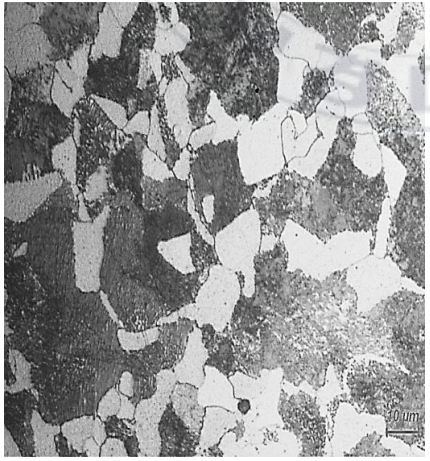
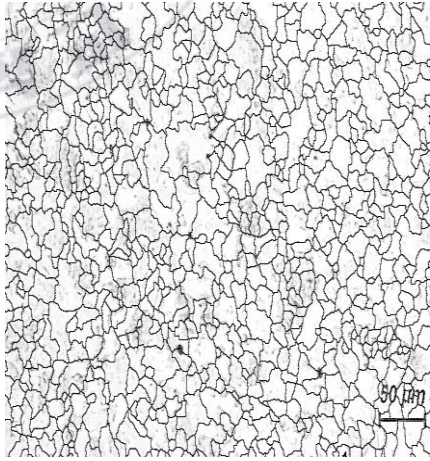
Mag	Microstructure Picture	Mag	Microstructure Picture
x100		x200	
Mag	Microstructure Picture	Mag	Grain Size
x500		x100	
—	—	G.No	9.3 (Grain size : $220\mu\text{m}^2$)

Fig. 6 Microstructure of Location A

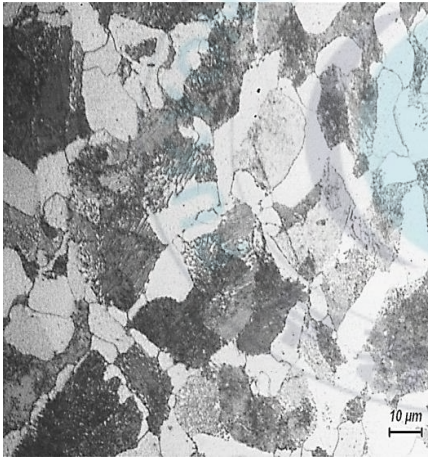
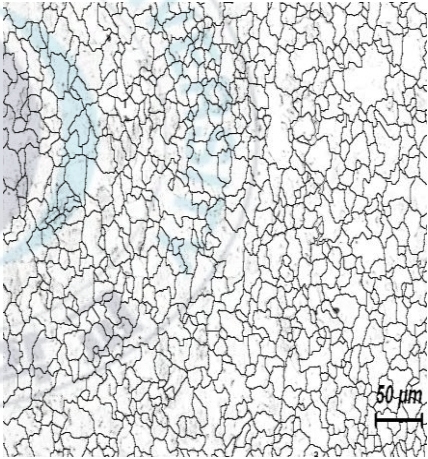
Mag	Microstructure Picture	Mag	Microstructure Picture
x100		x200	
Mag	Microstructure Picture	Mag	Grain Size
x500		x100	
—	—	G.No	9.0 (Grain size : $220\mu\text{m}^2$)

Fig. 7 Microstructure of Fillet Area

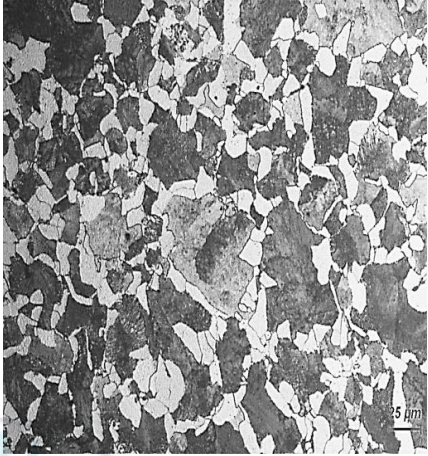
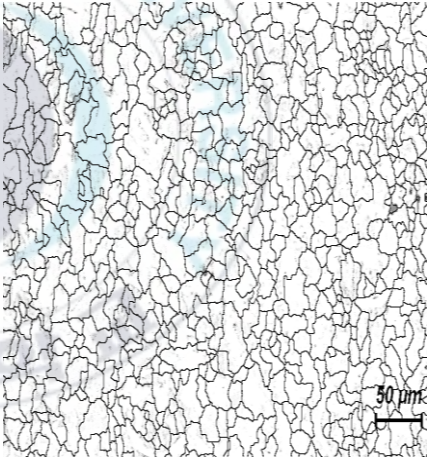
Mag	Microstructure Picture	Mag	Microstructure Picture
x100		x200	
Mag	Microstructure Picture	Mag	Grain Size
x500		x100	
—	—	G.No	9.0 (Grain size : $220\mu\text{m}^2$)

Fig. 8 Microstructure of Web

5) Sulphur Print

크랭크스로우의 핵심 공정인 벤딩부를 Fig.9와 같이 절단하여, 해당부 조직의 건전성을 평가하였다. 본 시험결과 편석대와 기타 다른 조직 불균질은 발견하지 못하였다. 또한 벤딩 형태의 단류선이 관찰 가능하였다.

ISO 4968 ; Steel – Macrographic examination by sulphur print (Baumann method)

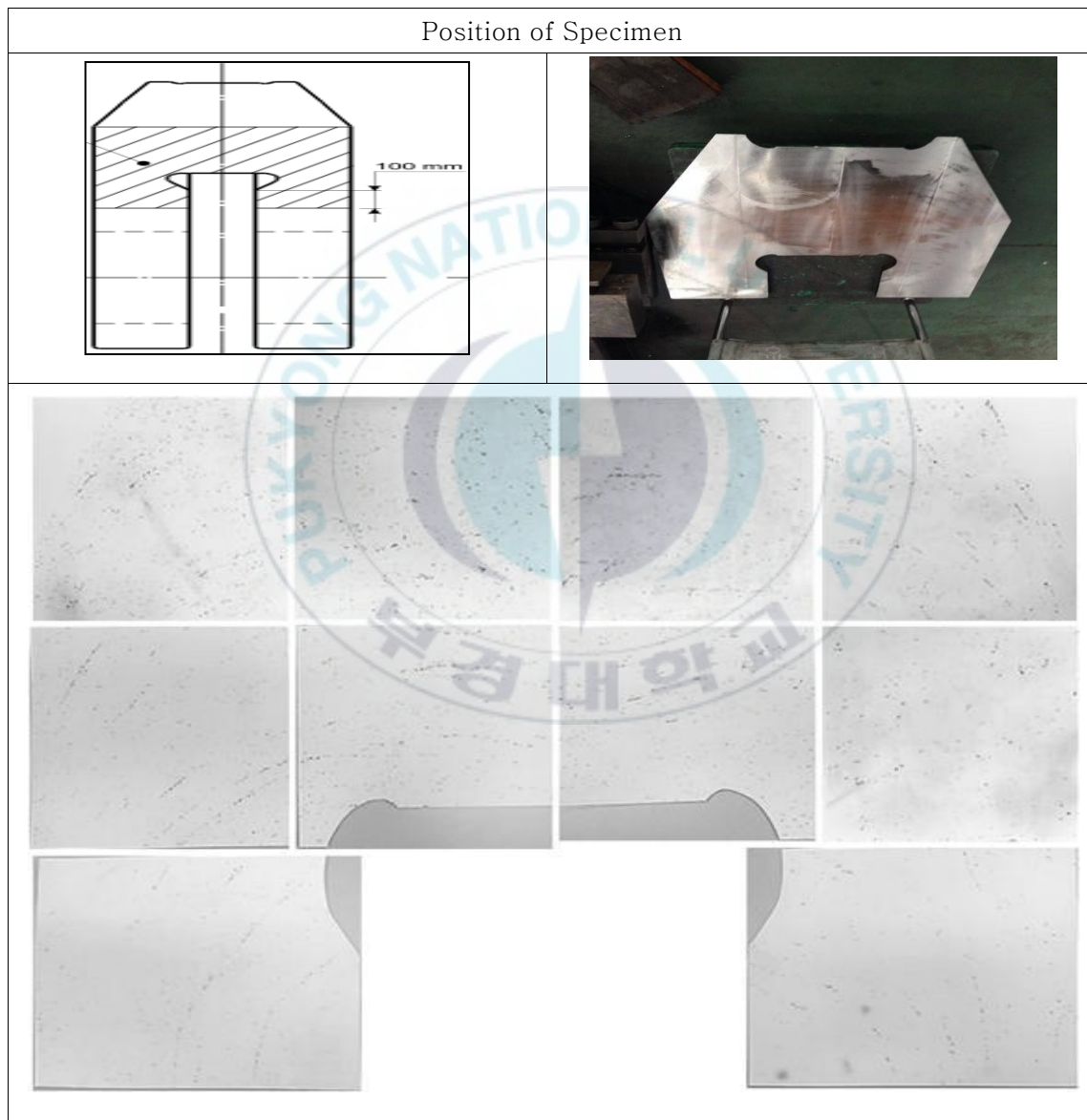


Fig. 9 Sulphur Print

6) Cleanliness

크랭크스로우는 기본적으로 각 선급이 요구하는 사항을 만족시켜야 한다. 청정도 또한 필수적으로 검증이 되어야 하는 사항으로 본 시험에서는 ISO 4967 규격에 의거하여 진행하였다. ISO 4967에 의거한 청정도 시험은 DNV 선급에서 규정하였다.

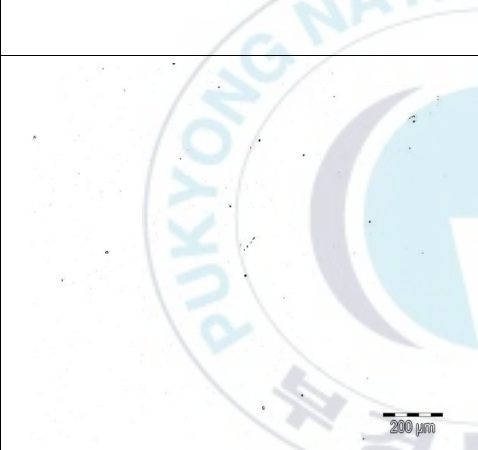
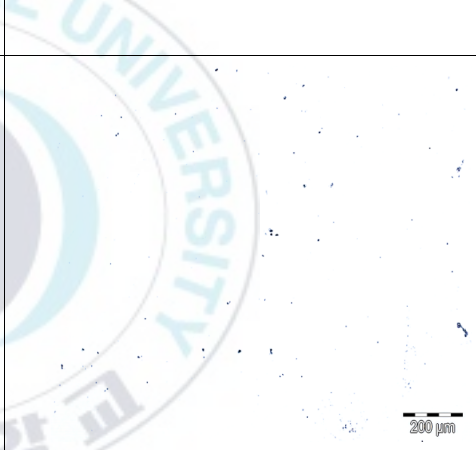
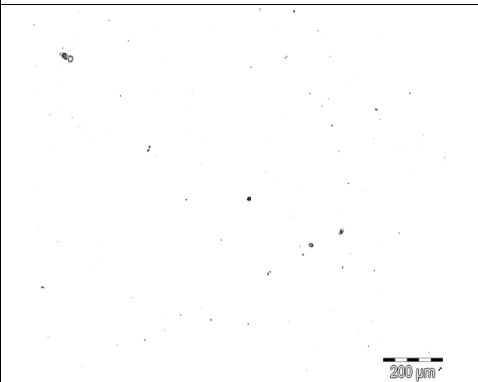
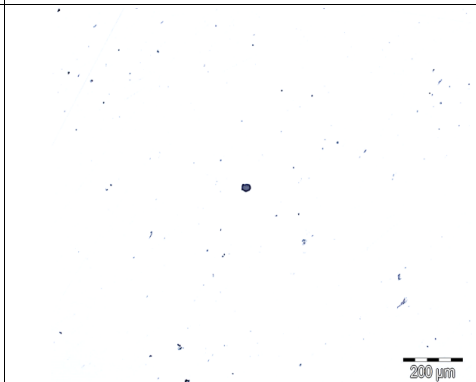
	ISO 4967 – NMI Rating Rectangle								
Sample Area mm ²	Type A		Type B		Type C		Type D		DS Single Globular
	Fine (t)	Thick (h)	Fine (t)	Thick (h)	Fine (t)	Thick (h)	Fine (t)	Thick (h)	
	1	1	1.5	1	1	1	1	1	1
	0	–	0	–	–	–	1	1	1
Type A : Sulfide, Type B : Aluminize, Type C : Globular Oxide, Type DS : Single Globular									
No.1					No.2				
No.3					No.4				

Fig. 10 Cleanliness of Crank Throw

5. 피로한도 시험 결과

5.1 피로시험

1) 피로시험 절차

Staircase method에 의한 설계 피로 강도 측정은 IACS UR M53, Appendix IV에 의거하고 있음을 앞서 제시한 바가 있다. Staircase method는 피로 강도를 계산함에 있어 상대적으로 시편수와 시간을 줄여주는 장점과 더불어 신뢰할 수 있는 평가치를 보여주고 있다. 이 절차에 의거한 MAN社の 피로시험 과정은 Fig.11에 도식화하였다.

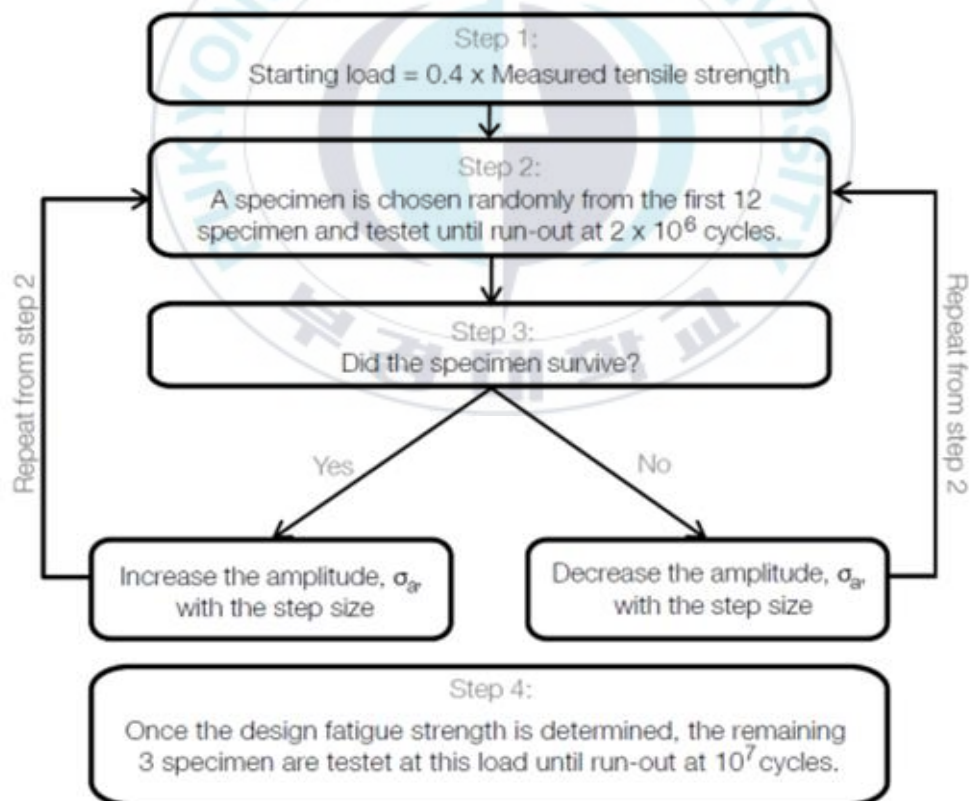
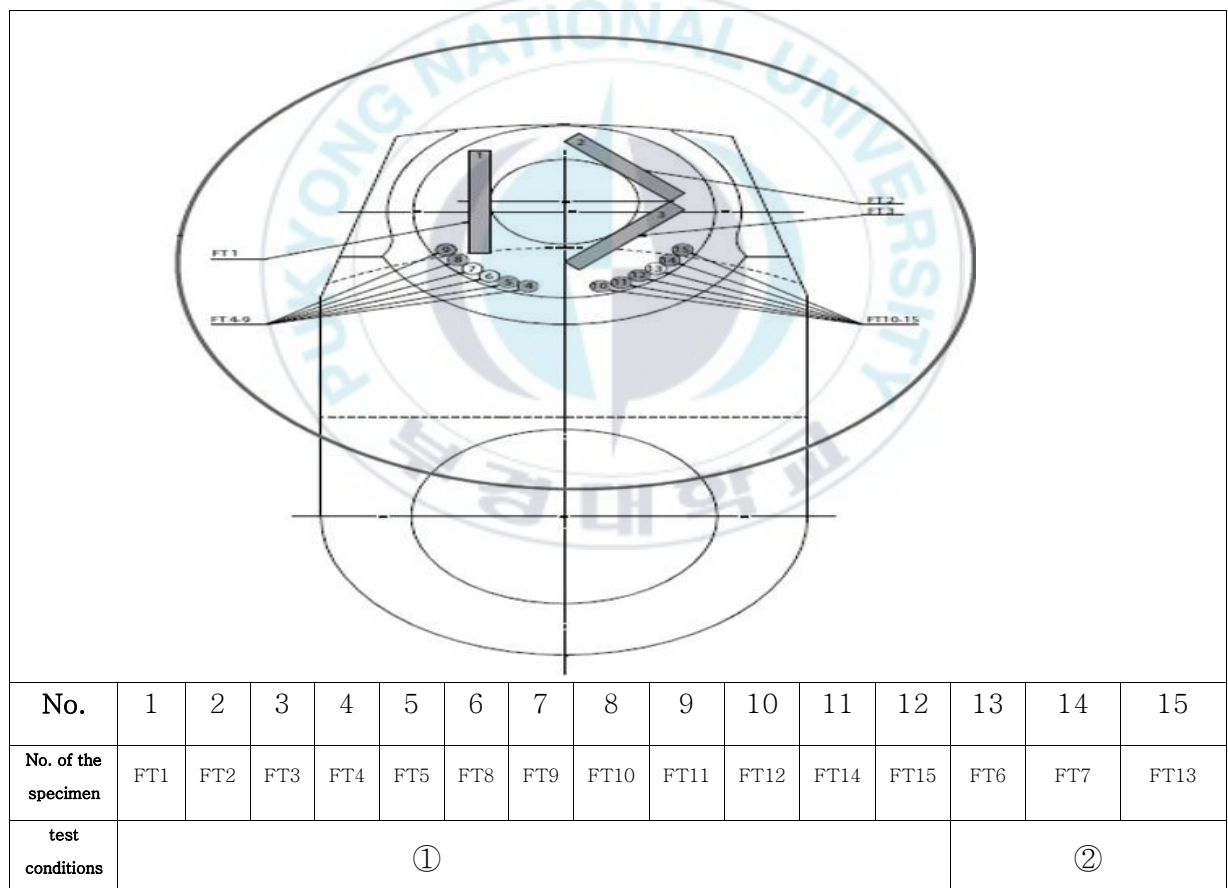


Fig. 11 The process of Fatigue Testing

아래는 시험 조건을 상세화하였다. 도식화된 절차에 의거하여 실제 시험 결과를 나타내었다.

구분	Fatigue Test
Size	Dumbbell type specimen (D:10mm)
Geometry	



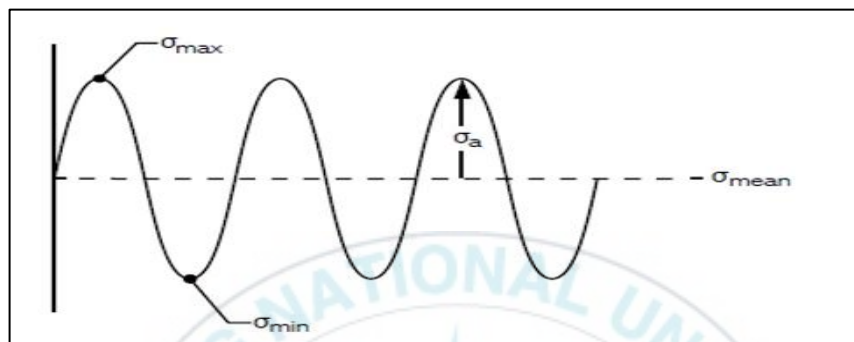
※Above test condition “①” means the 2×10^6 cycles, for staircase.
and “②” means 1×10^7 cycles

Fig. 12 Fatigue specimen information

2) 시험 조건

피로시험은 하중제어 모드에 응력비가 -1인 인장/압축응력을 시험편에 가하였고, 응력 주기는 20Hz를 주었다. 상세한 시험 조건은 아래와 같다.

① Control mode : Load



$$\sigma_{max} = \text{max. load.}$$

$$\sigma_{min} = \text{min. load.}$$

$$\sigma_a = \text{amplitude} = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2.$$

$$\sigma_{mean} = \text{mean load} = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2.$$

Fig.13 Wave shape of the stress cycles : Sine tapered

② Frequency of the stress cycles : 20 Hz

③ Stress ratio (R) : -1

$R < 0$: Push/pull, the test cycles between compressive and tensile loading

$0 \leq R < 1$: The test is performed in pure tensile, ($\sigma_{min} \geq 0$)

$R > 1$: Pure compressive loading ($\sigma_{max} < 0$)

④ Mean stress : 0 MPa

⑤ Stress step size : 20 MPa

⑥ Starting load : 283 MPa

Starting load = 0.4 x Measured tensile strength 여기서, 초기하중은 인장시험의 평균값인 707Mpa를 대입하여 283Mpa를 구하였다.

Starting Load of Step 1

$$= 0.4 \times 707 \text{ Mpa (Measured tensile strength)} = 283 \text{ Mpa}$$

3) 시험장치



Fig. 14 Photos of the specimen set-up(100kN MTS Landmark, Model 370)

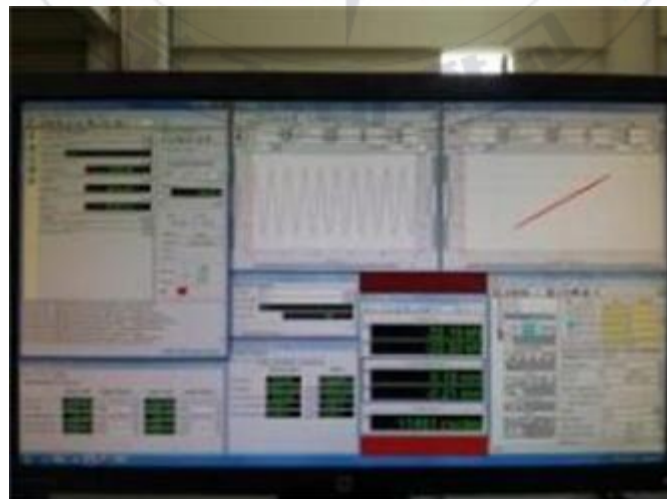


Fig. 15 Control panel view for FT1 specimen

5.2 피로한도 시험 결과

1) Results of the test

1)–1. Results of the 2×10^6 cycles test

Table 13 Results of the 2×10^6 cycles

σ_a (MPa)	O : Survival						X : Failure						
	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT8	FT9	FT10	FT11	FT12	FT14	FT15	
363													
343													
323							X						
303		X		X		O		X		X		X	
283	O		O		O				O		O		
263													
Total	Number of Failure					6		Number of Run Out					6

1)–2. Results of the 1×10^7 cycles test

Table 14 Results of the 1×10^7 cycles

Design Fatigue Strength	O : Survival		X : Failure
	FT6	FT7	FT13
275	O	O	O
Total	Number of Run Out		3

2) Dixon and Mood Approach

Table 15 Results of the “Test 1” (2×10^6 cycles)

Amplitude of the stress (MPa)	X (Failure)	O (Survival)	–	N	A	B
			i	ni	i × ni	i ² × ni
323	1		2	0	0	0
303	5	1	1	1	1	1
283	0	5	0	5	0	0
Total	6	6	Σ	6	1	1

Items	Measurement units	Results of the test	Remarks
Number of Cycles	Cycles	2×10^6	N
Lowest Stress Level	MPa	283	S_0
Stress Step	MPa	20	d
Failure/Run Out	–	0.5	x (Factor)
Mean Fatigue Strength	MPa	296.3	S_m
Standard Deviation	MPa	10.6	S_{sd}
Design Fatigue Strength	MPa	275.1	S_d

$$S_m = S_0 + d \left(\frac{A}{N} + x \right) = 296.3 \text{ MPa}$$

$$S_{sd} = 1.62 + d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right) = \text{MPa} \quad (\text{but, } \frac{NB - A^2}{N^2} = 0 \text{ only})$$

$$\text{if } \frac{NB - A^2}{N^2} = 0.14 < 0.3, S_{sd} = 0.53 \times d(20) = 10.6 \text{ MPa}$$

$$S_d = S_m - 2 \times S_{sd} = 275.1 \text{ MPa}$$

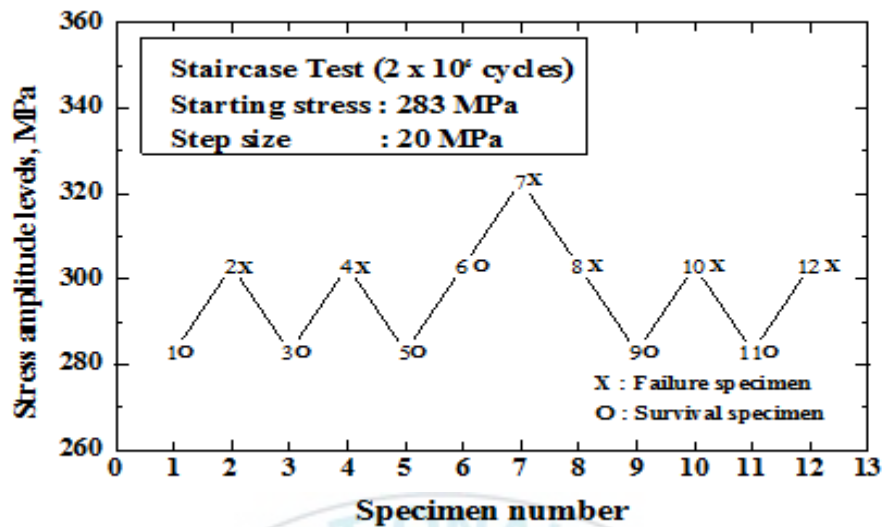


Fig.16 Notional staircase test data of crank throw

Fig. 16은 staircase법에 의하여 구한 피로실험 결과를 나타낸 것이다. Starting 응력진폭은 283 MPa이며, 그림 중에 표시한 것처럼 O 시험편은 200만 사이클 까지 파단되지 않음을 나타내고, X 시험편은 파단이 일어남을 나타낸다. Dixon and Mood 접근법(DMA)에 의한 피로한도에 대한 정규분포의 평균치와 표준편차를 구하여 Table 15의 결과로 요약할 수가 있다. 상기 피로시험 결과를 통하여 피로한도 값을 확률론적으로 고찰이 가능하다. 크랭크스로우의 피로한도는 평균이 296.3MPa, 표준편차가 10.6 MPa인 정규분포에 따르고 있다. 그러나 이러한 통계적 파라미터는 실제로 저주기 event에 있어서 파단과 생존 시험편의 응력진폭으로 나타나는 것을 유의할 필요가 있다.

5.3 피로한도 예측

본 시험 결과를 신뢰도가 90.0, 95.0, 97.0, 99.0 그리고 99.9% 일 때의 설계피로강도를 계산하여 Table 16에 정리하여 나타내었다. 상기 시험 결과로부터 제작시의 확률에 대한 소재의 설계피로강도 값을 예측할 수 있음을 확인하였다.

Table 16 Design fatigue strength for each reliability

Reliability	(Probability of failure)	Design fatigue strength
90.0	(10.0)	282.6
95.0	(5.0)	278.8
97.0	(3.0)	279.3
99.0	(1.0)	271.6
99.9	(0.1)	264.5

6. 결론

S34MnV 재질의 자유 단조로 제작된 Crank Throw에 대한 제품의 기계적 성질과 Staircase 법에 의한 피로실험을 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. S34MnV 의 자유 단조로 제작된 Crank Throw는 불림과 뜨임 열처리를 하였을 경우 약 700Mpa의 인장강도와 약 190~210HB의 경도, 충격치는 상온에서는 약 30J, 0℃에서는 약 25J(2v Notch)의 결과를 얻을 수가 있었다.
2. 본 연구에서 수행된 제작방법에 의거하여 Crank Throw 를 제작 시, 페라이트와 펄라이트의 균일한 미세조직과 결정립도가 약 ASTM E114 기준 No.9을 얻을 수가 있다.
3. Staircase 법에 의하여 정현파형, 응력 비 -1, 완전 양진 축하중 제어에 의한 일정 진폭 피로 실험을 20Hz로 실시할 때, Dixon and Mood Approach (DXA) method 접근법에 의하여 평균피로강도와 표준편차는 각각 296.3 및 10.6 MPa 로 나타났다.
4. 본 결과를 이용하여 확률적으로 Crank Throw의 설계피로강도 값을 결정할 수 있음을 알았다

◆ 참고문헌

- 1) 대한조선학회 (2011), "조선기술", pp247-248, 지성사
- 2) IACS (2004), "Calculation of Crankshafts for IC", IACS UR M53
- 3) CIMAC (2009), "Proposal by CIMAC WG4, IACS UR M53, Appendix IV Guidance for evaluation of Fatigue Tests"
- 4) 김동영, 김영득, 김동권, 김재철 (2003), "선박용 크랭크스로우의 자유 단조 예비성형체 형상", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집 pp191
- 5) KR, 2015, 선급 및 강선규칙/적용지침, 2편, 1장, 제 6절, 표 2.1.80
- 6) ASTM, A350/A350M-07, 5.4.2.2
- 7) MAN B&W (2013), "Crank Throw Forged Steel Crank Throw; First-Time Approval", 0743078-7
- 8) MAN B&W (2014), "Testing Fatigue Testing - Staircase Method", 0743670-5
- 9) MAN B&W, P182-4 "Forged Steel type S34MnV"
- 10) 김선진, 황정준, 김태수, 송현철 (2015), "대형 박용 Crank Throw 부품의 피로한도 신뢰도 예측", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집 pp281-282
- 11) Dixon W.J. and Mood, A.M. (1948). "A Method for Obtaining and Analyzing Sensibility Data", J. Am Stat Assoc. Vol. 43 pp 109-126.
- 12) Kubo, H. and Mori, H. (2005), "Technical developments and Recent Trends in Crankshaft Materials", Kobelco Technology Review No. 26, pp 37-42.
- 13) 김정렬(2014), "선박용 대형 저속 2행정 디젤 엔진의 크랭크 축계 파손에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 기계시스템 공학과, pp7
- 14) 송민철, 신상범, 김병화, 주성호, 이명규 (2005), "대형 크랭크 스로우의 형단조 적용 연구", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집 pp.180.

- 15) 강대선, 이돈출, 김태언, 박정대 (2006), "선박용 4행정 디젤엔진의 크랭크축 강도해석에 관한 연구", 선박안전기술공단 Journal of the Korea Ship Safety Technology Authority no.21 pp4-13.



감사의 글

더 늦으면 분명 후회할 것 같은 마음이 앞서 시작한 대학원 진학이 언제 끝내려나 싶었는데 어느덧 마감하는 글을 적고 있습니다. 개인적인 욕심에 사랑하는 가족과 같이 일하고 있는 동료에게 부담을 주지는 않았나 하는 생각이 듭니다. 저에게 배려를 해주신 모든 분들께 이 글을 통해 감사의 말씀을 올립니다.

사랑하는 나의 아내 지안이 엄마, 느닷없이 공부를 조금 더 해보겠다고 했을 때 순간의 망설임 없이 동의해주고, 학교 다닌다고 지안이하고 많이 놀아주지도 못했는데 묵묵히 뒷바라지 해줘서 너무 고마웠어. 올해 둘째도 태어나는데 가장으로서 흔들림 없이 우리 가족을 책임지고 지켜줄게 사랑해,

직장 생활과 같이 학업을 진행하는데, 여러분들의 배려가 없었다면 고민과 걱정이 많았을 것인데, 이러한 것들을 생각하지 않도록 배려해주신 동료들에게 고마움을 표하고자 합니다. 특히, 좋은 뜻이라고 학업을 지지해주신 배병철부장님, 물심양면으로 도움 주신 이은홍 차장님 그리고 저를 대신하여 고생을 한 윤홍규 사원에게 다시 한번 고개 숙여 인사 드립니다.

저의 지도 교수 김동준 교수님, 겨우 한 학기 수업을 같이 듣고 작년에 처음 뵈어 도움을 청하였지만 흔쾌히 받아주셨고 또한 열정적인 수업으로 배움의 폭을 넓혀주신 데 감사 드립니다. 마지막으로 김선진 교수님, 교수님의 지도 및 도움이 없었다면 비록 작은 성과이지만 결코 해내지 못했을 것입니다. 감사합니다.

저는 인복은 타고난 것 같습니다.

이번 논문을 통해 부족한 것을 많이 깨달았고, 주변 분들의 소중한 배려를 바탕으로 더욱 성숙한 사람이 되도록 노력하겠습니다. 끝으로 이 세상의 구성원으로 우뚝 설 수 있게 도와주고 길러주신 어머님께 감사의 인사를 올립니다.

2016. 1월 생일날

송현철 올림