



## 저작자표시 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.

- 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](#) 

工學碩士 學位論文

열간단조 금형 육성용접부  
내균열성 및 내열충격성의  
평가방법에 관한 연구



2010年 2月

釜慶大學校 大學院

조선시스템관리공학협동과정

金星昊

工學碩士 學位論文

열간단조 금형 육성용접부  
내균열성 및 내열충격성의 평가방법에 관한 연구

指導教授 趙相明

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2010年 2月

釜慶大學校 大學院

조선시스템관리공학협동과정

金星昊

金星昊의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2010年 2月



主 審 工學博士 金 仁 喆 (印)

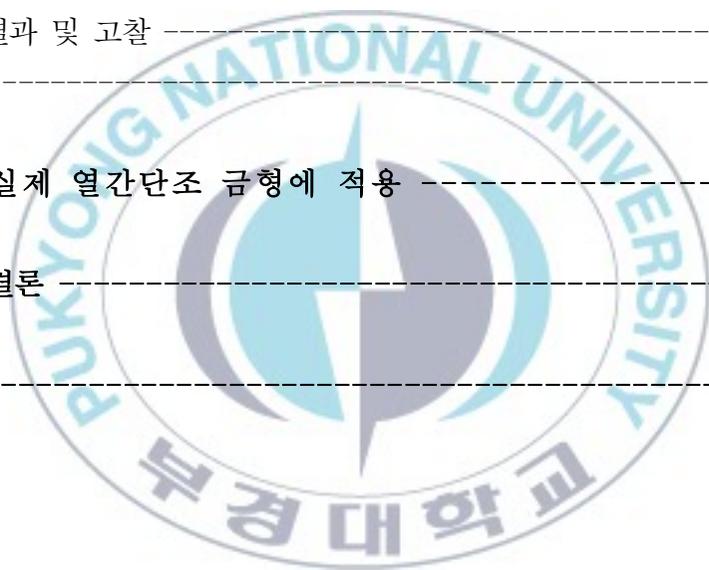
委 員 工學博士 具 滋 三 (印)

委 員 工學博士 趙 相 明 (印)

# 목 차

Abstract	1
제 1 장 서론	2
1.1 연구배경 및 필요성	2
1.2 연구목적 및 개요	3
제 2 장 이론적 배경	4
2.1 열간단조 금형	4
2.2 경화육성용접	9
2.3 FCAW를 이용한 경화육성용접	10
2.4 용접형 열간단조 금형	11
2.5 육성용접부 화학성분	12
2.6 육성용접부 표면 경도 & 내마모 특성	13
2.7 육성용접부의 기계적 성질 평가방법의 정의	14
2.8 굽힘시험의 극한 변형량 및 $\sigma_{bf}$ 정의	15
제 3 장 내균열성 평가를 위한 상온 굽힘시험	16
3.1 서언	16
3.2 시험편 형상 및 시험 방법	16
3.2.1 시험편 형상	16
3.2.2 시험 방법	17
3.3 시험 결과 및 고찰	18
3.3.1 상온 굽힘시험 채택배경	18
3.3.2 Bending stress 계산	19
3.3.3 결과 및 고찰	20
3.4 결론	27

제 4 장 내열충격성 평가를 위한 고온 굽힘시험 -----	28
4.1 서언 -----	28
4.2 J. W. Kim 등의 논문 검토 -----	28
4.3 시험편 형상 및 시험 방법 -----	29
4.3.1 시험편 형상 -----	29
4.3.2 시험 방법 -----	29
4.4 시험 결과 및 고찰 -----	31
4.4.1 고온 굽힘시험의 타당성 -----	31
4.4.2 다양한 선행연구와 본 연구의 비교 -----	32
4.4.3 결과 및 고찰 -----	33
4.5 결론 -----	40
 제 5 장 실제 열간단조 금형에 적용 -----	 41
제 6 장 결론 -----	42
참고문헌 -----	43



# A Study on Assessment Method of Crack resistance and Thermal shock resistance in Hardfacing for Hot Forging Die

Sung-Ho, Kim

*Department of Shipbuilding Systems Management Engineering, The Graduate School,  
Pukyong National University*

## Abstract

Hardfacing is one of the frequently applying method to increase surface hardness in hot forging die. Recently, hardfacing receives great attention due to it's repair availability and low cost. In hot forging die, crack resistance and thermal shock resistance have been considered as major properties, However there are few studies for the assessment of these properties. So, it is necessary to establish the assessment method for crack resistance and thermal shock resistance in hardfacing for hot forging die. In this study, lux cored arc welding was applied to make hardfacing welds. Three point bending test was carried out to assess hardfacing weld's crack resistance, and high temperature bending test using salt bath was used for thermal shock resistance. Consequently, we could assess crack resistance and thermal shock resistance of hardfacing welds for hot forging die quantitatively.

Key words : Hardfacing, FCAW, Bending test, Thermal shock, Salt bath, crack resistance

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 필요성

현재 열간단조 금형을 제작함에 있어 육성용접을 하여 기계가공 후 제작하는 방법이 금형강인 STD61, STD11 등으로 제작하는 방법에 비해 금형의 보수, 저가의 제작비용 등의 이점을 가지고 있기 때문에 점차적으로 증가하고 있는 추세이다<sup>1)</sup>. 하지만 육성용접용 FCW (Flux Cored Wire)는 대부분 고가의 수입산 Wire가 차지하고 있다. 이에 국내 회사에서 외국산 Wire를 벤치마킹하여 육성용접용 FCW를 개발하여 실제 금형에 적용하였으나, 외국산 Wire로 제작한 열간단조 금형의 수명인 8000 타점의 약 1/10 수준에 불과한 700 타점 전후에서 금형에 균열과 마모가 발생하는 문제점이 발생하였다.

이러한 문제점을 극복하기 위해서 Wire의 개선이 요구되나, 개선방향을 잡기 위한 육성용접부의 내균열성 및 내열충격성의 평가방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히 열간단조 금형에 있어서 중요한 내열충격성의 경우 가열과 냉각의 반복 Cycle에 의한 Thermal shock의 평가가 대부분이며 이러한 실험들은 높은 Cycle로 인해 많은 시간이 걸리며, 또한 가열과 냉각을 오갈 수 있는 고가의 시험장치가 요구된다<sup>2)</sup>.

그러므로 육성용접부의 내균열성 및 내열충격성을 평가할 수 있는 방법에 대한 연구와 특히 내열충격성을 시간이 적게 걸리면서도 경제적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

## 1.2 연구 목적 및 개요

본 연구의 목적은 열간단조 금형 육성용접부의 내균열성 및 내열충격성을 평가할 수 있는 방법에 대한 검토와 특히 내열충격성을 짧은 시간 내에 경제적으로 평가 할 수 있는 시험법을 고안하는 것이다. 따라서 육성용접부의 내균열성을 평가하기 위한 상온 굽힘시험을 실시하였고, 내열충격성을 평가하기 위해 염욕로를 이용하는 고온 굽힘시험을 실시하여 경제적인 방법으로 육성용접부를 평가할 수 있는 시험법을 제안하였다.



## 제2장 이론적 배경

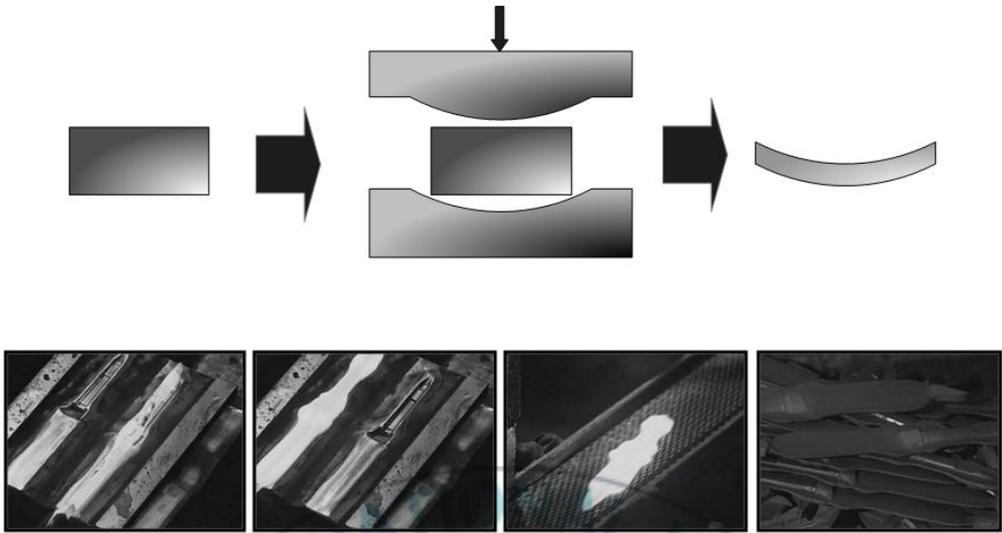
### 2.1 열간단조 금형

#### 2.1.1 금형의 사용환경

단조는 고체인 금속재료를 해머 등으로 두들기거나 가압하는 기계적 방법으로 일정한 모양으로 만드는 것을 의미하는데 그 중 재료의 재결정 온도 이상에서 단조를 하는 것을 열간단조(熱間鍛造)라고 한다.

일반적으로 열간단조 금형은 Fig. 2.1과 같이 1000℃ 이상인 고온의 재료와 금형의 표면이 반복접촉하게 되는데 이때 재료와 금형의 표면이 접촉할 때 가열이 되고, 접촉을 마치고 금형이 이탈될 때 냉각이 되는 환경에 놓이게 된다. 또한 이형체의 사용은 급속가열 및 급속냉각의 열적 피로현상을 일으키고 반복적인 가압은 금형에 기계적 피로현상을 수반하게 한다.

열간단조 공정시 금형의 형상에 따라 서로 다른 손상기구가 작용하게 되며, 반복적인 금형의 사용은 결국 금형에 극심한 손상을 일으켜 금형으로써의 기능을 상실하게 된다.



**Fig. 2.1 Schematic of hot-forging process**



## 2.1.2 금형 내의 Metal flow

금형 내에서 고온의 재료는 금형의 형상에 따라 원래의 형상에서 금형의 형상으로 변하게 되는데 이때 Fig. 2.2와 같이 번호순서대로 금형 내에 Metal flow가 생기며 금형의 표면과 재료 사이에 마모가 발생하게 된다. Flash는 금형의 상형과 하형 사이의 형할선으로 밀려나오는 여분의 금속이 들어가도록 하여 금형 내 재료의 흐름을 돕는 역할을 하며 마찰력을 줄이기도 한다.

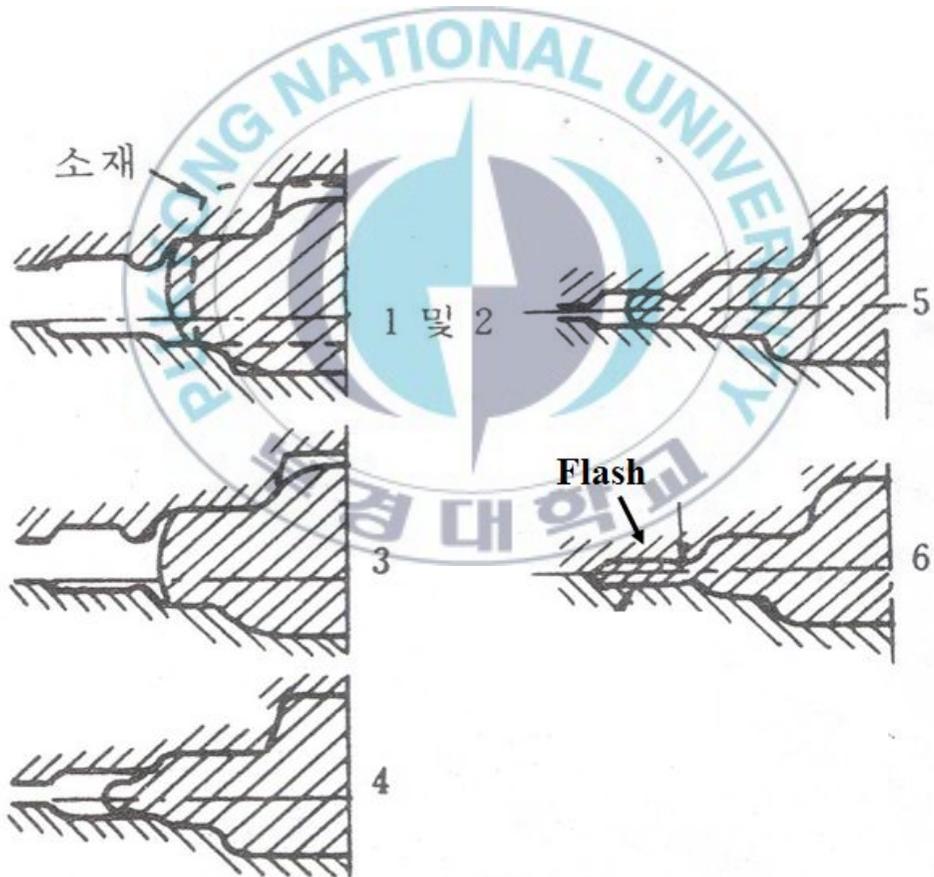


Fig. 2.2 Metal flow in hot-forging die

### 2.1.3 금형의 손상기구

금형은 형상에 따라 다른 손상기구가 작용을 한다. Fig. 2.3과 같이 번호에 따라 각각 마모, 열피로, 소성변형, 기계적 피로가 작용을 하여 금형에 손상을 입혀 금형의 수명을 단축시킨다.

①의 경우는 재료의 Metal flow로 인한 마모가 지배적인 손상기구로 작용을 하며, ②의 경우는 고온의 재료와 금형이 직접 맞닿는 부분으로 열피로가 지배적이다. ③의 경우는 고온의 금형 표면에 재료에 의한 과도한 응력이 가해지는 부분으로 소성변형이 지배적이고, ④의 경우는 금형에서 가장 깊은 조각부에 재료를 충만 시키기 위하여 강한 압력이 가해짐으로써 응력집중과 균열이 발생하게 된다.

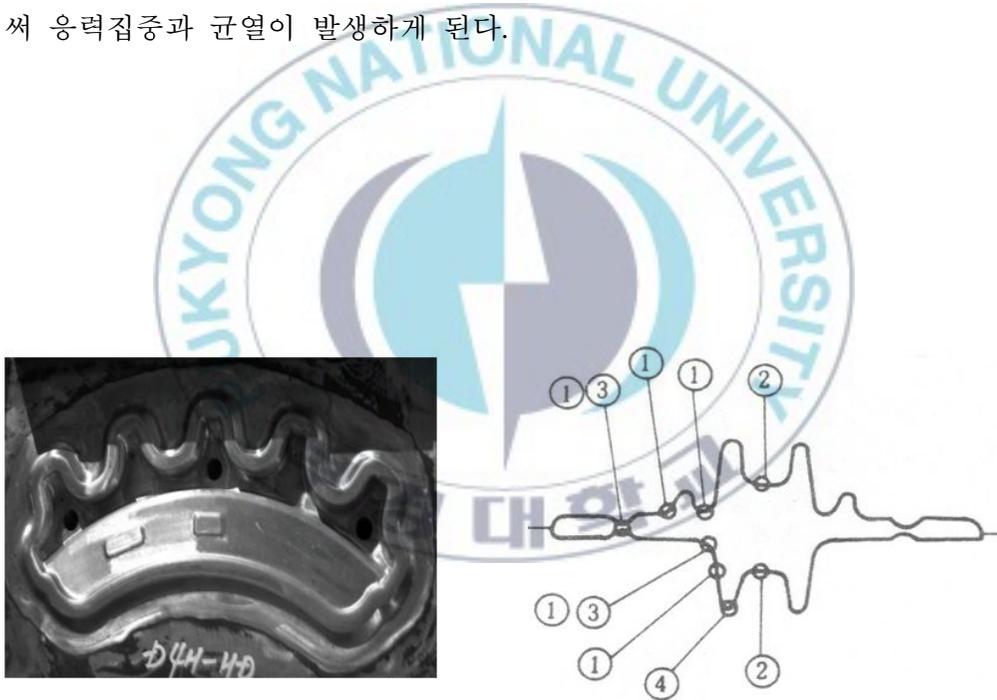


Fig. 2.3 금형의 외형 및 손상부분

### 2.1.3 열간단조 금형의 요구성능

단조공정에 사용되는 금형은 가압에 의한 충격을 주어 재료에 소성변형을 유발시켜 성형을 하는 공정으로 금형은 충분한 강도, 인성, 내균열성, 내마모성 등이 요구된다. 또한 열간단조 공정에서 금형은 고온의 재료와 접촉하기 때문에 내열성 또한 요구된다.

내균열성의 경우 단조공정에서 발생하는 반복 충격하중을 견디기 위해 요구되고, 내열성의 경우 고온의 재료와 접촉하는 금형의 표면에서 가열과 이형제에 의한 냉각으로 인해 발생하는 열응력과 표면이 거북이 등껍질처럼 갈라지는 Heat check현상을 견디기 위하여 요구된다. 또한 금형내에서 발생하는 Metal flow는 금형의 표면에 압력을 가하면서 유동하여 재료와 금형의 표면 사이의 마찰을 발생시키며 마모를 일으키는데, 이를 견디기 위해서 내마모성 또한 요구된다.



## 2.2 경화육성용접

경화육성용접 (Hardfacing welding)은 모재 표면에 단단한 금속층을 용착하여 내마모성을 향상시키는 표면경화 방법이다.

다양한 열원을 이용하여 기관 표면에 Cr, C 및 W 등의 경한 파우더를 용융하여 기관과 용착시킬 수 있다.

파우더를 공급하는 방법이 많이 사용되고 있으며 파우더를 공급하지 않고 기관위에 plate형태로 두고 용접하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 대표적인 경화육성용접법은 다음과 같다.

- 1) Compound Metal Arc Welding
- 2) Flux Cored Arc Welding
- 3) Submerged Arc Welding
- 4) Plasma Arc Welding
- 5) Other Welding



### 2.3 FCAW를 이용한 경화육성용접

Fig. 2.4는 FCAW 공정의 모식도를 나타낸 것이다. 와이어 내에 내식성, 내마모성 또는 내열성의 고크롬철계합금 성분의 파우더를 넣은 FCW를 이용하여 육성용접한다. 파우더를 외부에서 별도로 공급할 수도 있고 또는 외부 파우더를 사용 안 할 수도 있다.

FCAW 공정은 비교적 단순한 시스템으로 구성된다는 장점이 있지만 고가의 Wire를 사용해서 생산비용이 높고 Slag에 의해 용접비드가 잘 퍼지지 않는 단점이 있다.

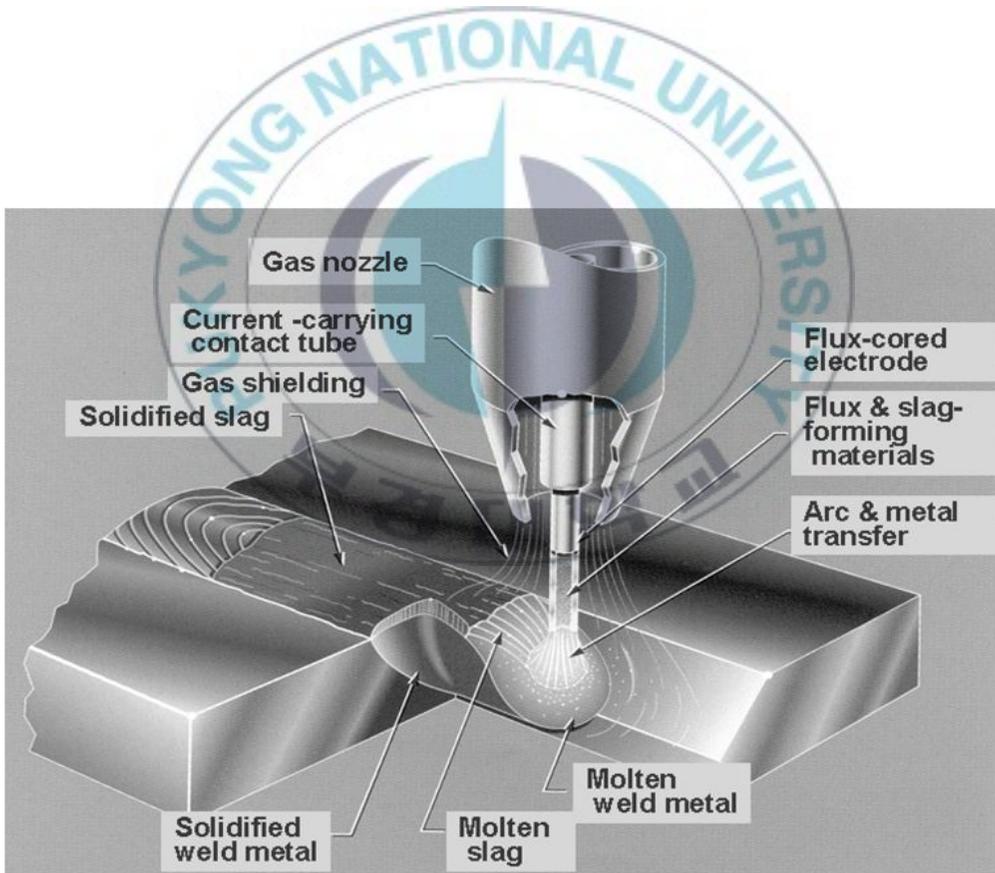


Fig. 2.4 Schematic of FCAW

## 2.4 용접형 열간단조 금형

용접형 열간단조 금형은 Fig. 2.5와 같이 기존의 금형 수명과 그 성능을 현저히 증가시키기 위해서 금형용강 표면에 육성용접을 실시하여, 점선처럼 기계가공을 하여 금형을 제작하는 방식으로 만드는 것이다. 장점으로 기존의 금형용강으로 만드는 것보다 저비용이며 보수용접 등이 용이하다고 할 수 있다.

Table 2.1은 JIS규격의 SKT 4(KS : STF 4)의 일반적인 화학성분을 나타내었다. 용접형 열간단조 금형의 제작시에는 일반적으로 SKT 4를 모재로 하여 육성용접을 실시하고 있다.



Fig. 2.5 Schematic of hardfacing welding on SKT 4

Table 2.1 Chemical composition of SKT 4

기호	화 학 성 분 %										참 고 용도에
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	
SKT 4	0.50~ 0.60	0.35 이하	0.60~ 1.00	0.030 이하	0.030 이하	1.30~ 2.00	0.50~ 0.60	0.70~ 1.00	-	-	다이블록

※ SKT 4는 V 0.20%이하로 첨가할 수 있다.

## 2.5 육성용접부 화학성분

비교 대상 Wire와 K사 Wire의 육성용접부 화학성분은 Table 2.2와 2.3에 각각 나타내었다. 각각의 Wire는 내균열성과 내마모성에 따라 "A", "B", "C"로 분류하였으며, Wire "A"는 내균열성이 우수하며, Wire "B"는 내마모성이 우수하고 Wire "B"는 Wire "A"와 "B"의 중간특성을 나타낸다. Wire 표기를 "CA"와 "KA" 등으로 하였으며, 앞의 C와 K는 각각 벤치마킹 Wire와 개발 Wire를 의미한다.

**Table 2.2 Chemical composition of Bench marking Wire**

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	V	W	Fe
CA	0.193	0.271	0.443	7.830	2.033	2.394	0.0366	0.210	0.0037	86.4
CB	0.317	0.694	0.598	8.933	1.829	2.757	0.158	0.0532	0.0072	84.5
CC	0.446	0.862	0.732	8.284	0.639	2.405	0.138	0.523	2.31	83.4
CB	0.317	0.694	0.598	8.933	1.829	2.757	0.158	0.0532	0.0072	84.5
CC	0.446	0.862	0.732	8.284	0.639	2.405	0.138	0.523	2.31	83.4

**Table 2.3 Chemical composition of developed Wire**

제품명	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	V	W
KA	0.144	0.937	0.828	0.028	0.021	0.044	1.980	9.650	1.692	0.093	0.251	0.021
KB	0.226	0.84	0.61	0.017	0.016	0.04	1.79	9.04	2.50	0.053	0.048	0.008
KC	0.313	0.95	0.73	0.022	0.016	0.04	0.11	8.96	2.27	0.072	0.564	1.790

## 2.6 육성용접부 표면 경도 & 내마모 특성

Table 2.4는 각각의 Wire로 제작한 육성용접부의 표면 경도를 5번 측정 한 평균값을 나타내었다. 일반적으로 경도와 내마모 특성은 반비례하는 것으로 알려져 있다. 즉, 경도가 높을수록 우수한 내마모 특성을 지닌다.

Wire "A" < "B" < "C"의 순서로 높은 마모특성이 요구된다. Wire "C"가 가장 높은 경도값을 가지고 Wire "A"가 경도값이 가장 낮으므로 각각 Wire의 요구특성과 일치한다.

**Table 2.4 Hardness of hardfacing weld's surface**

Wire	CA	KA	CB	KB	CC	KC
Surface hardness (HRc)	48.7	48.2	52.9	53.1	55.3	54.7

## 2.7 육성용접부의 기계적 성질 평가방법의 정의

각각의 Wire를 사용한 육성용접부의 기계적 성질을 평가하기 위하여 열간단조 금형의 특성을 내균열성, 내열충격성의 2가지로 규정짓고 각각의 정의와 평가방법, 평가 기준 데이터를 정리하여 Table 2.5에 나타내었다.

**Table 2.5 Definition of assessment method in hardfacing weld**

열간 단조금형 특성	정 의	본 연구의 평가 방법	평가 기준 데이터
내균열성	기계적 응력의 작용에 의한 균열발생에 저항하는 능력	상온 굽힘시험	- 극한 변형량 - 파단부 극한 굽힘응력
내열충격성	열적 팽창과 수축으로 인한 열피로에 저항하는 성질	고온 굽힘시험	- 고온 극한 변형량

## 2.8 굽힘시험의 극한 변형량 및 $\sigma_{bf}$ 정의

Fig. 2.6은 상온 및 고온 Bending test의 모식도를 나타내었다. 시험은 3-point bending test로 진행되었으며 그 중 상온 Bending test의 주요데이터는 극한 굽힘 하중, 극한 변형량, 파단부 극한 굽힘응력( $\sigma_{bf}$ )로 정의되는데, 이때 극한 변형량은 굽힘시험에 의해 재료가 파단이 발생할 때 만능 인장시험기의 Head가 이동한 거리이며 파단부 극한 굽힘응력( $\sigma_{bf}$ )은 극한 굽힘 하중이 발생하는 시험편 중앙에서 벗어난 파단이 발생할 때 극한 굽힘 하중과 중앙에서 벗어난 거리를 토대로 하여 계산되는 값이다.



**Fig. 2.6 Schematic of bending test**

## 제3장 내균열성 평가를 위한 상온 굽힘시험

### 3.1 서언

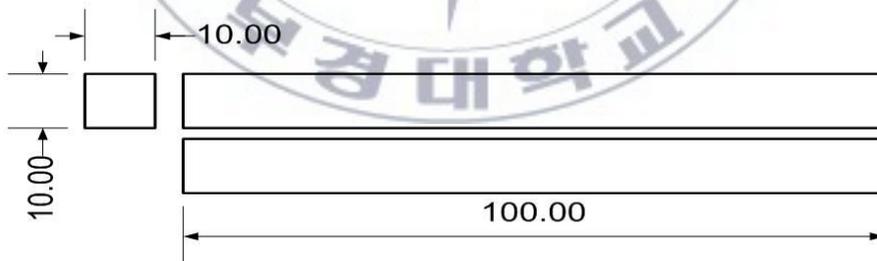
본 장은 상온 Bending test이다. 시험은 3점 굽힘 시험이 채택되었고 KS B 0804 : 금속재료 굽힘 시험방법을 참조하였다.

본 장의 목적은 육성용접부의 내균열성 평가를 하는 것이다. 극한굽힘 하중과 극한변형량이 클수록 내균열성이 높다고 평가된다.

### 3.2 시험편 형상 및 시험 방법

#### 3.2.1 시험편 형상

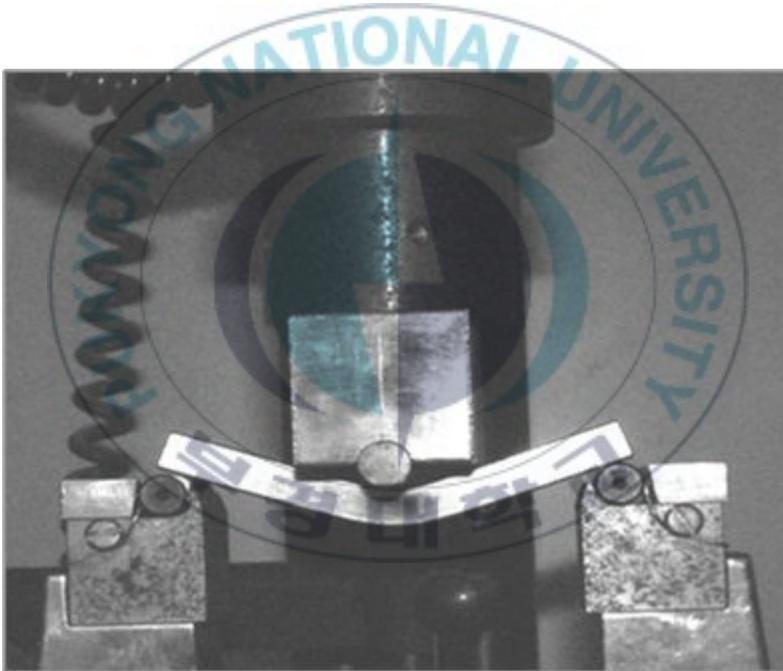
Fig. 3.1은 굽힘 시험의 시험편 형상으로 단순한 형태를 가지고 있다. 그 이유는 육성용접부가 HRc 45 ~ 55의 고경도를 가지고 있기 때문에 가공의 어려움이 있고, 또한 추가적인 열영향을 배제하기 위해 와이어 커팅 방법으로 가공을 하기 위해 이러한 단순한 형태를 가지게 되었다.



**Fig. 3.1 Schematic of 3 point bending test specimen**

### 3.2.2 시험 방법

본 장에서 육성용접부 내균열성을 평가하기 위해 Bending test를 수행하였고, Fig. 3.2에 test의 수행을 나타내었다. Span은 80mm이며 변위제어 방식으로 2mm/min의 속도로 Head가 아래로 내려와 파단이 될 때까지 시험을 수행하였다. 각각의 Wire는 3개의 시험편으로 시험이 진행되었고 결과는 평균값을 사용하여 비교하였다.



**Fig. 3.2 bending test of specimen**

### 3.3 시험결과 및 고찰

#### 3.3.1 상온 굽힘시험 채택배경

육성용접부는 HRc 50 근방의 고경도로서, 기계적특성을 평가하기 위해 노치 가공시 노치의 반복성 및 재현성이 열악하며 가공을 하더라도 가공 비용이 상승하는 문제점이 있다.

또한 용접시공시 결함이 있는 지점에서 균열이 우선적으로 발생하게 되는데 노치가 존재한다면 노치의 팁에서 균열이 발생, 성장하므로 용접결함에 대한 문제점을 정확히 인식할 수 없다<sup>3)</sup>.

J. K Kim 등은<sup>4)</sup> 육성용접의 파괴균열은 용접결함인 기공에서 발생하는 것이 지배적이라고 하였다. 파괴인성식  $K = \sigma_f \sqrt{\pi a}$ 의 측면에서도 경도가 높으면 파괴응력  $\sigma_f$ 가 높게 되며 균열크기  $a$ 가 작아도 파괴에는 민감하게 영향을 미친다. 즉, 경도가 높으면 용접결함인 기공, 미세균열, 비금속 개재물 등이 재료의 파괴에 민감하게 영향을 미치게 된다. 그러므로 용접결함에 대한 평가는 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 용접결함을 간접적으로 평가하기 위해서  $M_{max}$  (모멘트의 최대값)이 걸리는 위치인 시편의 중심에서 벗어난 경우를 고려하여 파단부 극한 굽힘응력  $\sigma_{bf}$ 를 사용하였고,  $\sigma_{bf}$ 가 높으면 용접결함의 가능성 또한 낮을 것으로 판단하였다. 시편에 노치가 없는 상온 굽힘시험의 경우, HRc 50 근방인 고경도 육성용접부의 내균열성을 평가하기 위해 연성과 극한 응력을 측정하였으며, 극한 변형량이 크다면 연성이 우수하여 내균열성이 우수하고, 파단부 극한 응력이 클수록 내균열성이 우수한 것으로 평가하는 방법을 채택하였다.

### 3.3.2 Bending stress 계산

Bending stress는 계산되어지는 값으로 Fig. 3.3에 상온 Bending test의 모식도를 나타내었는데, 여기서 span L은 계산에 사용되는 보의 길이, P(kgf)는 가해지는 굽힘하중,  $M_{max}$ (kgf·mm)는 하중이 걸리는 최대 모멘트이며 이로 인해 Bending stress  $\sigma_b$ (kgf/mm<sup>2</sup>)가 계산된다. 계산되는 식은 아래에 나타내었다.

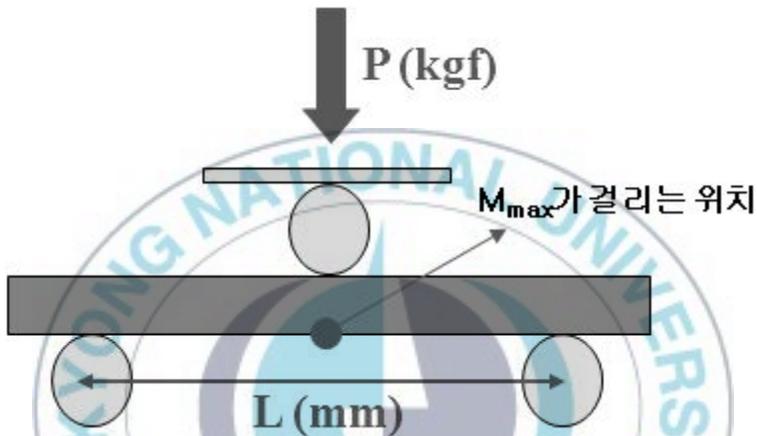


Fig. 3.3 Schematic of bending test

$$M_{max} = \left(\frac{p}{2} \times \frac{L}{2}\right) = \frac{PL}{4}$$

여기서, 파괴는  $M_{max}$ 가 걸리는 위치의 인장응력이 지배한다.

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bh^2} \text{ -----(1)}$$

여기서  $\sigma_b$ 는 굽힘응력, b는 시편의 폭으로 10mm, h는 시편의 두께로 10mm, L은 span으로 80mm이며 P는 파단시 가해진 하중 값이다.

$$\sigma_{bf} = \sigma_b(40 - x)/40 \text{ -----(2)}$$

여기서 x는 보의 중앙(L=40mm)에서 파단위치까지의 거리이다.

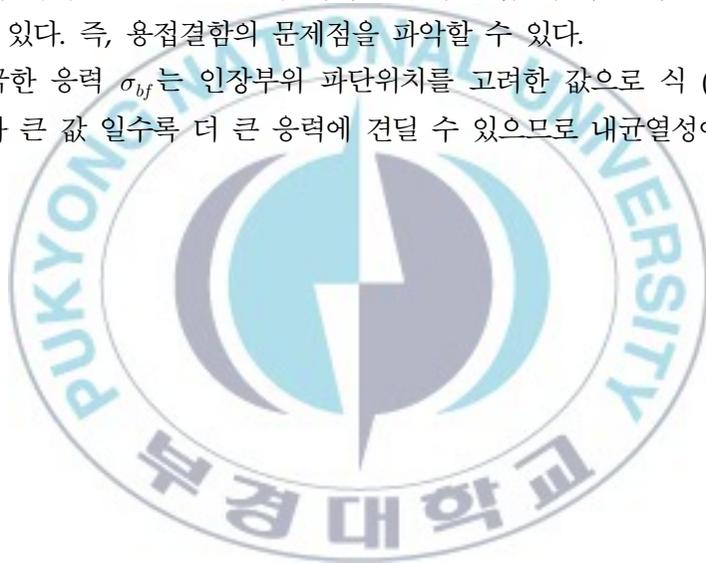
### 3.3.3 결과 및 고찰

극한 굽힘하중 및 극한 변형량은 만능 인장 시험기에서 자동으로 측정되는 값으로 극한 굽힘하중은 시험 중 가장 높게 나온 하중의 값이며 극한 변형량은 시편이 파단 될 때의 변위이다.

일반적으로 연성이 손실되면 균열의 발생, 진전이 더 잘 일어나는 것으로 알려져 있다<sup>5,6)</sup>. 상온 굽힘시험시 시편에 발생하는 극한 변형량이 클수록 연성이 풍부하며 균열의 대한 저항성이 우수하므로 내균열성이 우수하다고 할 수 있다.

인장부위 파단위치는 시편의 중앙에서 파단지점까지의 거리를 말하며 값이 클수록 시편에 미세균열 또는 비금속 개재물 등의 용접결함이 존재할 가능성이 크다고 볼 수 있다. 즉, 용접결함의 문제점을 파악할 수 있다.

파단부 극한 응력  $\sigma_{bf}$ 는 인장부위 파단위치를 고려한 값으로 식 (2)로부터 계산되며 보다 큰 값 일수록 더 큰 응력에 견딜 수 있으므로 내균열성이 우수하다.



1) 내균열성이 우수한 Wire "A"의 상온 굽힘 특성 및 고찰

(1) Wire "CA"

**Table 3.1 Test results of Wire "CA"**

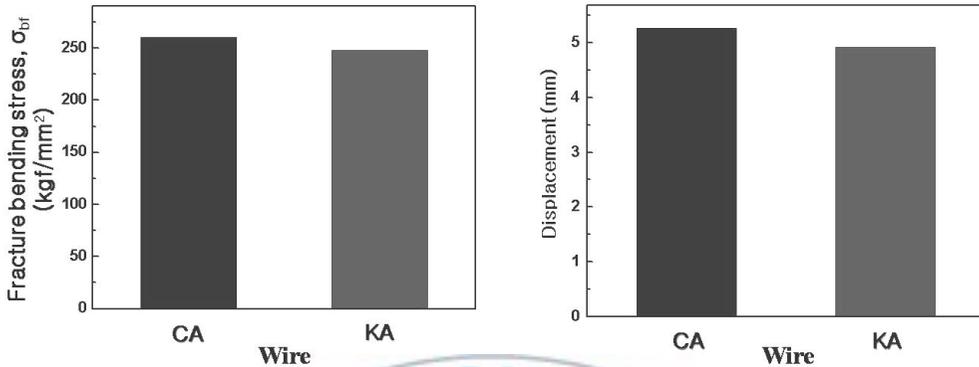
Technical item	CA			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load (kgf)	2317	2511	2514	2447
Fracture point at tensile part (mm) (Distance from specimen's center)	3.43	5.21	5.97	4.87
Displacement (mm)	3.43	6.22	6.12	5.26
Fracture bending stress, $\sigma_{bf}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	258	262	257	259

(2) Wire "KA"

**Table 3.2 Test results of Wire "KA"**

Technical item	KA			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load (kgf)	2476	2471	2105	2350
Fracture point at tensile part (mm) (Distance from specimen's center)	9.56	4.31	0	4.62
Displacement (mm)	5.38	6.24	3.13	4.92
Fracture bending stress, $\sigma_{bf}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	226	265	253	248

### (3) Wire "A" 비교



**Fig. 3.4 Comparison of wire "CA" and "KA"**

Table 3.1, 3.2에는 와이어 "A"의 상온 굽힘시험 데이터를 나타내었다. 개발 Wire "KA"는 벤치마킹 Wire "CA"와 거의 유사한 기계적 특성을 보이고 있다. 극한 굽힘하중, 인장부위 파단위치, 극한 변형량, 파단부 극한 굽힘응력의 4가지 값 모두 유사하며 큰 차이를 나타내지 않았다. 그 중 균열 발생지점과 극한 굽힘하중을 결합한 파단부 극한 굽힘응력( $\sigma_{bf}$ )과 극한 변형량이 클수록 내균열성이 우수한 것으로 평가되는데, 두 와이어가 비슷한 값을 가짐에 따라 내균열성은 벤치마킹 Wire와 동등한 것으로 평가하였다.

또한 개발 Wire "KA"는 내마모성은 부족하지만 내균열성이 우수한 특성을 가지고 있다. 그러므로 내마모성이 크게 요구되는 금형의 표면보다는 기계적 응력을 반복적으로 크게 받게 되는 부분에 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2) 내균열성 및 내마모성을 겸비한 Wire "B"의 상온굽힘 특성 및 고찰

(1) Wire "CB"

Table 3.3 Test results of Wire "CB"

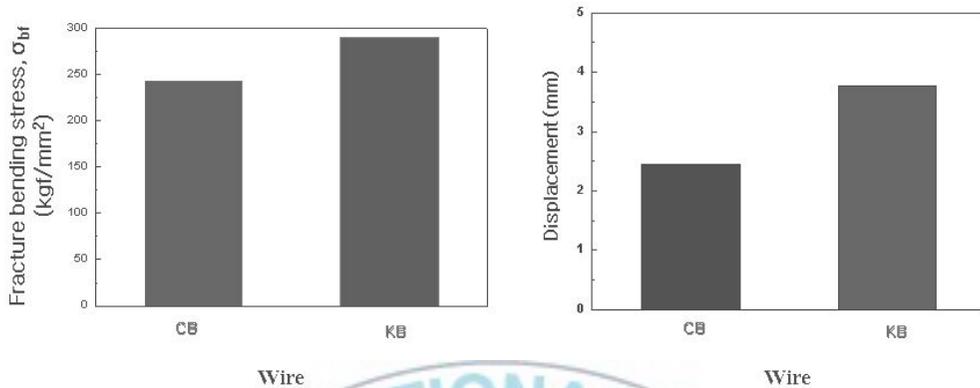
Technical item	CB			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load (kgf)	2050	2228	1953	2077
Fracture point at tensile part (mm) (Distance from specimen's center)	1.42	0	1.20	0.87
Displacement (mm)	2.42	2.66	2.29	2.46
Fracture bending stress, $\sigma_{bf}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	237	267	227	244

(2) Wire "KB"

Table 3.4 Test results of Wire "KB"

Technical item	KB			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load (kgf)	2548	2663	2309	2506
Fracture point at tensile part (mm) (Distance from specimen's center)	0	3.71	0	1.23
Displacement (mm)	3.90	4.55	2.88	3.78
Fracture bending stress, $\sigma_{bf}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	305	299	277	290

### (3) Wire "B" 비교



**Fig. 3.5 Comparison of wire "CB" and "KB"**

Table 3.3, 3.4에는 와이어 "B"의 상온 굽힘시험 데이터를 나타내었다. 개발와이어 "KB"는 벤치마킹와이어 "CB"보다 우수한 기계적 특성을 보인다. 인장부위 파단위치를 제외한 극한 굽힘하중, 극한 변형량, 파단부 극한 굽힘응력의 3가지의 값이 벤치마킹와이어보다 양호하여 내균열성이 우수한 것으로 평가되었다.

3) 내마모성이 우수한 Wire "C"의 상온 굽힘 특성 및 고찰

(1) Wire "CC"

**Table 3.5 Test results of Wire "KB"**

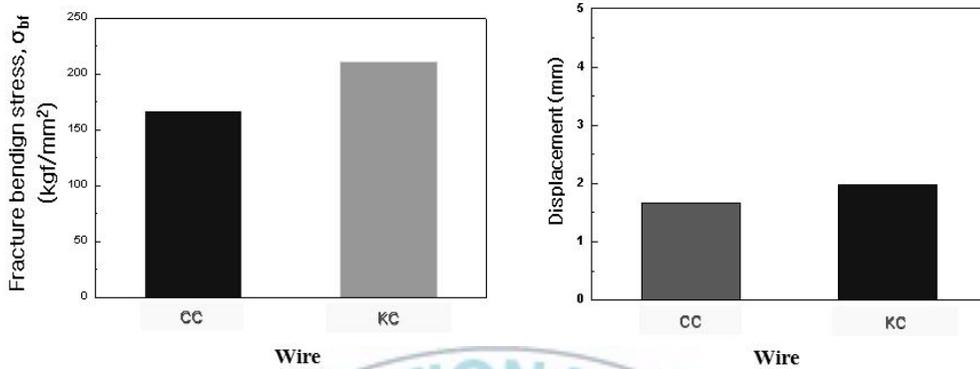
Technical item	CC			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load (kgf)	1518	1535	1535	1555
Fracture point at tensile part (mm) (Distance from specimen's center)	4.23	4.23	1.32	2.62
Displacement (mm)	1.71	1.73	1.54	1.66
Fracture bending stress, $\sigma_{bf}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	162	173	165	167

(2) Wire "KC"

**Table 3.6 Test results of Wire "KB"**

Technical item	KC			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load (kgf)	1583	2090	1801	1825
Fracture point at tensile part (mm) (Distance from specimen's center)	1.48	0.47	1.34	1.10
Displacement (mm)	1.72	2.30	1.94	1.99
Fracture bending stress, $\sigma_{bf}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	177	247	208	211

### (3) Wire "C" 비교



**Fig. 3.6 Comparison of wire "CC" and "KC"**

Table 3.5, 3.6에는 와이어 "C"의 상온 굽힘시험 데이터를 나타내었다. "KC"는 벤치마킹 Wire "CC"보다 우수한 기계적 특성을 보이고 있다. 극한 굽힘하중, 인장부위 파단위치, 극한 변형량, 파단부 극한 굽힘응력의 4가지의 값 모두 우수하였으며 벤치마킹 Wire보다 크므로 내균열성이 우수한 것으로 평가되었다.

개발와이어 "KC"는 "KA", "KB"보다는 내균열성이 부족하다. 그러므로 금형의 제작시 내마모성이 우수한 특성을 살려 재료와 접촉하는 표면쪽에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

### 3.4 결론

열간단조 금형 육성용접부의 내균열성을 평가하기 위해 상온 굽힘시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 열간단조 금형에 기계적 응력의 반복으로 발생하는 균열에 대한 저항력 평가를 위해 상온 굽힘시험을 실시하였으며 각각의 데이터에 의미를 부여하였고 내균열성을 평가할 수 있는 방법을 확립하였다.

2) 개발 Wire "KA"는 내마모성이 "KB", "KC"보다는 부족하지만 내균열성이 우수한 특성을 지니므로 금형의 표면보다 반복적인 응력이 크게 작용하는 부분에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

3) 개발 Wire "KC"는 "KA", "KB"보다는 내균열성이 부족하다. 그러므로 금형의 제작시 내마모성이 우수한 특성을 살려 재료와 접촉하는 표면 쪽에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

## 제4장 내열충격성 평가를 위한 고온 굽힘시험

### 4.1 서언

본 장은 고온 Bending test이다. 시험은 대기 중에서 850℃까지 시편을 가열할 수 있는 염욕로와 3점 굽힘 시험이 채택되었고 Kim 등의 논문을 참조하였다.

본 장의 목적은 육성용접부의 내열충격성 평가를 하는 것이다. 극한변형량이 클수록 내열충격성이 높다고 평가된다.

### 4.2 J. W. Kim 등의 논문 검토

J. W. Kim 등은<sup>7-8)</sup> Fig. 4.1의 (a)처럼 환봉에 노치가 형성되어 있는 시험편으로 Gleeble 3500을 이용하여 Fig. 1의 (b)와 같이 가열, 유지, 냉각과 동시에 인장을 실시하여 열충격을 평가하는 시험을 시행하여, 유지온도와 파단시의 온도차이  $\Delta T$ 가 클수록 열충격 특성이 우수하다고 판단하였다. 이 방법 또한 기존의 열충격 시험보다는 간단한 방법이지만 고가의 시험장치가 요구된다.

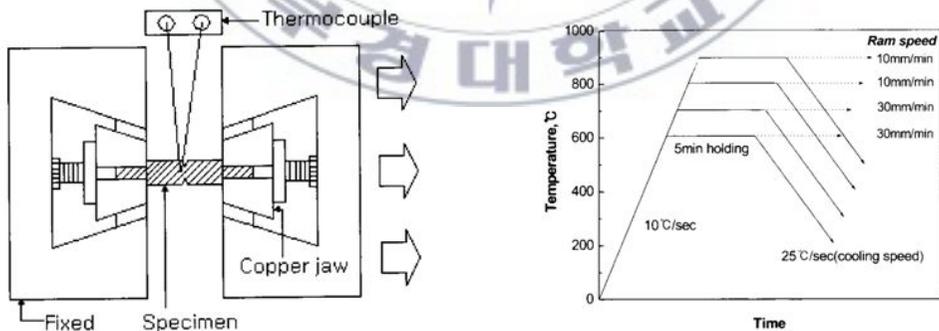


Fig. 4.1 Schematic of thermal shock test & test method

### 4.3 시험편 형상 및 시험 방법

#### 4.3.1 시험편 형상

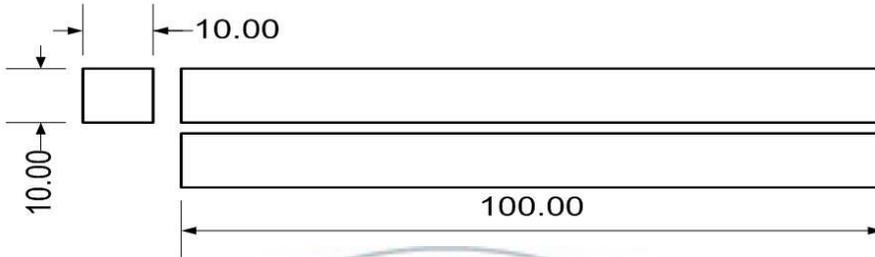


Fig. 4.2 Schematic of specimen

#### 4.3.2 시험 방법

본 연구에서는 J.W. Kim의 연구 원리를 이용하여 내열충격성을 간편하고 빠르게 실험할 수 있는 방법을 고안하였다. Fig. 4.4에는 염욕로와 염욕로에서 가열된 시험편을 나타내었다. 염욕로에는 자체적으로 온도를 확인할 수 있게 K형 열전대가 부착 되었다. 염욕로를 이용하여서 대기중에 850℃로 시험편이 가열될 수 있도록 하였고 시험편을 5분간 가열하여 취출하고 이를 3점 굽힘시험 할 수 있게 준비한 후 취출 1분 후 상온 bending test와 동일하게 변위속도 2mm/min인 변위제어 방식으로 시험을 시작하였다. 즉, 시험편이 가열, 유지, 냉각 및 인장의 단계를 거치도록 실험하여 재료의 변위로 열충격을 평가하는 방법을 채택하였다.

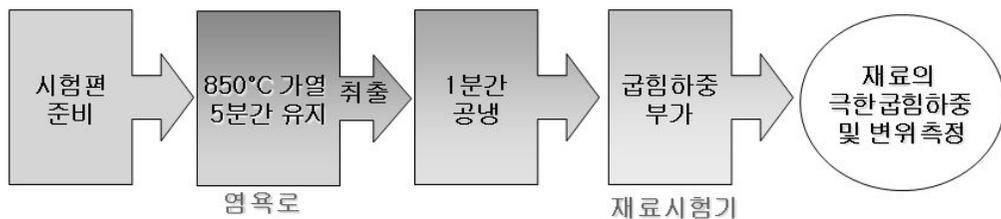


Fig. 4.3 Method of high temperature bending test



**Fig. 4.4 Salt bath & specimen**

## 4.4 시험 결과 및 고찰

### 4.4.1 고온 굽힘시험의 타당성

J. W. Kim<sup>7-8)</sup>의 연구에서는 유지온도와 파단시의 온도차이  $\Delta T$ 가 클수록 열충격에 더 잘 견디는 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 이러한 원리를 이용하여  $\Delta T$ 가 크다면 시간이 더 경과한 것으로 판단하여 2mm/min의 변위속도를 가지는 변위제어 방식에서 극한변형량이 크다면 유지온도와 파단시의 온도차이  $\Delta T$ 가 크며 내열충격성이 우수한 것으로 평가하였다. Fig. 4.5는 실제 측정된 육성용접부의 냉각곡선으로 5분간의 가열 및 유지를 한 뒤 취출 후 시간이 지남에 따라 온도가 하강함을 보여 준다. 그러므로 시간이 경과함에 따라  $\Delta T$ 가 커지는 것을 알 수 있다.

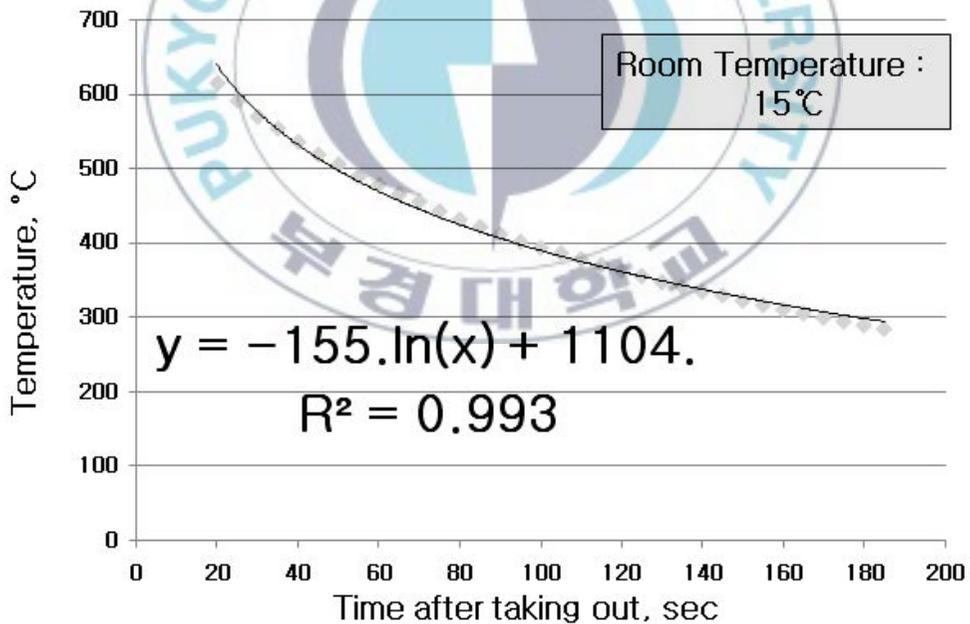


Fig. 4.5 Cooling rate of specimen

#### 4.4.2 다양한 선행연구와 본 연구의 비교

J. H. Song 등에<sup>2)</sup> 의하면 열충격과 열피로 시험에서 균열의 진전은 냉각 중에 발생한다고 한다. 본 연구에서 냉각 및 굽힘의 단계에서 냉각 중에 의도적으로 균열을 생성/전파시키는 방법으로 통상적인 열충격시 시편의 거동을 유사하게 재현할 수 있을 것으로 판단된다.

**Table 4.1 Comparison of various studies**

	M. Collin <sup>9)</sup>	J. W. Kim <sup>5-6)</sup>	Present study
Object	Brittle materials without defect	Homogeneous tool steel without defect	Overlay welded metal with welding defects
Fracture initiation	Pre-crack by vicker's indentation	Notch by machining	Random welding defects
Heating and cooling method	Furnace heating & water cooling(30°C)	Heating & cooling by Gleeble	Salt bath heating & air cooling
Thermal shock method	Quenching	Controlled cooling with tension	Controlled cooling with bending
Thermal shock resistance	Crack length increase	$\Delta T$	Displacement
Excellence to thermal shock resistance	Low thermal stress intensity factor & high toughness	Large notch tip plastic deformation to lower temperature	Small welding defects & large plastic deformation by bending

Table 4.1은 본 연구의 결과를 기존의 연구들과 비교한 것이다. M. Collin 등은<sup>9)</sup> 강화 알루미늄, 서멧 (cermet), 고속도강 등의 HRC 65 근방의 고경도 취성재료의 내열충격성을 평가하기 위해서 비커스 압흔을 만들어 예비균열로 작용하게 하여 여러 온도에서 가열한 후 급냉을 하여 균열의 길이가 변화하는 것을 관찰하였다. 이때 열응력 때문에 생기는 stress intensity factor가 크면 균열은 잘 생길 수 있지만, 재료의 인성이 우수하면 균열의 성장을 저지하는 특성을 갖게 되므로 두 가지의 조합에 의해 균열성장 특성이 변한다고 보았다. 즉, 예비균열이 있는 재료에 열전도성에 의해 결정되는 열응력이 작고 소재의 인성이 크면 내균열성이 우수하다고 보았다. 이러한 방법도 기존의 열충격 특성보다는 간단하지만 균열의 성장특성을 보기 위하여 현미경 관찰 등의 정밀한 방법으로 인해 시간이 많이 걸리며 비커스 압흔이 예비균열로 작용할 수 있는 소재에 대해서만 적용가능하다는 단점이 있다.

J. W. Kim 등은<sup>7-8)</sup> 노치를 가진 시편을 일정한 냉각속도에서 일정한 변위속도로 인장을 하면서 유지온도와 파단시의 온도차이  $\Delta T$ 가 클수록 내열충격성이 우수하다고 평가하였다. 즉, 노치의 선단부가 저온이 될 때까지 충분한 소성변형이 가능하면 내열충격성이 우수하다고 보았다. 앞서 내열충격성 평가방법에서 설명한 바와 같이 이러한 방법도 고가의 시험장치가 요구되며 또한 환봉형의 시편에 노치를 가공해야 하므로 가공비와 노치의 반복성 및 재현성이 부족하게 되는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 고온 굽힘시험에서 극한 변형량이 크다면 내열충격성이 우수한 것으로 평가하였다. 즉, 소재 내에 미세균열 또는 비금속개재물과 같은 용접결함이 작아야 되며, 소재가 저온에 이르기까지 충분한 소성변형을 할 수 있으면 내열충격성이 우수하다고 보았다. 선행연구들과 비교하였을 때 저가의 장치를 이용하며 노치가공 시간 및 시험 시간을 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

#### 4.4.3 결과 및 고찰

1) 내균열성이 우수한 Wire "A"의 고온 굽힘 특성 및 고찰

(1) Wire "CA"

**Table 4.2 Test result of Wire "CA"**

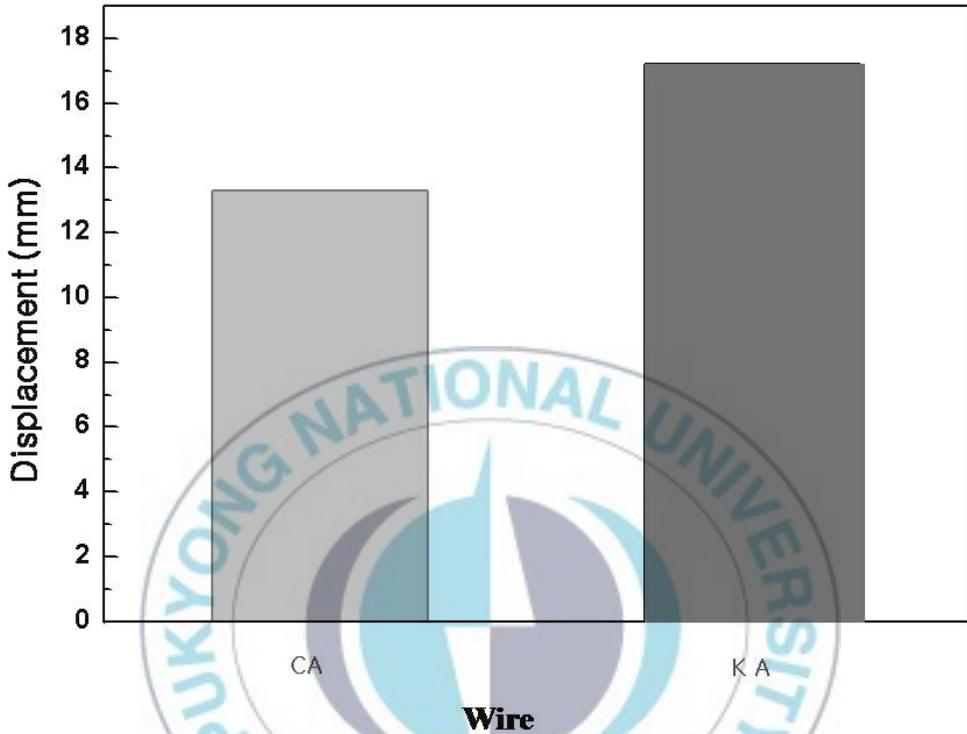
Wire	CA		
	1	2	Average
Ultimate bending load (kgf)	1758	1708	1733
Displacement(mm)	13.13	13.70	13.41

(2) Wire "KA"

**Table 4.3 Test result of Wire "KA"**

Wire	KA			Average
	1	2	3	
Ultimate beding load (kgf)	1766	1632	1597	1665
Displacement (mm)	17.52	11.67	21.05	16.75

### (3) Wire "A" 비교



**Fig. 4.2 Comparison of Wire "CA" and "KA"**

Fig. 4.2는 와이어 "A"의 고온 굽힘시험 특성을 비교하여 나타내었다. 개발 Wire "KA"는 벤치마킹 Wire "CA"보다 고온 극한 변형량이 크며 세 Wire중 가장 우수한 내열충격성을 가지고 있지만 내마모성이 부족하기 때문에 금형의 표면에 사용하는 것은 바람직하지 못할 것으로 판단된다.

2) 내균열성 및 내마모성을 겸비한 Wire "B"의 고온 굽힘 특성 및 고찰

(1) Wire "CB"

Table 4.4 Test result of Wire "CB"

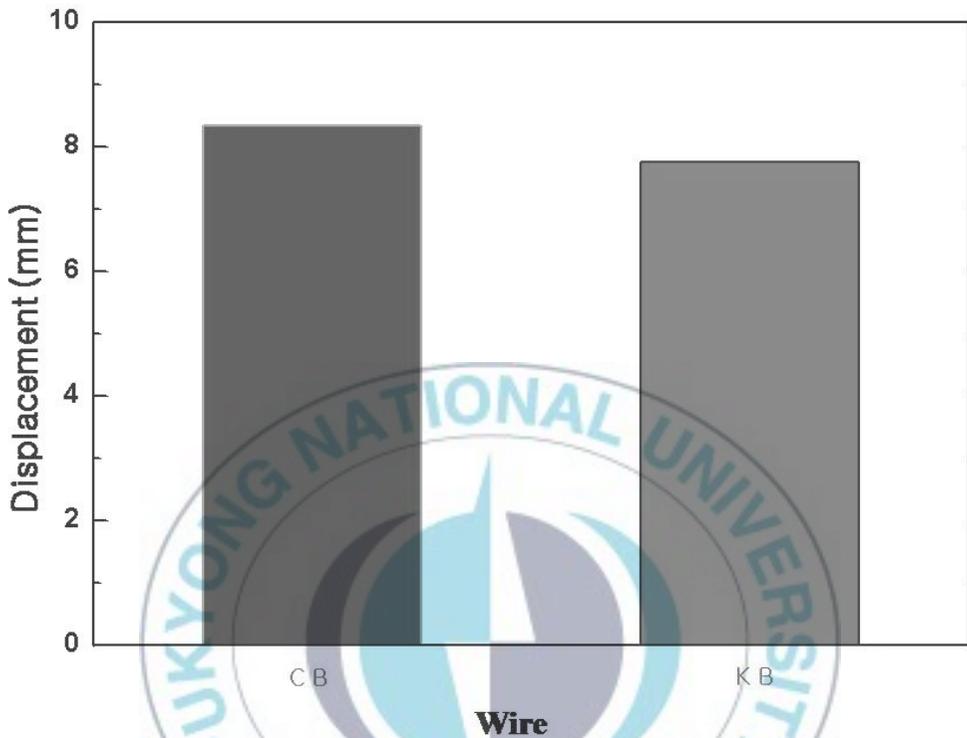
Wire	C B			
	1	2	3	Average
Ultimate beding load(kgf)	1463	1539	1516	1497
Displacement(mm)	6.29	9.74	9.00	8.34

(1) Wire "KB"

Table 4.5 Test result of Wire "KB"

Wire	K B			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	1485	1717	1399	1533
Displacement(mm)	7.26	9.79	6.22	7.75

### (3) Wire "B" 비교



**Fig. 4.3 Comparison of Wire "CB" and "KB"**

Fig. 7에는 Wire "B"의 고온 굽힘시험 특성을 비교하였다. 개발 Wire "KB"는 벤치마킹 Wire "CB"보다 다소 부족하지만 유사한 고온 극한 변형량을 가졌으므로 내열충격성은 벤치마킹 Wire와 동등한 것으로 평가되었다.

3) 내마모성이 우수한 Wire "C"의 고온 굽힘 특성 및 고찰

(3) Wire "CC"

Table 4.6 Test result of Wire "CC"

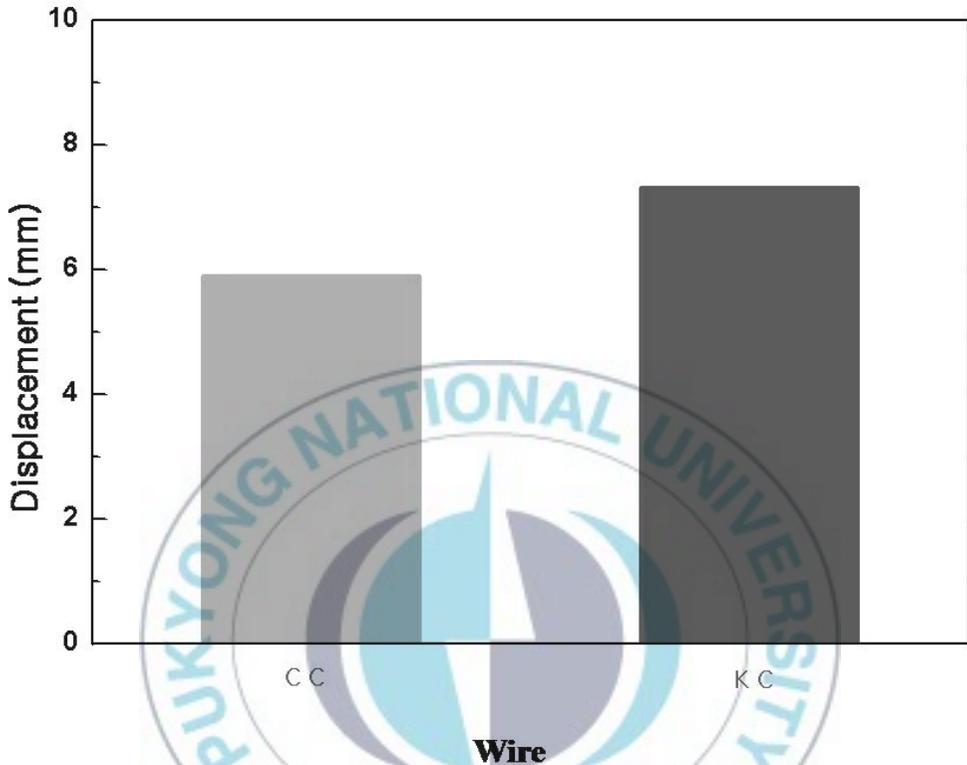
Wire	C C			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	1296	1434	1565	1431
Displacement(mm)	3.74	5.72	8.29	5.91

(3) Wire "KC"

Table 4.7 Test result of Wire "KC"

Wire	K C			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	1216	1442	1456	1371
Displacement(mm)	3.66	9.17	9.13	7.32

### (3) Wire "C" 비교



**Fig. 4.4 Comparison of Wire "CC" and "KC"**

Fig. 8에는 Wire "C"의 고온 굽힘시험 특성을 비교하였다. 개발 Wire "KC"는 벤치마킹 Wire "CC"보다 고온 극한 변형량이 크므로 내열충격성이 우수한 특성을 가진 것으로 평가되었다. Wire "KB"와 유사한 내열충격성으로 보여주지만 내마모성이 "KC"가 더 우수하므로 금형의 표면에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

## 4.5 결론

열간단조 금형 육성용접부의 내열충격성을 평가하기 위해 고온 굽힘시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 열간단조 금형에 중요한 내열충격성을 간편하게 측정하기 위해 염욕로를 이용하여 고온 굽힘시험을 하는 방법을 검토하여 고온 극한 변형량으로 내열충격성을 평가할 수 있는 방법을 확립하였다.
- 2) 개발 Wire "KA"는 벤치마킹 Wire "CA"보다 고온 극한 변형량이 크며 세 Wire중 가장 우수한 내열충격성을 가지고 있지만 내마모성이 부족하기 때문에 금형의 표면에 사용하는 것은 바람직하지 못할 것으로 판단된다.
- 3) 개발와이어 "KC"는 내균열성 및 내열충격성은 "KA", "KB"보다는 부족하지만 내마모성이 우수한 특성을 지니므로 금형의 표면에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

## 제5장 실제 열간단조 금형에 적용

본 연구에서 채택한 평가방법에 의해 개발 Wire의 성질이 벤치마킹과 유사하거나 우수한 것으로 평가되었으며, 벤치마킹 Wire보다 부족한 금형 수명을 보여준 기존의 와이어보다 개선된 것으로 평가되었다. 이러한 평가방법의 정확성을 뒷받침하기 위해서 개발 Wire "KC"로 육성용접하여 제작된 금형을 현장에 적용한 결과 기존의 700타점에서 8000타점으로 증가된 금형 수명을 보였고, 다른 타점을 요구하는 현장에 적용한 결과 11400타점의 수명을 보였으며 벤치마킹 Wire와 유사한 양호한 금형 수명을 나타내었다. 즉, 비교대상 Wire "CC"로 제작한 금형과 유사한 수명을 가지는 것으로 판명 되었다.



## 제6장 결론

열간단조 금형 육성용접부 내균열성 및 내열충격성의 평가방법에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열간단조 금형에 기계적 응력의 반복으로 발생하는 균열에 대한 저항력 평가를 위해 상온 굽힘시험을 실시하였으며 각각의 데이터에 의미를 부여하였고 내균열성을 평가할 수 있는 방법을 확립하였다.
- 2) 열간단조 금형에 중요한 내열충격성을 간편하게 측정하기 위해 염욕로를 이용하여 고온 굽힘시험을 하는 방법을 검토하여 고온 극한 변형량으로 내열충격성을 평가할 수 있는 방법을 확립하였다.
- 3) 개발 Wire “KA”는 내마모성이 “KB”, “KC”보다는 부족하지만 내균열성이 우수한 특성을 지니므로 금형의 표면보다 반복적인 응력이 크게 작용하는 부분에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.
- 4) 개발 Wire “KC”는 내균열성 및 내열충격성은 “KA”, “KB”보다는 부족하지만 내마모성이 우수한 특성을 지니므로 금형의 표면에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.
- 5) 개발 Wire로 현장에 적용한 결과 기존의 700타점에서 8000타점으로 증가된 금형수명을 보였고, 다른 타점을 요구하는 현장에 적용한 결과 11400타점의 수명을 보였으며 벤치마킹 Wire와 유사한 양호한 금형 수명을 나타내었다.
- 6) 개발 Wire는 벤치마킹 Wire와 비교하였을 때 양호한 내균열 및 내열충격성을 확보한 Wire라고 평가되었으며 실제 열간단조 금형의 육성용접에 적용한 결과 금형의 수명이 벤치마킹 Wire로 만든 경우와 유사하게 나타났다.

## 참고문헌

1. E. R. Baek, J. Y. Jung, S. H. Ahn, Trend of the weld surfacing technology, Journal of KWS, Vol. 15, No. 5, October, 1997 (in Korean)
2. J. H. Song, J. K. Lim, H. Takahashi, Thermal shock/fatigue evaluation of FGM by AE Technique, KSME Journal Vol. J.N DUPONT , No., pp 435-442, 1996
3. Jiang Xu, Zhengyang Li, Wenhui Zhu, Zili Liu, Wenjin Liu, The comparative study of thermal fatigue behavior of laser deep penetration spot cladding coating and brush plating Ni-W-Co coating, Applied Surface Science 253 (2006) 2618-2624
4. Jam-Kyu Kim, Seong-Dae Choi, Jong-Hyung Lee, Seon-Hwan Cheong, Hyun-Kyu Kweon  
Characteristics of fatigue Crack behavior for overlay welding material, 한국기계가공학회 2005추계학술대회논문집 pp. 131-136 (in Korean)
5. 대한용접·접합학회, 용접·접합 편람 pp. 27-29
6. Choung-Rae Lee, Sang-Ho Um, Cheol-Choi, and Chang-Hee Lee, A Study on Hot Ductility behavior of Ni-based Superalloys, Journal of KWS, Vol. 22, No. 2, April, 2004 (in Korean)
7. J. W. Kim, J. H. Ryu, H. H. Park and Y. H. Moon, Analysis of Thermal Shock and Thermal Fatigue in Tool Steels for Hot Forging, Transactions of Materials Processing, Vol. 11, No. 1, 2002 (in Korean)
8. Y. H. Moon, J. W. Kim, C. J. Van Tyne, Thermal shock resistance of electroslag cast steel for hot-working tools, Journal of Materials Processing Technology 155-156 (2004) 2122-2126
9. M. Collin, D. Rowcliffe, Analysis and Prediction of Thermal Shock in Brittle Materials, Acta mater. 48 (2000) 1655-1665

## 학위과정 중 주요 학술지 게재 및 발표논문

### 1. 주요 학술지 게재 논문

- (1) 조상명, 김성호, 정연호, 백승희, 장중훈, 박철규, 우희철, 정병호, 열간단조 금형 육성용접부 내균열성 및 내열충격성 평가방법에 관한 연구, 대한용접접합학회지, 투고 중

### 2. 학술발표대회 발표논문

- (1) 김성호, 정연호, 백승희, 장중훈, 박철규, 정우현, 정병호, 조상명, 열간단조 금형 열충격특성 평가에 관한 연구, 대한용접접합학회 춘계학술발표대회 초록집 51권, 2009. 04, pp. 129
- (2) 김성호, 정연호, 백승희, 장중훈, 박철규, 우희철, 정병호, 조상명, 열간단조 금형 수명연장을 위한 경화육성용접용 대경 FCW의 개발, 대한용접접합학회 추계학술발표대회 초록집 52권, 2009. 11, pp. 13

## 감사의 글

2007년 11월 용접 IT 연구실의 문을 열어 새로운 출발을 한지 2년이 조금 지났습니다. 2년이라는 시간에 연구실의 정신적 지주이시자 아버지의 역할을 맡으신 교수님을 비롯하여 연구실 선배, 후배, 업무 관계자, 등등 많은 사람들을 만나고 용접에 대한 공부를 하며 프로젝트 수행도 하면서 저 자신을 점점 발전시켜나갈 수 있었던 좋은 기회라고 생각합니다.

가장 먼저 저를 엔지니어로 성장할 수 있게 항상 채찍질과 기운을 불어 넣어주시며 전공지식뿐 아니라 대인관계, 문제해결방법, 대처방안, 아이디어, 창의력 같은 삶의 자세를 가르쳐주신 지도교수님인 조상명 교수님께 감사드립니다.

대학원 과정에서 많은 지도를 해주신 김인철 교수님, 배동명 교수님, 구자삼 교수님, 이운식 교수님, 민경철 박사님께도 진심으로 감사드립니다.

연구실에 들어와서 큰 선배로서 항상 잘 챙겨주시며 마음 써주시던 고명훈 선배님, 지금은 졸업하신 추용수, 문영덕, 이정현, 추환수, 박인기, 김성덕, 황규민, 김효원, 그리고 저의 첫 팀장이었던 오리 운영현님, 센스쟁이 정회원 배광무님에게 고마움을 전합니다. 그리고 박사과정의 큰누나 고미혜, 이제 곧 애기아빠가 될 함효식님, 또한 저의 동기들 듬직한 큰형 임성빈, 원장 하종문, 까불거리는 막내 박경도, 덤앤더머 정회원 정연호님에게도 고마움을 전합니다. 마지막으로 실험실의 동생들 카리스마 서지석, 짝지였던 신희섭, 저를 유난히 잘 따르고 좋아해준 손창희, '이젠 나도 석사다'를 외치는 개념 김남규, 학부생에서 준비된 석사로 비상하려는 후계자 전재호, 5인조 변재규, 자칭 실험실 귀염둥이 막내 이지은님에게 감사합니다. 그리고 연구실원들의 바쁜 업무를 대신해주시며 어머니처럼 따뜻하게 대해주신 박미숙님, 김외숙님께도 감사드립니다.

끝으로 항상 저를 믿어주시며 힘을 주시는 어머니, 아버지, 형에게도 고개 숙여 사랑과 감사의 마음을 전하며 이 논문을 마치겠습니다.