



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

박판 필릿용접구조물의 좌굴변형에 관한 연구



2009年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

秋 奐 銖

工學碩士 學位論文

박관 필릿용접구조물의 좌굴변형에 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



2009年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

秋 奐 銖

秋勇銖의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2009年 2月



主 審 工學博士 李 秉 雨 (印)

委 員 工學博士 徐 源 贊 (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	2
제 2 장 이론적 배경	3
2.1 용접변형의 개요	3
2.2 수치해석에 의한 필릿용접에서의 좌굴변형 모드	7
2.3 용융효율의 정의	8
제 3 장 비드 온 플레이트 용접에서 구속 유/무와 용접속도에 따른 변형량 ...	10
3.1 서언	10
3.2 실험 재료 및 방법	10
3.2.1 실험 재료	10
3.2.2 실험 방법	12
3.3 실험 결과 및 고찰	14
3.3.1 변형형태 정의	14
3.3.2 변형량 정의	14
3.3.2 결과 및 고찰	15
3.4 결론	19
제 4 장 비드 온 플레이트 용접에서 구속재간의 거리에 따른 변형량 ...	20
4.1 서언	20
4.2 실험 재료 및 방법	20
4.2.1 실험 재료	20
4.2.2 실험 방법	20
4.3 실험 결과 및 고찰	22

4.4 결언	24
제 5 장 비드 온 플레이트 용접에서 구속재의 열전도도에 따른 변형량 ...	25
5.1 서언	25
5.2 실험 재료 및 방법	25
5.2.1 실험 재료	25
5.2.2 실험 방법	25
5.3 실험 결과 및 고찰	27
5.4 결언	29
제 6 장 비드 온 플레이트 용접에서 대칭법 따른 변형량	30
6.1 서언	30
6.2 실험 재료 및 방법	30
6.2.1 실험 재료	30
6.2.2 실험 방법	30
6.3 실험 결과 및 고찰	32
6.4 결언	34
제 7 장 필릿용접에서의 변형량	35
7.1 서언	35
7.2 실험 재료 및 방법	35
7.2.1 실험 재료	35
7.2.2 실험 방법	35
7.3 실험 결과 및 고찰	37
7.3.1 변형측정방법의 정의	37
7.3.2 결과 및 고찰	39
7.4 결언	41
제 8 장 결론	42
참고문헌	43

A Study on the Buckling in Fillet Welds of Sheets

Hwan-Su, Chu

*Department of Materials Processing Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

The structures distorted by welding have to be corrected. Since the correcting process needs a lot of costs and time, it is very important to minimize the buckling distortion of thin plate welding structure. Therefore the aim of this study is to investigate the effect of single bead on plate welding and fillet welding on the buckling distortion. In the single bead on plate welding, it was found that the welding speed and welding sequence was the most effective factor on distortion. And in the fillet welding, there were 4 types of traditional buckling modes, the welding sequence was the most effect factor on the buckling distortion. However traditional distortion measuring method is not considered for the distortion correcting process costs of each buckling modes, therefore, in this study, the measuring method was developed to classify the buckling modes for torsion of specimen and buckling distortion depend on nodal point. The welding sequence to minimize correcting process can be determined by the sensitivity of twisted distortion and buckling distortion in the fillet welding.

Key words : Thin plate, Distortion correcting process cost, Buckling distortion, Single bead on plate welding, Fillet welding, Buckling mode, Welding speed, Symmetric welding sequence

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

최근 선체중량의 경량화를 위해 박판의 사용 비율이 증가하고 있으며, 특히 여객선이나 PCTC(Pure car and truck carrier)선과 같이 다수의 갑판을 갖는 선박에서는 상당량의 박판이 사용되고 있다.¹⁾ 박판의 용접 시 용접선 방향으로의 종수축과 압축잔류응력으로 인한 좌굴변형이 빈번하게 발생되어 변형 교정 작업에 많은 시간과 비용이 들어간다.¹⁾ 용접 조립 시에는 용접구조물의 변형상태를 최소로 제어하는 것이 매우 중요하다. 용접변형을 줄이기 위한 방법으로는 입열량을 낮게 하는 것과 열 및 기계적 하중을 이용한 용접수축 하중의 이완 등의 방법이 있다.²⁾ 하지만 박판에 대한 변형교정공수를 고려한 변형모드의 구분과 변형량 측정방법에 대한 연구는 그다지 찾아볼 수 없었으므로 그에 대한 연구가 필요한 실정이다.

1.2 연구목적 및 개요

본 연구에서는 단일 비드 온 플레이트 용접과 필릿용접에서의 좌굴변형 모드구분과 좌굴변형량에 대한 정량적인 방법을 제시하기 위해 싱글 비드 온 플레이트 마그(MAG)펄스용접에서 용접조건과 구속조건, 냉각조건³⁾ 및 용접순서⁴⁾에 따른 좌굴변형과 필릿용접에서의 변형형태와 변형량을 측정하여 특징을 구분하고 정량화 시켰다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 용접변형의 개요

맞대기 용접이나 필릿용접 등의 주변자유인 기본적인이음부에서 보여지는 수축과 변형을 다음과 같이 분류하여 각각에 대해 설명한다.

(1) 횡수축 (transverse shrinkage)

횡수축은 Fig. 2.1과 같이 용접선에 직각인 방향의 수축이다. 일반적으로 횡수축은 초층 용접에 의해서는 특히 크지만 2층째 부터는 이미 용착된 부분이 새롭게 용착되는 부분의 수축을 방해하기 때문에 증가율은 서서히 감소한다.

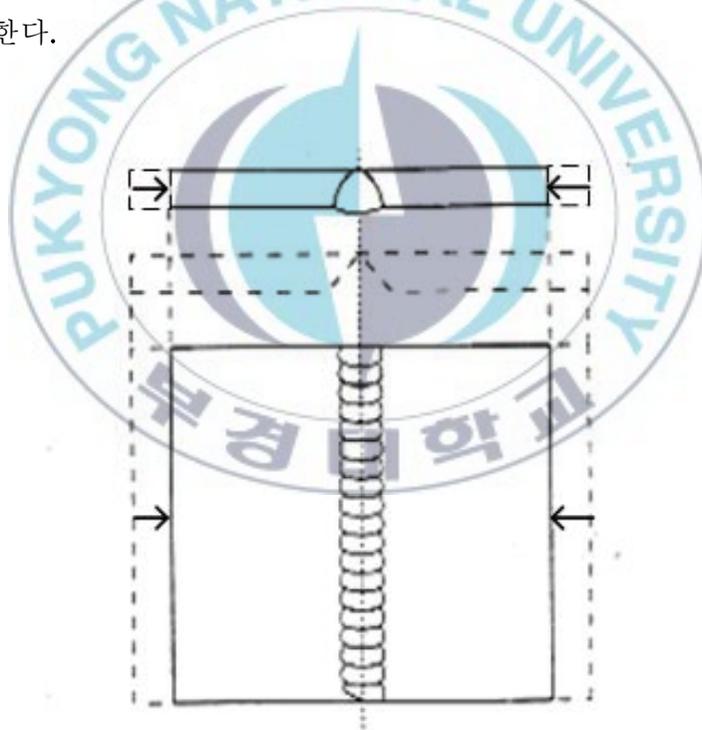


Fig. 2.1 Schematic of Transverse shrinkage

(2) 종수축(longitudinal shrinkage)

Fig. 2.2와 같이 용접선 방향의 수축을 말한다 이것은 용착금속의 수축이 주위의 판에 의해서 저항을 받기 때문에 적다 이 수축량은 일반적으로 용접길이의1/1000배로 횡수축에 비해서 매우 작다.

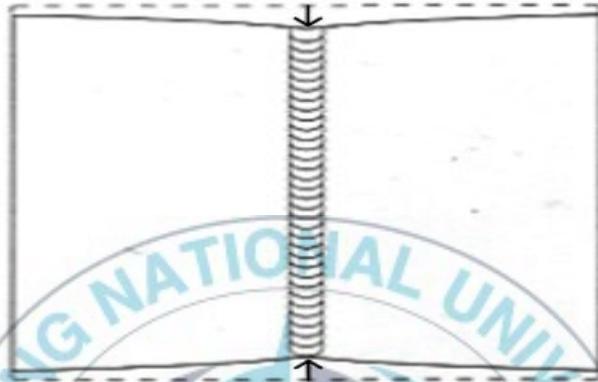
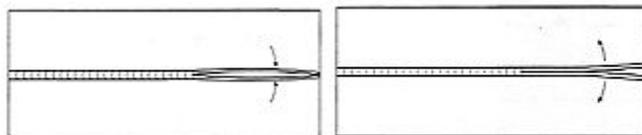


Fig. 2.2 Schematic of longitudinal shrinkage

(3) 회전변형 (rotational distortion)

Fig. 2.3과 같이 맞대기 용접에서 용접되지 않은 부분의 홈이 용접의 진행에 따라 벌어지거나 좁아지는 변형의 한 형태를 말한다.

이 개폐의 정도는 판두께 용접전류 및 용접속도에 따라서 다르게 나타나고, 용접전류가 높고 용접속도가 빠를 때에는 벌어지고, 용접전류가 낮고 용접속도가 늦을 경우에는 좁아지는 경향이 있다. 따라서, 서브머지드 용접의 경우에는 벌어지고, 손용접인 경우에는 좁아진다. 서브머지드 용접시 엔드 탭(end tab. 또는tab piece)을 붙이는 이유가 바로 이러한 이유 때문이다.



(a) Hand welding (b) Auto welding

Fig. 2.3 Schematic of rotational distortion

(4) 횡굽힘 변형 또는 각변형(transverse distortion, angular distortion)

Fig. 2.4와 같이 용접부를 중심으로 용접선에 직각인 방향으로 절곡(折曲)되는 변형이다 이것을 횡굽힘변형 또는 각변형이라 부른다. 이것은 판의 표리면의 온도차에 의한 것으로 수축량이 판두께 방향을 따라서 다르게 나타나기 때문이다 따라서 박판의 경우에는 각변화는 적고, 판두께가 증가하면 각변형은 증가해 가지만 어느 정도 두껍게 되면 모재의 구속력에 의해서 적게 된다.

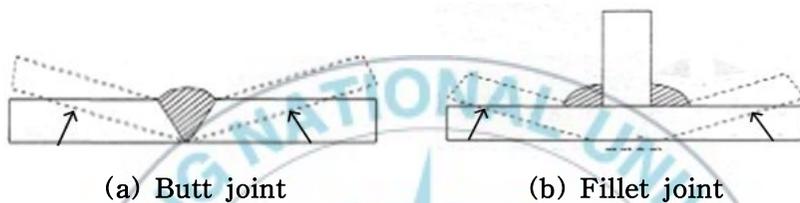


Fig. 2.4 Schematic of transverse distortion(angular distortion)

(5) 종굽힘 변형(longitudinal distortion)

Fig. 2.5과 같이 용접선 방향으로 구부러지는 것을 종굽힘 변형이라 한다 이것은 용접부의 위치가 이음부단면의 중립축에서 떨어져 있다면 용착 금속의 종수축력 때문에 모멘트가 발생하기 때문이다. T형과 같은 조립 거더의 경우 특히 이러한 경향이 많다.

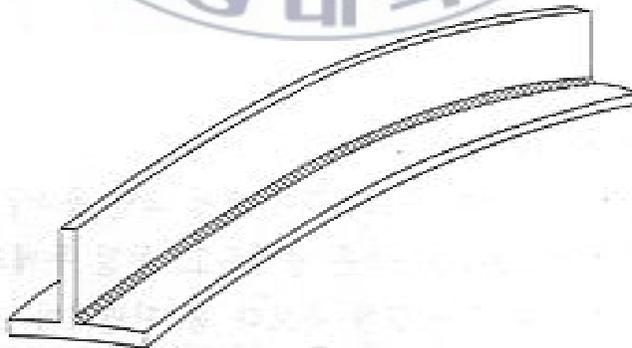


Fig. 2.5 Schematic of longitudinal distortion

(6) 좌굴형식의 변형(buckling distortion)

가느다란 기둥의 양단부에서 압축력이 가해지면 기둥은 압축변형에서 굽힘변형으로 급격히 변한다. 이와 같이 한 개의 변형양식에서 다른 변형양식으로 급격히 변하는 것을 좌굴이라 하며, Fig. 2.6과 같이 용접선방향으로 과도모양으로 구부러지는 이러한 양상의 변형을 좌굴형식의 변형이라 한다. 이외에 기둥이나 교량 등과 같은 길이가 긴 구조물은 초기의 재료고유의 비틀림이나 용접수축량의 미소한 불균형에 의해서 비틀림 형식의 변형이 발생하기 쉽다.

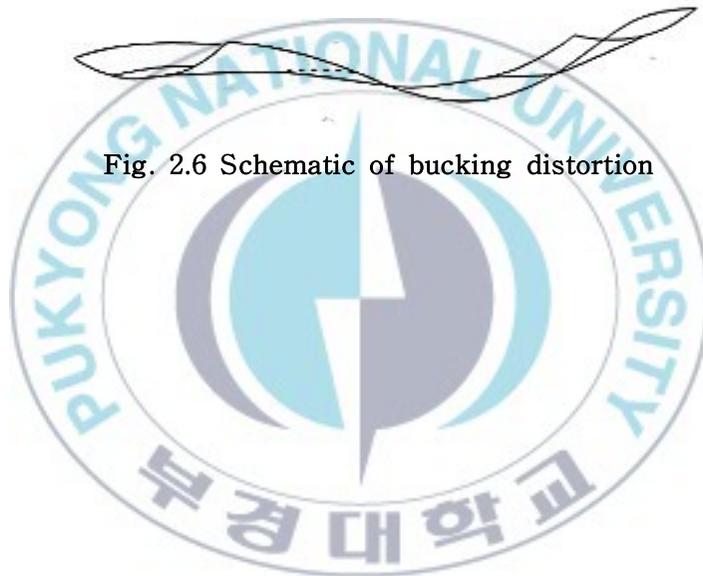


Fig. 2.6 Schematic of buckling distortion

2.2 수치해석에 의한 필릿용접에서의 좌굴변형모드

용접에 따른 열 사이클의 영향으로 용접이 완료된 후 용접선 근처의 좁은 영역에서는 용접선 방향으로 항복응력 크기에 상당하는 인장 잔류응력 그리고 나머지 부분에서는 이에 평형을 이루는 크기의 압축응력이 용접선 방향으로 작용한다. 이러한 잔류 응력상태에서 특히, 박판용접시 발생 가능한 좌굴변형형상을 우선 파악하기위해 좌굴변형 해석이 J.S Lee와 J.W Park에 의해 수행되어졌고 아래의 Fig. 2.7에 나타내었다.

Fig. 2.7(a)의 Mode 1은 용접선 방향으로 Sin 반파가 1/2개 있고 이들이 용접선을 중심으로 서로 반대되는 변형 형태로서 뒤틀린 형상에 해당된다. Mode 2는 Sin 반파 1개가 용접선을 중심으로 서로 반대되는 변형형상을 갖는 경우이며, 한편, Mode 3은 Sin 반파의 개수가 1개인 것은 Mode 2와 같으나 용접선을 중심으로 좌우 대칭형태로 변형이 되는경우이다. Mode 4는 Sin 반파가 용접선 방향으로 2개가 있고 이들의 방향이 용접선을 중심으로 반대되는 형상이다.¹⁾

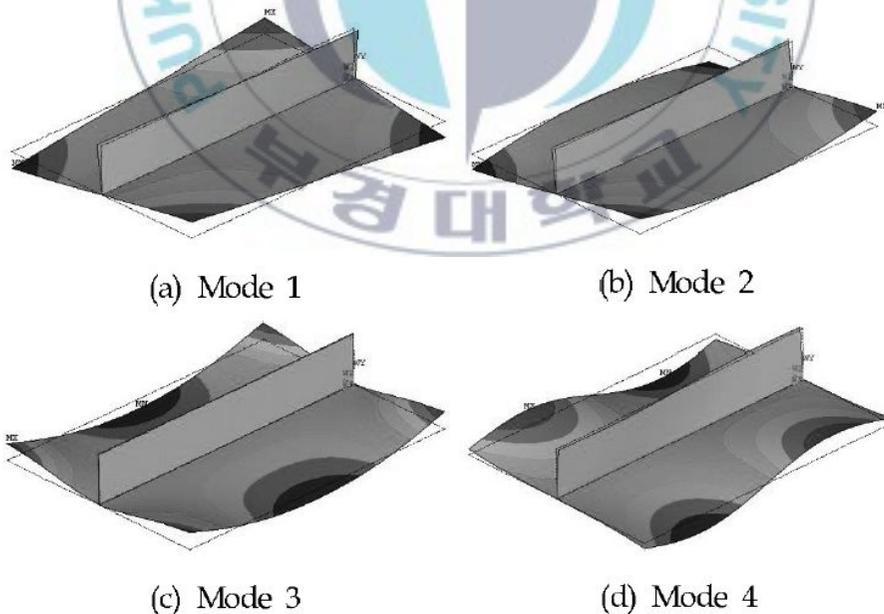


Fig. 2.7 Buckling modes for fillet welding¹⁾

2.3 용융효율(Melting efficiency)의 정의

아크용접공정에서 에너지는 전극으로부터 아크를 통해 모재의 표면으로 전달된다. 하지만 모든 에너지가 모재로 투여되지 못하고 일부만 모재로 투여되게 된다. 또 한 모재로 투여된 에너지 중 일부만 모재를 용융 시키는데 사용되게 된다. Fig. 2.8은 GTAW에서 에너지 분포의 모식도를 나타내었다.¹⁰⁾

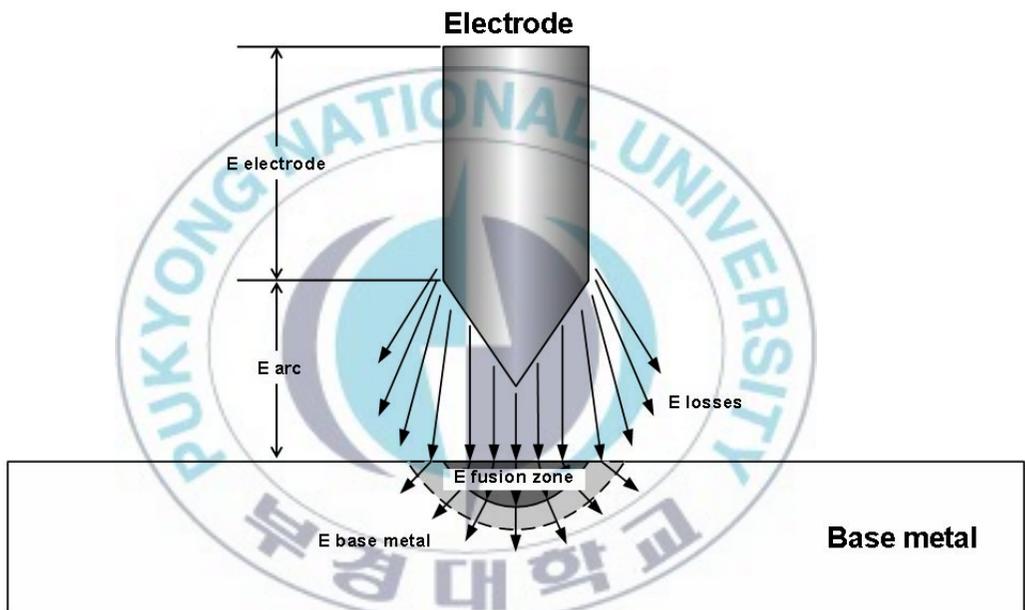


Fig. 2.8 Schematic of energy distribution in GTAW

투입된 총 에너지 중 모재를 용융시키는데 사용된 에너지가 E fusion zone에 해당되며 이 비를 계산 한 것이 용융효율이다. 용융 효율은 식(2.1)을 이용하여 계산되어질 수 있다¹¹⁾.

$$\text{용융 효율} = \frac{M E t}{\int_0^t I U dt} \quad (2.1)$$

여기서 M(g/sec)은 용융 속도로 1sec당 용융된 금속의 무게로 단위는 g/sec로 나타낸다. E는 비열과 잠열의 합에 대기온도와 금속의 용융온도와의 차이를 곱한 것으로 단위는 J/g이다. 비열은 금속의 상을 변화 시키지 않고 1g의 금속을 1°C 올리는데 필요한 열량이고, 잠열은 금속의 온도는 상승시키지 않고 1g의 금속의 상을 변화 시키는데 필요한 열량이다. 연강의 비열은 1080J/g이고 잠열은 206J/g이다. I는 전류, U는 전압 그리고 t는 시간을 나타낸다.

용융 속도 M은 식 (2.2)와 같은 방법을 통해 구해질 수 있다.

$$M = A_c \times S_w \times \text{밀도} \quad (2.2)$$

여기서 A_c 는 횡단면적(mm^2), S_w 는 용접 속도(mm/sec)를 나타내고 일반적인 강의 밀도인 7.87g/cm^3 을 사용하여 계산을 실시하였다.

제 3 장 비드 온 플레이트 용접에서 구속 유/무와 용접 속도에 따른 변형량

3.1 서언

본 장에서는 싱글 비드 온 플레이트 용접에서 구속상태와 구속하지 않은 상태로 나누어 용접속도에 따른 변형을 관찰하기 위해 실험을 실시하였고, 용접 후 발생하는 변형의 형태관찰과 변형량을 측정하였다.

3.2 실험 재료 및 방법

3.2.1 실험 재료

본 실험에서는 폭 150mm, 길이 300mm, 두께 3mm의 SS400을 사용하였고, OTC의 DP-500용접기와 YASKAWA의 6축 다관절로봇을 사용하였다. 마그(MAG)펄스 용접으로 싱글 비드 온 플레이트 용접을 실시하였다. Fig 3.1과 3.2에 용접기와 로봇의 사진을 나타내었다.

Table 3.1은 실험에 사용된 SS400의 화학조성과 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 3.1 Chemical composition and mechanical properties of SS400

(a) Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.26	0.61	0.13	0.17

(b) Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
361	481.7	24



Fig. 3.1 Welding machine(DP-500)

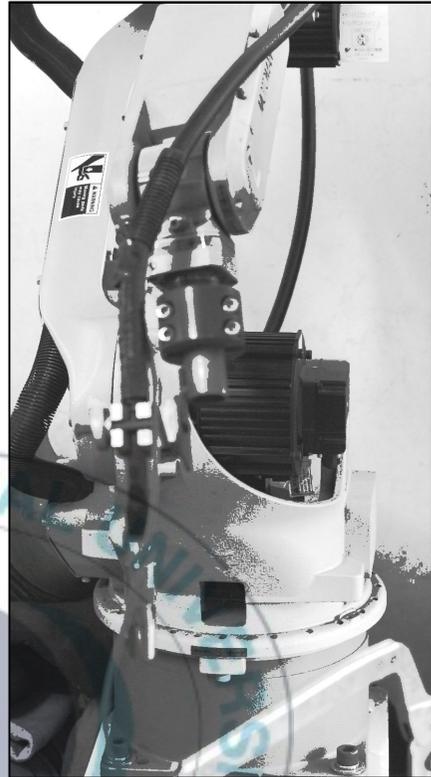


Fig. 3.2 Welding robot(HP-6)

3.2.2 실험 방법

Fig. 3.3은 실험에 사용된 구속 방법에 대한 상세 모식도를 나타낸다. 두께 6mm의 Cu 백킹 플레이트(Backing plate)위에 모재(Base Metal)을 두고, 구속 없이 용접을 하였고, 구속한 경우는 D_{SB} 를 30mm로 하여 용접을 실시하였다. Fig. 3.4는 실험셋팅의 사진을 나타내었다.

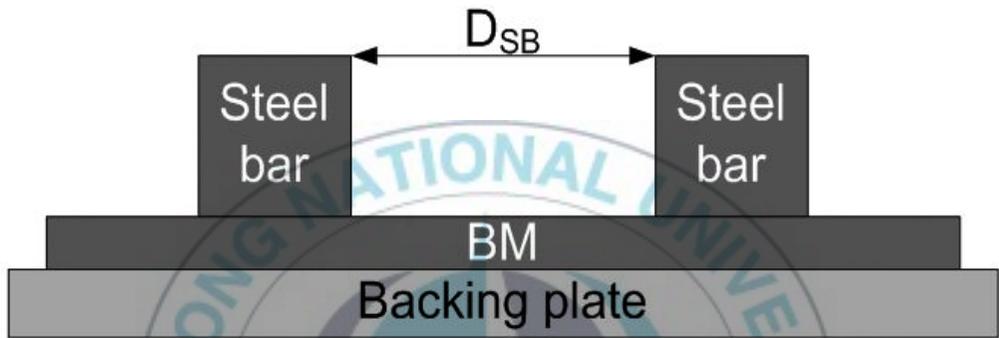


Fig. 3.3 Schematic of fixing condition(bead on plate)

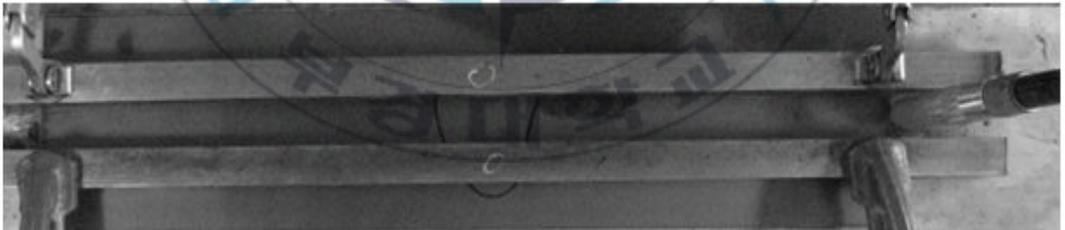


Fig. 3.4 Experimental setting

Table 3.2는 실험 조건을 나타낸다. 용착단면적을 9.02mm^2 로 고정시켰고, D_{SB} 를 30mm와 ∞ (free)로 각각 용접속도를 변경하여 용접하였다.

Table 3.2 Experimental conditions

Base metal	Mild steel(150x500x3mm)				
Wire	Solid(ϕ 1.2mm)				
Deposited metal area	9.02mm^2				
Shield gas	Ar - CO ₂ 20%(MAG), 20 l /min				
Backing plate	Cu				
Welding speed(cpm)	150	120	90	60	30
Current(A)	337	284	222	150	79
Voltage(V)	24.4	22.8	22.1	20.2	18.4
CTWD(mm)	22.5	20.5	17.6	15.0	13.0
Progressive angle	Forehand 15°		0°		
D_{SB} (mm)	30, ∞				

3.3 실험 결과 및 고찰

3.3.1 변형형태 정의

비드 온 플레이트 용접에서 변형의 형태는 Fig. 3.5에 나타내었다. 용접 후 용접비드면이 볼록해지는 변형형태를 (a)“ \cap ”type변형으로, 용접 후 용접비드면이 오목해지는 변형형태를 (b)“U”type변형으로 각각 정의 하였다.

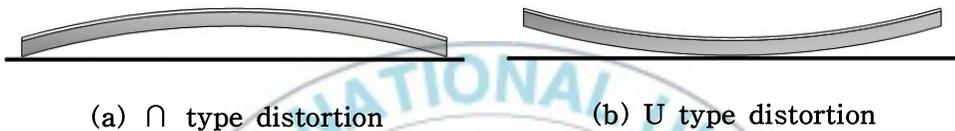


Fig. 3.5 Schematic of distortion types for bead on plate welding

3.3.2 변형량 정의

비드 온 플레이트 용접에서는 종방향 변형이 주를 이루었으며 Fig. 3.6 에서처럼 변형량은 변형형태 별로 변형된 시험편을 정반위에 옆으로 세워 용접시작부와 끝부분에 실을 접촉시켜 팽팽하게 당긴 후 실과 시험편까지의 거리(δ)를 변형량으로 정의하여 측정하였다.

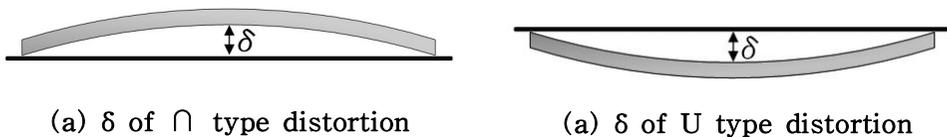
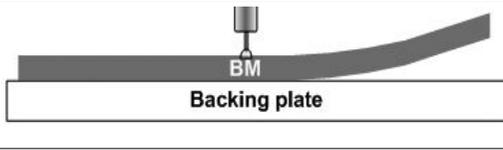
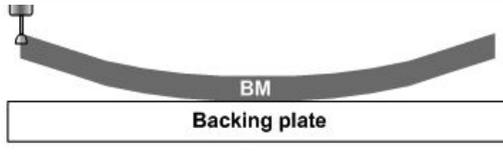


Fig. 3.6 Schematic of distortion for bead on plate welding

3.3.3 결과 및 고찰

Table 3.3은 자유상태의 시험편의 변형을 나타낸 모식도로 토치가 용접 시작부, 50%, 그리고 끝에 있을 때를 나타내었다. 아크개시 후 토치가 50%위치에서 용접이 완료된 부분이 응고되면서 발생하는 인장응력으로 시작부가 떠올랐고, 토치가 용접선의 끝에 가까워지면 시험편의 끝부분이 인장응력으로 인해 변형이 이미 발생되어 떠오른 것이 관찰되었다. 60cpm과 30cpm 속도에서는 용접완료 후 비드가 있는 면을 위로 하여 “U”자 형태로 변형이 완료 되었으나 90cpm이상의 용접속도에서는 용접완료 후 50초 정도를 기점으로 변형이 “∩”형태로 변형이 완료되었으며 그 형태를 Fig. 3.7에 모식도로 나타내었다. 변형량은 Table 3.4와 3.5에서 보 이듯이 용접속도가 증가 할수록 변형량은 감소를 하였고 용융효율이 증가 하였다. 이는 용접속도의 증가로 용융효율이 증가하고 그로 인해 변형량이 감소하였다는 S. J. Yun⁶⁾과 Y. D. Moon⁷⁾의 연구결과와 일치한다. Fig. 3.8과 3.9는 용접속도에 따른 변형량과 용융효율을 나타낸다.

Table 3.3 Distortion motion with torch position on welding process on free fixing condition

Torch position on BM	Shape of specimen
Start	
50%	
End	

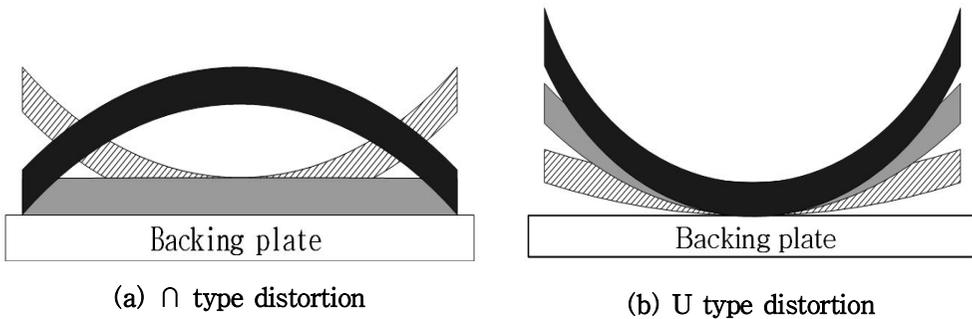
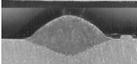
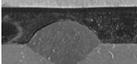


Fig. 3.7 Schematic of distortion motion after welding by the passage time (▨ : just after arc off, ▤ : after 50s, ▥ : after 100s)

Table 3.4 Distortion and welds shape with various welding speed on D_{SB}

D_{SB}	welding speed (cpm)	Welds shape	Distortion (mm), type
∞	30		19.0, U
	60		14.0, U
	90		13.0, \cap
	120		11.0, \cap
	150		12.0, \cap
30	30		7.5, U
	60		7.2, U
	90		7.2, U
	120		6.0, U
	150		5.0, U

Table 3.5 Cross section, ME and Heat input with various welding speed on D_{SB}

D_{SB}	Welding speed (cpm)	Cross section	Cross section area (mm^2)	Heat input (J/mm)	ME (%)
∞	30		13.01	290.0	45.4
	60		14.22	270.7	53.1
	90		15.16	261.8	58.6
	120		15.57	253.7	62.1
	150		16.24	249.8	65.8
30	30		12.54	289.6	43.8
	60		13.79	270.9	51.5
	90		15.46	260.8	59.9
	120		14.98	255.8	59.2
	150		15.91	251.1	64.1

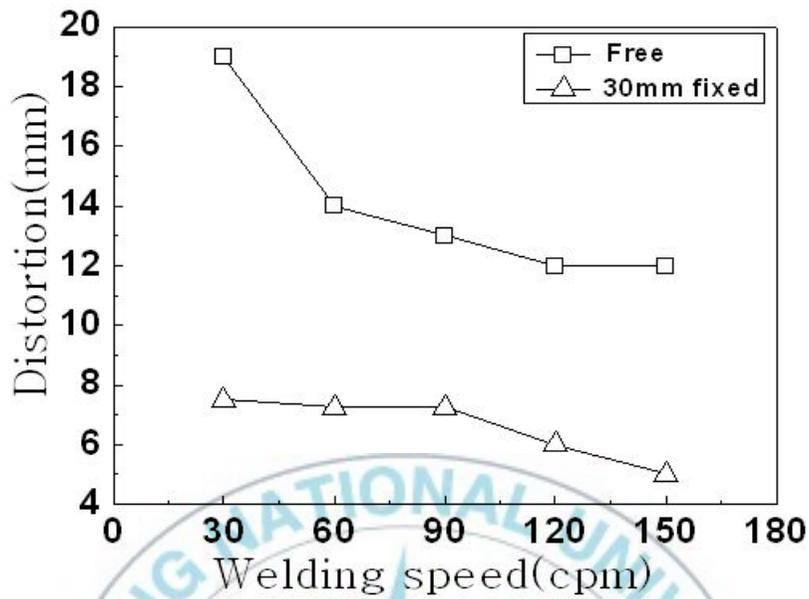


Fig. 3.8 Distortion with various welding speed on free & 30mm fixed

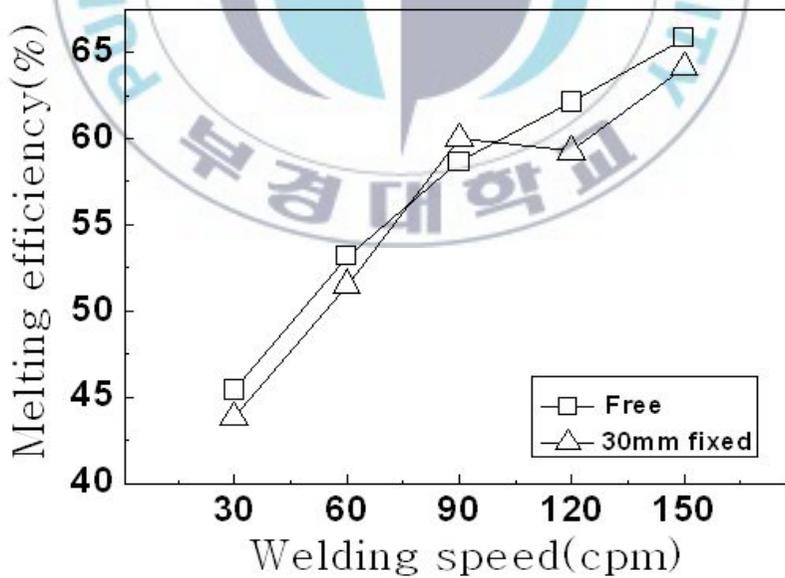


Fig. 3.9 Melting efficiency with various welding speed on free & 30 mm fixed

3.4 결론

두께3mm의 박판에 비드 온 플레이트용접에서 구속조건과 용접속도를 변경하여 용접한 후 그 변형특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구속을 하지 않은 상태에서 저속용접일 때 \cap type 변형이 나타났고, 고속용접에서는 U type 변형이 나타났다.

2) 구속을 하였을 때는 항상 U type 변형이 나타났다.

3) 용접속도가 증가 할수록 용융효율이 증가하고 그에 따라 변형량이 감소하였다.



제 4장 비드 온 플레이트 용접에서 구속재간의 거리에 따른 변형량

4.1 서언

본 장에서는 구속간거리(D_{SB})에 따른 변형량을 관찰하기 위한 실험으로 D_{SB} 를 30mm, 100mm, ∞ 로 나누어 실험하였고, 단면적을 통해 용융효율을 계산 하였다.

4.2 실험 재료 및 방법

4.2.1 실험 재료

본 실험에서는 3장과 동일하게 폭 150mm, 길이 300mm, 두께 3mm의 SS400을 사용하였고, 마그(MAG)펄스 용접을 이용해 싱글 비드 온 플레이트 용접을 실시하였다.

4.2.2 실험 방법

Fig. 4.1은 실험에 사용된 구속 방법에 대한 상세 모식도를 나타낸다. 두께 6mm의 Cu 백킹 플레이트(Backing plate)위에 모재(Base Metal)을 두고, 구속간 거리인 D_{SB} 를 30mm, 100mm, ∞ 로 하여 용접을 실시하였다.

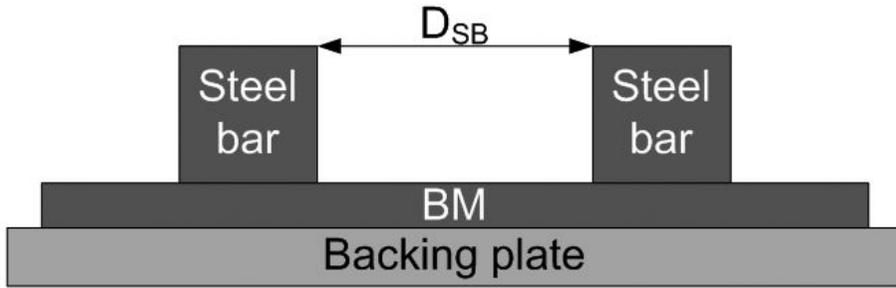


Fig. 4.1 Schematic of fixing condition(bead on plate)

Table 4.1는 실험 조건을 나타낸다. 용착단면적을 9.02mm^2 로 고정시켰고, D_{SB} 를 30mm와 ∞ (free)로 나누어 용접속도를 변경하여 각각 용접하였다.

Table 4.1 Experimental conditions

Base metal	Mild steel(150x500x3mm)
Wire	Solid($\phi 1.2\text{mm}$)
Deposited metal area	9.02mm^2
Shield gas	Ar - CO ₂ 20%(MAG), 20 ℓ /min
Backing plate	Cu
Welding speed(cpm)	150
Current(A)	337
Voltage(V)	24.4
CTWD(mm)	22.5
Progressive angle	Forehand 15°
D_{SB} (mm)	30, 100, ∞

4.3 실험 결과 및 고찰

용접속도가 빠를수록 용융효율의 증가로 인해 변형량이 감소하므로 가장 빠른 용접속도인 150cpm으로 용접이 실시되었다. Table 4.2는 구속거리에 따른 변형량 시험편의 횡단면, 입열량, 용융효율, 변형량을 나타내었다. Fig.4.2에 D_{SB} 에 따른 변형량을 그래프로 나타내었다. 비슷한 입열량이라 하더라도 D_{SB} 가 짧은 경우 변형량이 더 감소하였으며, 이는 용접부가 자유롭게 변형할 수 있는 공간이 D_{SB} 가 긴 경우보다 더 작으므로 변형이 더 작게 된 것으로 보인다.

Table 4.2 Cross section, ME, heat input, and distortion with long and short distance fixing

D_{SB} (mm)	Cross section	Cross section area (mm ²)	Heat input (J/mm)	ME (%)	Distortion (mm)
30		15.91	251.1	64.1	5.0
100		15.64	257.6	61.4	9.5
∞		13.01	249.8	65.8	12.0

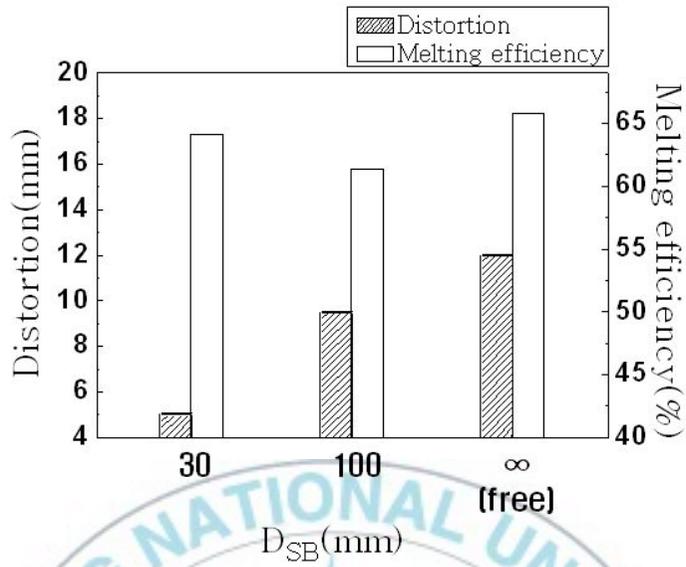
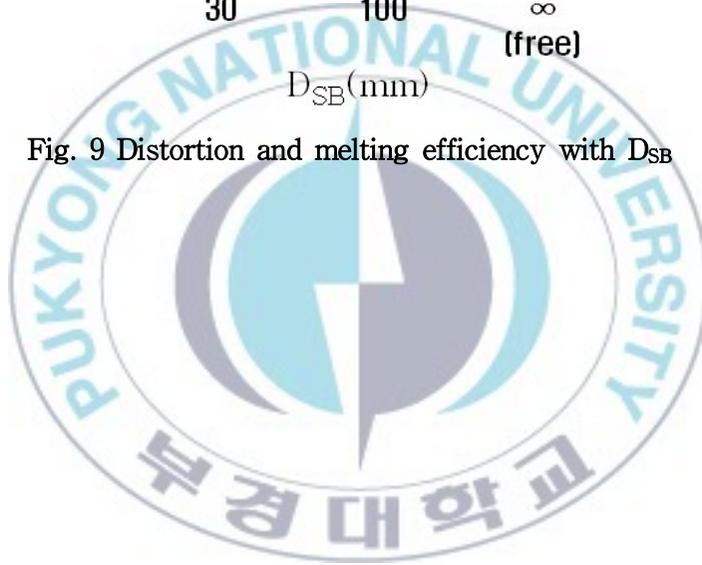


Fig. 9 Distortion and melting efficiency with D_{SB}



4.4 결론

두께3mm의 박판에 비드 온 플레이트용접에서 구속간 거리를 변경하여 용접한 후 그 변형특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구속간거리가 ∞ 일 때 변형량이 가장 컸으며 30mm일 때 가장 작았다.
- 2) 입열량이 비슷하더라도 구속간 거리가 가까울수록 변형량이 감소하였으므로 구속간 거리를 최대한 짧게 하는 것이 변형감소효과가 클 것이다.



제 5 장 비드 온 플레이트 용접에서 구속재의 열전도도에 따른 변형량

5.1 서언

본 장에서는 구속재의 열전도도에 따른 변형량을 관찰하기 위한 실험으로 흡열구속, 단열구속, 스틸 바 구속으로 나누어 용접하고, 단면적을 통해 용융효율을 계산 하였다.

5.2 실험 재료 및 방법

5.2.1 실험 재료

본 실험에서는 3장과 동일하게 폭 150mm, 길이 300mm, 두께 3mm의 SS400을 사용하였고, 마그(MAG)펄스 용접을 이용해 싱글 비드 온 플레이트 용접을 실시하였다.

5.2.2 실험 방법

Fig. 5.1은 실험에 사용된 구속 방법에 대한 상세 모식도를 나타내며, Table 5.1에 각 구속조건 별로 사용된 재료를 나타내었다.

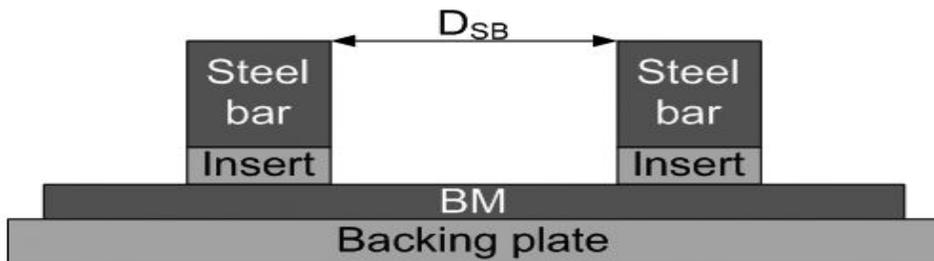


Fig. 5.1 Schematic of fixing condition(bead on plate)

Table 5.1 Materials of insert and distance of steel bars for fixing condition of base metal

Condition	D_{SB} (mm)	Insert(6mm)	Backing plate(6mm)
Steel bar only	30	N/A	Cu
Heat insulated	30	N/A	Insulator
Heat conducted	30	Cu	Cu

Table 5.2는 실험 조건을 나타낸다. 기본 용접조건은 4장과 동일하며 구속재의 종류만 바꾸어 용접하였다.

Table 5.2 Experimental conditions

Base metal	Mild steel(150x500x3mm)
Wire	Solid(ϕ 1.2mm)
Deposited metal area	9.02mm ²
Shield gas	Ar - CO ₂ 20%(MAG), 20 ℓ /min
Welding speed(cpm)	150
Current(A)	337
Voltage(V)	24.4
CTWD(mm)	22.5
Progressive angle	Forehand 15°
D_{SB} (mm)	30
Type of fixture	Steel bar only Heat insulated Heat conducted

5.3 실험 결과 및 고찰

Table 5.3은 구속재의 열전도도에 따른 변형의 실험에 대한 횡단면, 용융효율, 입열량, 변형량을 나타내었고, Fig. 5.2는 구속재 별 변형량을 나타내었다. 단열(heat insulated)구속, 스틸 바구속, 흡열(heat conducted)구속 순으로 변형량이 감소하였다. 즉 입열량은 비슷하더라도 열전달이 잘 되는 구속재를 사용하면 변형량은 더욱 감소하였다. Ju Li 등³⁾은 GTAW 용접에서 용접 중 용접부 바로 뒤에 CO₂가스를 분사시켜 용접부의를 급랭시켜 변형량을 획기적으로 줄인바가 있으며 본 실험에서도 냉각속도를 빠르게 하기위해 열전도도가 스틸 바보다 5배정도 높은 구리판을 사용하여 용접을 하였으나 CO₂가스로 냉각시키는 것보다 냉각 효율이 떨어져 변형량의 감소폭이 작은 것으로 판단된다.

Table 5.3 Cross section, ME, heat input, and distortion with various fixing condition

Type of fixture	Cross section	Cross section area (mm ²)	Heat input (J/mm)	ME (%)	Distortion (mm)
Steel bar		15.91	251.1	59.2	5.0
Heat conducted		15.71	253.8	62.6	4.8
Heat insulated		15.62	248.3	63.6	6.0

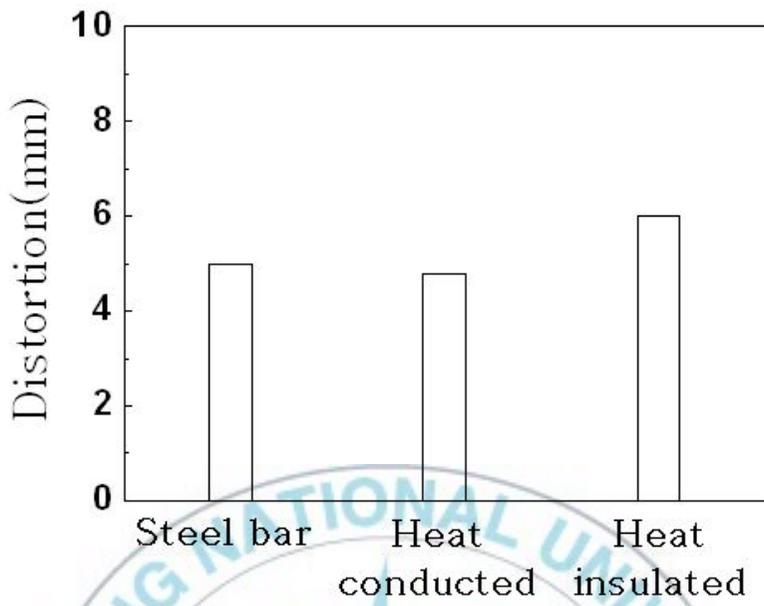


Fig. 5.2 Distortion with type of fixture

5.4 결론

두께3mm의 박판에 비드 온 플레이트용접에서 구속재간 거리를 30mm로 고정하고, 구속재의 열전도도를 변경하여 용접한 후 그 변형특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열전달이 잘되는 구속재를 사용하면 변형량은 더욱 감소하다.
- 2) CO₂가스에 의한 급속냉각에서는 변형량이 크게 줄었지만 본 실험에서는 구속재에 의한 냉각효과가 그다지 높지 않아 변형량의 감소폭이 작았다.



제 6 장 비드 온 플레이트 용접에서 대칭법적용에 따른 변형량

6.1 서언

본 장에서는 대칭법에 따른 변형량을 알기위한 실험조건으로, 순차적으로 한 번에 용접비드를 형성한 순차적 용접법과 센터우선 대칭법, 엔드우선 대칭법으로 용접한 후, 단면적을 통해 용융효율을 계산 하였다.

6.2 실험 재료 및 방법

6.2.1 실험 재료

본 실험에서는 3장과 동일하게 폭 150mm, 길이 300mm, 두께 3mm의 SS400을 사용하였고, 마그(MAG)펄스 용접을 이용해 싱글 비드 온 플레이트 용접을 실시하였다.

6.2.2 실험 방법

대칭법은 하나의 비드를 여러 개로 나누어 용접하며, 나누어진 비드로 인해 조그만 변형 현상을 갖는 조각들이 전체적으로 볼 때는 용접물의 형태에 중요치 않게 되는 변형형태를 가지게 만드는 후퇴 용접 기술⁵⁾의 응용이다. 구속방법은 5장과 동일하며, Fig. 6.1은 실험에 사용된 대칭법의 용접순서에 대한 모식도를 나타낸다. 센터 우선 대칭법은 비드를 3개로 나누어 센터부분을 먼저 용접하는 방법으로 Fig. 6.1에 나타낸 ①, ②, ③ 순서로 정의하여 용접하며, 엔드우선 대칭법은 엔드부분을 먼저 용접하는 방법으로 ④, ⑤, ⑥ 순서로 정의하여 용접한다.

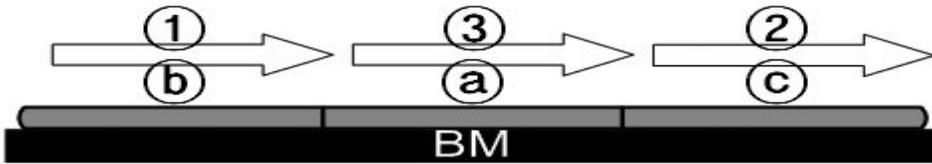


Fig. 6.1 Schematic of symmetric welding sequence

Table 6.1는 실험 조건을 나타낸다. 용착단면적을 9.02mm^2 로 고정시켰고, D_{SB} 를 30mm와 ∞ (free)로 나누어 용접속도를 변경하여 각각 용접하였다.

Table 6.1 Experimental conditions

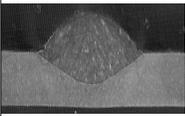
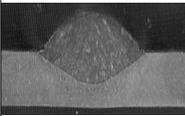
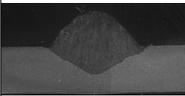
Base metal	Mild steel(150x500x3mm)
Wire	Solid($\phi 1.2\text{mm}$)
Deposited metal area	9.02mm^2
Shield gas	Ar - CO ₂ 20%(MAG), 20 ℓ/min
Backing plate	Cu
Welding speed(cpm)	150
Current(A)	337
Voltage(V)	24.4
CTWD(mm)	22.5
Progressive angle	Forehand 15°
D_{SB} (mm)	30, 100, ∞
Sequence order	Sequential Center first Ends first

6.3 실험 결과 및 고찰

구리판을 삽입재로 넣는 방법이 변형량이 가장 작지만 그 감소폭이 미미하여 작업성이 비효율적이므로 여기서는 스틸 바만을 사용하여 용접을 실시하였다. Pierluigi Mollicone 등⁴⁾은 박판용접의 좌굴변형감소에 있어 “균형적입열(Balanced heat input)”을 강조 하였고, 용접접합편람⁸⁾에서는 변형감소를 위해 용접선길이의 감소를 강조하였다. 이에 본 연구에서는 동일한 용접선의 길이를 3개로 나누어 용접선중심을 기준으로 균형적으로 입열을 주는 방법을 선택하였다. Table 6.2는 용접비드를 한 번에 형성한 순차적 용접, 센터우선 대칭법 그리고 엔드우선 대칭법을 이용했을 때의 횡단면, 용융효율, 입열량, 변형량을 나타내었다. Fig. 6.2에 용접순서별 변형량을 나타내었다 대칭법을 사용할 때가 변형량이 가장 작았고, 변형량은 순차적 용접, 엔드우선 대칭법, 센터우선 대칭법 순으로 감소하였다.

센터우선 대칭법이 엔드우선 대칭법과 비교하여 센터에 먼저 형성된 용접비드가 나머지 부분을 용접할 때 발생하는 인장응력에 대해 저항하여 변형량이 더 감소한 것으로 판단된다. 비드 온 플레이트에서 변형량이 가장 많은 자유상태용접에 비해 변형량이 가장 작은 센터우선 대칭법을 비교했을 때 변형량은 70%정도 감소하였다.

Table 6.2 Cross section, ME, heat input, and distortion

Weld sequence	Cross section	Cross section area (mm ²)	Heat input (J/mm)	ME (%)	Distortion (mm)
Sequential		15.91	251.1	64.1	5.0
Ends first		16.01	245.8	58.6	4
Center first		15.05	249.7	60.9	3.5

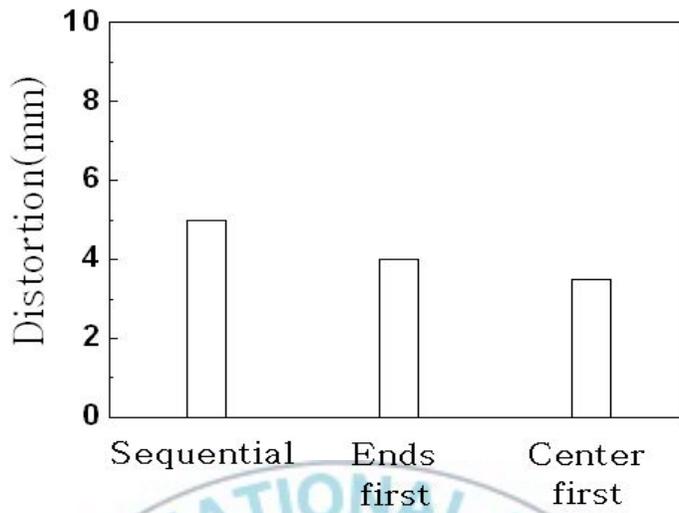


Fig. 6.2 Distortion with various welding sequence



6.4 결론

두께3mm의 박판에 비드 온 플레이트용접에서 대칭법을 사용하여 용접한 후 그 변형특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단일 비드 온 플레이트 용접에서 대칭법을 사용하였을 때 변형량이 가장 작았다.
- 2) 변형량은 순차적 용접, 엔드우선 대칭법, 센터우선 대칭법순으 감소하였다.



제 7 장 필릿용접에서의 좌굴변형량

7.1 서언

본 장에서는 용접 변형량이 가장 작게 나온 대칭법을 비드 온 플레이트 용접뿐만 아니라 필릿용접에도 적용가능여부와 변형량의 측정방법의 타당성을 검토하였다.

7.2 실험 재료 및 방법

7.2.1 실험 재료

본 실험에서 사용된 시험편은 SS400으로, 크기는 폭 30mm, 길이 300mm의 웹과 비드 온 플레이트 용접과 동일한 크기의 시험편을 플랜지로 사용하였다.

7.2.2 실험 방법

Fig. 7.1, 2, 3은 용접순서에 대한 모식도로 순방향 용접은 Fig. 7.1에 보이는 것처럼 두 용접방향을 서로 같은 방향으로, 역방향은 Fig. 7.2처럼 용접방향을 서로 반대방향으로, 대칭법은 여러 가지 용접순서를 고려하여, 각변형이 최소가 되면서 입열이 대칭적으로 되는 용접순서로하여 Fig. 7.3에 나타내었으며 센터우선 대칭법은 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥의 순서로 엔드우선 대칭법은 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥의 순서로 용접하였다.



Fig. 7.1 Schematic of same direction welding(fillet welding)



Fig. 7.2 Schematic of opposite direction welding(fillet welding)

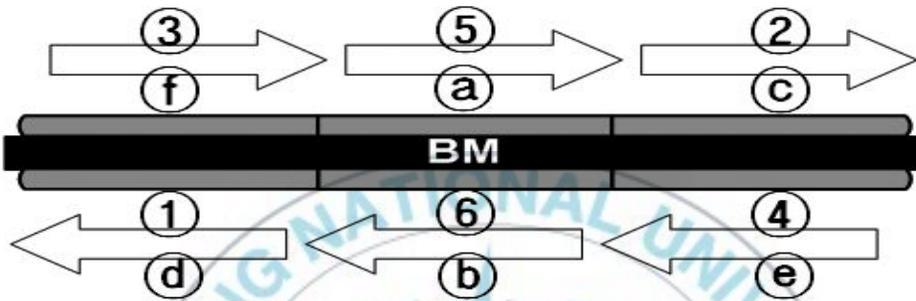


Fig. 7.3 Schematic of symmetric welding(fillet welding)

Table 7.1은 필릿용접에 사용된 용접조건을 나타내며 비드 온 플레이트 용접과는 달리 건전한 비드를 확보하기 위해 각장이 5.25mm가 되도록 각장설계를 하여 순방향, 역방향, 센터우선 대칭법, 엔드우선 대칭법으로 실험하였다.

Table 7.1 Welding condition of fillet welding

Base metal	Mild steel (150x500x3mm, 30x500x3mm)
Leg length	5.25mm
Welding speed(cpm)	90
Current(A)	315
Voltage(V)	25.2
CTWD(mm)	20
Progressive angle	Forehand 25°
Teaching point	0.5mm
D _{SB} (mm)	103
Sequence order	Same direction : SD Opposite direction : OD Ends first : EF Center first : CF

7.3 실험 결과 및 고찰

7.3.1 변형측정방법의 정의

(1) 기존의 고저변형측정법(D_{HL})에 의한 변형량

기존의 고저변형측정법(Distortion from High point to Low point : DHL)은 Fig. 7.4에 나타내었으며 시험편에서 δ 의 최대값을 변형량으로 정의 하였다.^{1),2),9)}

(2) 절점수를 고려한 고저변형측정법(D_{HLN})에 의한 변형량

절점수를 고려한 고저변형측정법(Distortion from High point to Low point by considering Nodal point : D_{HLN})은 Fig. 7.4에 나타내었으며 플랜지의 길이방향의 양끝 아랫부분을 잇는 직선을 기준으로 절점까지의 수직거리와 절점의 수를 정의하여 측정하였고 아래의 식(7.1), (7.2)로 계산되어질수 있다.

$$X = \sum |\delta_N| \times NP \quad (7.1)$$

$$D_{HLN} = \frac{X_R + X_L}{2} \quad (7.2)$$

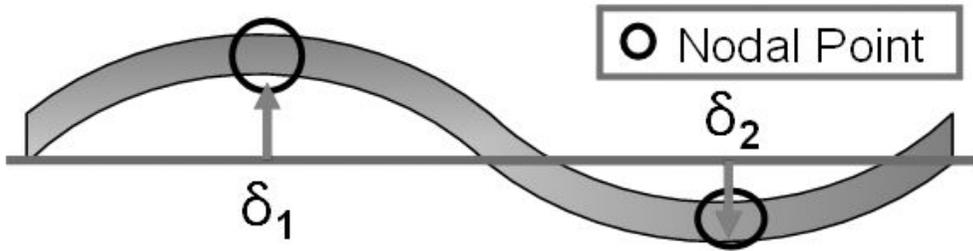


Fig. 7.4 Schematic of nodal point and δ with deformed flange in longitudinal direction

여기서, X는 플랜지의 길이방향쪽 한 면에 대한 변형량, δ 는 기준선에서 절점까지의 수직거리(mm), NP는 절점의 수이다.

(3) 비틀림각(TA)

비틀림각(Twisted Angle : TA)는 Fig. 7.5에서처럼 플랜지의 횡방향의 한쪽끝부분을 정반위에 고정시키고 반대쪽의 비틀어진 각을 비틀림각으로 정의하였다.

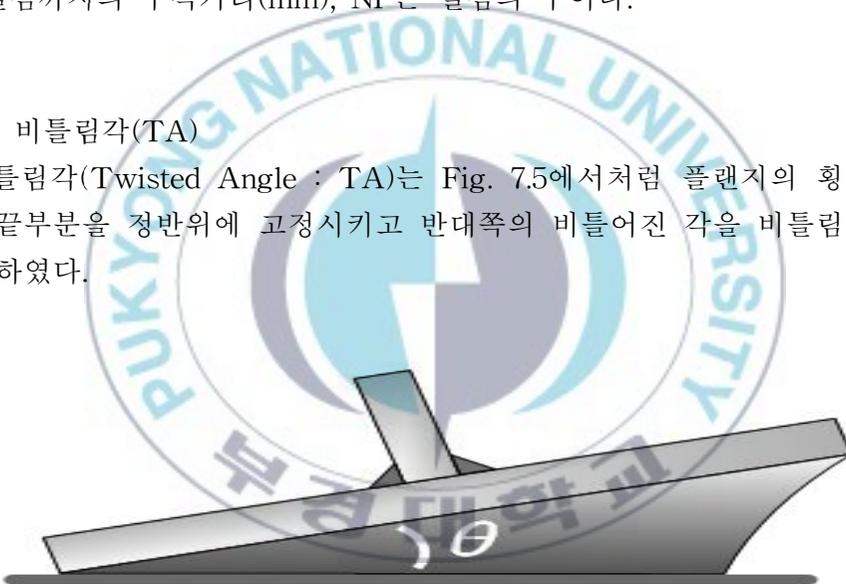


Fig. 7.5 Schematic of twisted angle in transverse direction

7.3.2 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞서 비드 온 플레이트로 용접한 실험 결과에서 변형량이 가장 작게 형성된 대칭법이 필릿용접에서도 적용가능의 여부를 확인하였다. 필릿용접은 비드 온 플레이트와는 달리 용접선이 2개가 되어 비드 온 플레이트에서 나타나지 않은 비틀림변형도 나타났다. 수치해석을 통해 박판의 필릿용접에서 가장 지배적인 4개의 좌굴모드¹⁾를 Fig. 2.7에 나타내었으며 본 실험에서 SD는 (a) Mode 1 형태로, OD는 (c) Mode 3, EF와 CF는 웹을 기준으로 한 면은 (d) Mode 4 다른 한 면은 (b) Mode 2의 형태로 플랜지의 좌우가 다른 형태로 나타났다.

실제 산업현장에서 용접변형이 생긴 곳은 변형교정이 필요하고, 변형교정은 좌굴형태에 따라 특히 절점의 수에 비례하여 교정에 드는 공수가 증가되므로 반드시 절점 수를 고려한 좌굴변형량과 또 다른 변형형태인 비틀림변형으로 구분하여 나타내어야 한다.

변형량 측정 방법을 절점수를 고려한 고저변형량과 비틀림변형(TA)으로 세분화 시켰다.

Table 7.2는 용접 후 변형형상과 측정방법에 따른 변형량인 기존 고저변형량(D_{HL}), 절점수를 고려한 고저변형량(D_{HLN}), 비틀림각(TA), 절점수(NP)를 나타내었으며 D_{HL} 은 OD, SD, EF, CF순으로 작아졌고, D_{HLN} 은 EF, CF, SD, OD순으로 작아졌으며 TA는 EF, OD, SD, CF순으로 작아졌다.

기존의 변형량 측정법인 D_{HL} 을 사용한 경우 CF가 변형량이 가장 작다고 말할 수 있지만 절점이 고려되지 않은 변형량이므로 실제 산업현장에서 변형교정공수까지 고려한 경우 이 용접법은 최선의 용접방법이라 할 수 없다.

비틀림변형에 대한 구속 또는 보강재가 잘 고려된 필릿용접부에서는 절점수를 고려한 변형량이 가장 작은 OD의 방법으로 용접을 하고, 비틀림에 대해 민감한 구조물이라면 TA가 가장 작은 CF방법을 선택하여 용접하는 것이 변형에 사용되는 공수를 최소화 시킬 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다.

Table 7.2 Welds shape and distortion with various welding sequence

	Weld shape	D_{HL} (mm)	D_{HLN} (mm)	TA (°)	NP
OD		4.3	3.2	5.2	2
SD		5.3	5.2	4.1	2
EF		5.5	8.4	7.0	3
CF		3.2	7.5	1.7	4

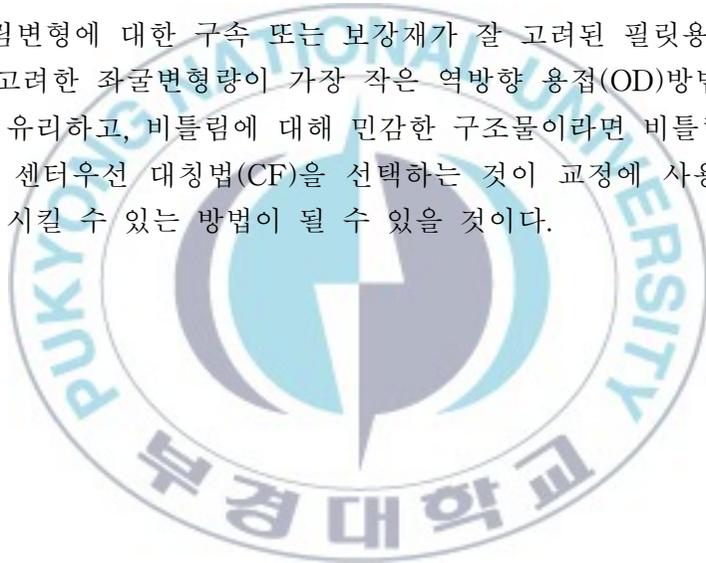


7.4 결론

두께3mm의 박판에 필릿용접을 대칭법을 적용하여 용접한 후 그 변형 특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 필릿용접부의 종방향좌굴 변형에서 좌굴변형형태는 통상 4가지로 나누지만, 본 연구에서는 절점수를 고려한 좌굴변형과 비틀림변형이라는 두 형태의 좌굴변형모드로 구분하여 변형교정공수를 효과적으로 고려할 수 있는 방법을 제안하였다.

2) 비틀림변형에 대한 구속 또는 보강재가 잘 고려된 필릿용접부에서는 절점수를 고려한 좌굴변형량이 가장 작은 역방향 용접(OD)방법으로 용접하는 것이 유리하고, 비틀림에 대해 민감한 구조물이라면 비틀림각(TA)이 가장 작은 센터우선 대칭법(CF)을 선택하는 것이 교정에 사용되는 공수를 최소화 시킬 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다.



제 8 장 결론

두께3mm의 박판에 비드 온 플레이트용접과 필릿용접을 구속조건과 용접순서별로 용접하여 그에 대한 변형형태별 변형량에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접속도가 증가 할수록 용융효율이 증가하고 그에 따라 변형량이 감소하였다.
- 2) 동일한 입열량이라 하더라도 구속간 거리가 가까울수록 변형량이 감소하고, 열전달이 잘되는 구속재를 사용하면 변형량이 소폭 감소하였다.
- 3) 단일 비드 온 플레이트 용접에서 대칭법을 사용하였을 때 가장 적은 변형이 발생하였고, 엔드우선 대칭법에 비해 센터우선 대칭법이 좀 더 변형이 적게 발생하였다.
- 4) 필릿용접에서 기존의 변형량 측정법인 고저측정법은 실제 산업현장에서 교정 공수가 고려되지 않으므로 그 측정법이 타당하다 할 수 없었다.
- 5) 새로운 변형량과 절점수를 고려한 고저측정법을 변형모드별로 비틀림 변형과 좌굴에 의한 절점수를 고려한 변형으로 나누어 제시하였다.
- 6) 비틀림변형에 대한 구속 또는 보강재가 잘 고려된 설계상에서는 절점수를 고려한 변형량이 가장 작은 역방향 용접(OD)방법으로 용접을 하고, 비틀림에 대해 민감한 구조물이라면 비틀림각(TA)이 가장 작은 센터우선 대칭법(CF)을 선택하여 용접하는 것이 변형에 사용되는 공수를 최소화 시킬 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Joo-Sung Lee and Jae-Woo Park : Application of Tensioning Method to Deformation Control of Thin Plate Fillet Weld, Journal of The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 22-1 (2008) pp 64-66 (in Korean)
2. Kyoung-Bok Jang, Jung-Gu Park, Jin-Hyuk Yang, Si-Hoon Cho, Tae-Won Jang : Study on the Analysis of Welding Induced Buckling Distortion in Thin Plate Block, Proceedings of the 2005 Autumn Annual Meeting of Korean Welding Society, Vol. 46 (2005) pp 23-25 (in Korean)
3. Ju Li, Qiao Guan, Yaowu Shi, Delun Guo, Yuxiao Du, Yongchun Sun : Studies on characteristics of temperature field during GTAW with a trailing heat sink for titanium sheet, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147 (2004) pp 328-335
4. Pierluigi Mollicone, Duncan Camilleri, Tom Gray : "Procedural influences on non-linear distortions in welded thin-plate fabrication", Thin-Walled structures, Vol. 46 (2008) pp 1021-1034
5. Pearson Education Korea : MODERN WELDING TECHNOLOGY, (2002) pp 697-700 (in Korean)
6. Seung-Jong Yun : Development of The Optimum Fillet Welding Process Considering Distribution of Penetration and Angular Distortion in Consumable Electrode Arc Welding, Master's Thesis of Pukyong National Univ. (2007) (in Korean)
7. Young-Duk Moon : The Effect of Process Parameters on Melting

Efficiency in High Speed Plasma Arc Welding of EGI Thin Plate,
Master's Thesis of Pukyong National Univ. (2008) (in Korean)

8. Korean welding society : Welding and Joining Handbook, Korean welding society, (1998) pp 397-398 (in Korean)
9. Myoung-Soo Han, Hyun-Uk Kim : Prevention of Welding-induced Free Edge Buckling Distortion in Thin-plated Panels, Proceedings of the 2007 Autumn Annual Meeting of Korean Welding Society, Vol. 48 (2007) pp 20-22 (in Korean)
10. Hyo-sic Ham : Effect of Arc Characteristic in A-TIG welding for Deep Penetration on Melting Efficiency and Angular Distortion, Master's Thesis of Pukyong National Univ. (2007) (in Korean)
11. J. Tusek, M. Suban : High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition, Journal of Materials Processing Technology Vol. 133 (2003) pp 207-213

학위과정 중 주요 학술지 게재 및 발표논문

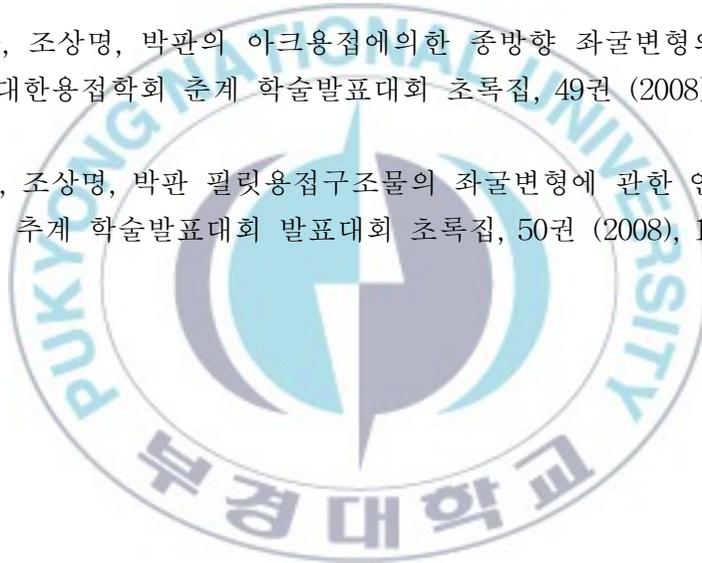
1. 주요 학술지 게재 논문

(1) 추환수, 조상명, 박관 필릿용접구조물의 좌굴변형에 관한 연구, 대한용접학회지, 심사중

2. 학술발표대회 발표논문

(1) 추환수, 조상명, 박관의 아크용접에 의한 종방향 좌굴변형의 저감기술 개발, 대한용접학회 춘계 학술발표대회 초록집, 49권 (2008), 5, pp82

(2) 추환수, 조상명, 박관 필릿용접구조물의 좌굴변형에 관한 연구, 대한용접학회 추계 학술발표대회 발표대회 초록집, 50권 (2008), 11, pp146



감사의 글

2005년 12월 용접 IT 연구실에 용접을 공부하기 위해 첫발을 디뎠고 어느덧 3년의 시간이 흘렀습니다. 짧지 않은 그 시간은 많은 연구실원들과 공부하고 같이 프로젝트를 수행하면서 지식뿐만 아니라 삶의 지혜 또한 얻을 수 있었던 소중한 기회가 된 것 같습니다.

가장 먼저, 전공지식뿐만 아니라 문제에 대한 접근 방법, 위기 대처 능력, 인간관계, 리더십과 같은 지혜도 함께 가르쳐주신 지도 교수님인 조상명 교수님께 감사드립니다.

대학원 과정에서 많은 지도를 해주신 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 이병우 교수님, 방국수 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

연구실에 들어와서 큰 선배로서 항상 듬직하게 생활하셨던 고명훈 선배님, 언제나 친형처럼 따뜻하게 많은 도움을 주었던 먼저 졸업한 고찬식, 조진안, 윤승중, 김대만, 김진욱, 박인기, 문영덕, 이정현, 김성덕, 황규민 님에게 고마움을 전합니다. 저의 대학원 동기로 항상 서로 힘이되고 도움이 되어주신 배광무, 윤영현, 김효원님에게 감사를 드리며 언제나 행운이 함께하길 바랍니다. 마지막으로 우리 연구실의 대모이자 큰누나이신 고미혜 선배님, 동생이지만 동생 같지 않은 함효식 선배님, 맡은 일을 성실히 잘 해나가는 임성빈, 언제나 날카로운 시선으로 주변과 사물을 살피는 샤프한 정연호, 최근 팀장을 맡아 고생이 많으신 김성호, 팀장이 아니어도 늘 팀장급의 일을 해내는 직속후배 하종문, 조용하지만 자기 일은 언제나 잘 해나가는 박경도, 이제부터 진정한 석사생활이 시작된 듬직한 서지석, 똑똑한 신희섭, 그리고 막둥이 김남규 후배님들께도 감사드립니다. 그리고 항상 연구실원들을 따뜻한 마음으로 돌봐주신 박미숙님께도 감사드립니다.

끝으로 학업을 계속할 수 있도록 밀어주시고 기도해주신 아버지, 어머니

니께 머리 숙여 감사드립니다. 그리고 동생을 위해 많은 도움과 격려를 주신 용수형님과 늘 그 옆에 계신 형수님과 사랑하는 우리 조카 연오에게 감사를 전합니다. 또한 저의 사랑스런 동생 추혜수에게 이 논문을 바칩니다.

