

박판 필릿용접구조물의 좌굴변형에 관한 연구

추 환 수* · 조 상 명**†

*부경대학교 대학원 소재프로세스공학과

**부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공

A Study on the Buckling in Fillet Welds of Sheets

Hwan-Su Chu* and Sang-Myung Cho**†

*Dept. of Materials Processing Eng., Graduate School, Pukyoung National Univ., Busan 608-739, Korea

**Div. of Advanced Materials Sci. and Eng., Dept. of Materials Processing Eng., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

†Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr

(Received November 6, 2008 ; Revised December 11, 2008 ; Accepted April 2, 2009)

Abstract

The structures distorted by welding have to be corrected. Since the correcting work needs a lot of costs and time, it is very important to minimize the buckling distortion due to welding of thin plate 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 were the most dominant factors on distortion. In the fillet welding, there were four typical buckling modes observed, and the welding sequence was the most influential factor on the buckling distortion. However typical distortion measuring method is not considered for the distortion correcting process costs of each buckling modes, therefore, in this study, the measuring method is developed to classify the buckling modes for torsion of specimen and buckling distortion depend on nodal point for the bead on plate welding specimen and fillet welds.

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

1. 서 론

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 있다¹⁾. 박판의 용접 시 용접선 방향으로의 종수축과 압축잔류응력으로 인한 좌굴변형이 빈번하게 발생되어 변형 교정 작업에 많은 시간과 비용이 소모된다¹⁾. 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 있다²⁾. 하지만 박판에 대한 변형교정공수를 고려한 변형모드의 구분과 변형량 측정방법에 대한 연구는 그다지 찾아볼 수 없었으므로 그에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 단일 비드 온 플레이트 용접과 필릿용접에서의 좌굴변형모드구분과 좌굴변형량에 대해 정량적인 방법을 제시하기 위해 싱글 비드 온 플레이트 마그(MAG)필스용접에서 용접조건과 구조조건, 냉각조건³⁾ 및 용접순서⁴⁾에 따른 좌굴변형과 필릿용접에서의 변형형태와 변형량을 측정하여 특징을 구분하고 정량화 시켰다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 두께 3mm의 SS400박판을 사용하였다. 비드 온 플레이트 용접용 시험편 크기는 폭 150mm, 길이 300mm이고, 필릿용접용 시험편 크기의 웹은 폭 30mm, 길이 300mm이고, 플랜지는 비드 온 플레이트 용접과 동일한 크기의 시험편을 사용하였다. 펄스MAG용접에는 $\Phi 1.2\text{mm}$ 의 솔리드 와이어를 썼다. OTC의 DP-500용접기와 YASKAWA의 6축 다관절로봇으로 용접하였다. 본 연구에 사용된 모재의 화학조성과 기계적 특성을 Table 1과 2에 나타내었다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 시험편 중앙에 하나의 비드 용접을 실시한 비드 온 플레이트 시험편과 T이음의 필릿용접부 양쪽에 용접하여 얻어지는 필릿용접 시험편으로 구분하여 실험하였다.

2.2.1 비드 온 플레이트 용접 실험방법

Fig. 1은 각 실험에서 이용한 구속방법의 모식도이며 D_{SB} 는 구속재간거리를 나타내고 구속재간거리의 중심에 용접 비드가 놓인다. D_{SB} (Distance of Steel Bar), 삽입재, 백킹 플레이트는 Table 3의 조건대로 구속재의 위치와 재료를 달리하여 실험하였다. 대칭법은 하나의 비드를 여러 개로 나누어 용접하며, 나누어

Table 1 Chemical composition of SS400 (Wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.26	0.61	0.13	0.17

Table 2 Mechanical properties of SS400

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

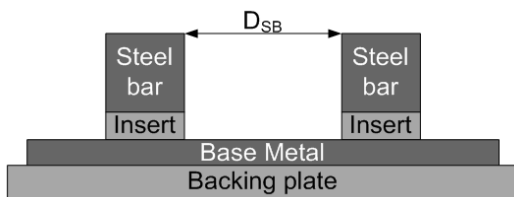


Fig. 1 Schematic of fixing condition (bead on plate)

Table 3 Materials of insert and distance of steel bars for fixing condition of base metal

Fixing condition	DSB (mm)	Insert	Backing plate(6t)
Free	∞	N/A	Cu
Steel bar only	30	N/A	Cu
Long distance	100	N/A	Cu
Heat insulated	30	N/A	Insulator
Heat conducted	30	Cu	Cu

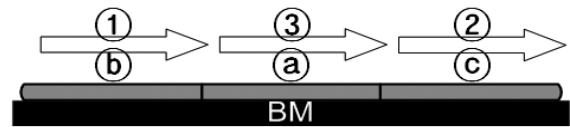


Fig. 2 Schematic of symmetric welding sequence (bead on plate)

진 비드로 인해 조그만 변형 현상을 갖는 조각들이 전체적으로 붙 때에 용접물의 형태에 중요치 않게 되는 변형형태를 가지게 만드는 후퇴 용접 기술⁵⁾의 응용이며 Fig. 2는 대칭법의 용접순서를 모식도로 나타낸 것으로 센터 우선 대칭법은 a, b, c순서로, 엔드 우선 대칭법은 ①, ②, ③의 순서로 정의하여 용접 하였다.

(1) 구속 유/무에서 용접속도에 따른 변형 실험

구속 유/무에서 용접속도에 따른 변형을 동일 용착단면적에서 용접속도의 증감에 따른 변형량을 관찰하기 위해 실험을 하였으며 자세한 용접조건은 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Experimental condition of the effect of welding speed on distortion of bead on plate welding

Fixed	Base metal	Mild steel(150×500×3t)				
	Wire	Solid($\phi 1.2$)				
	Deposited metal area	9.02mm ²				
	Shield gas	Ar - CO ² 20%(MAG), 20 l/min				
	Backing plate	Cu				
Exp.1	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°		
	DSB(mm)	30, ∞				

(2) 구속거리에 따른 변형 실험

Table 5 Experimental condition of DSB, type of fixture, sequence order

Fixed	Welding speed(cpm)	150
	Current(A)	337
	Voltage(V)	24.4
	CTWD(mm)	22.5
	Progressive angle	Forehand 15°
Exp.2	D _{SB} (mm)	30, 100, ∞
Exp.3	Type of fixture	Steel bar only Heat insulated Heat conducted
Exp.4	Sequence order	Sequential Center first Ends first

구속간거리(D_{SB})에 따른 변형량을 관찰하기 위한 실험으로 D_{SB}를 30, 100, ∞로 나누어 실험하였다. 자세한 용접조건은 Table 5의 Exp.2에 나타내었으며, 이때 사용된 백킹 플레이트는 Cu판이었다.

(3) 구속재의 열전도도에 따른 변형 실험

Table 5의 exp. 3은 구속재의 열전도도에 따른 변형량을 알기위한 실험조건이며 D_{SB}는 30mm로 고정시켰다. 이때의 구속방법은 Table 3에 나타내었다.

(4) 대칭법에 따른 변형 실험

Table 5의 exp.4는 대칭법에 따른 변형량을 알기위한 실험조건으로 D_{SB}를 30mm로 고정하였다. 먼저 순차적으로 한 번에 용접비드를 형성한 것과 Fig. 2의 대칭법으로 실험하였다.

2.2.2 필릿용접 실험방법

용접 변형량이 가장 작게 나온 대칭법을 비드 온 플레이트용접뿐만 아니라 필릿용접에도 적용할 수 있는지를 검토하였다. Table 6은 필릿용접에 사용된 용접조건을 나타내며 비드 온 플레이트 용접과는 달리 건전한 비드를 확보하기 위해 각장 5.25mm로 설계하여 순방향, 역방향, 센터우선 대칭법, 엔드우선 대칭법으로 실험하였다. 순방향 용접은 Fig. 3에 보이는 것처럼 두 용접방향을 서로 같은 방향으로, 역방향 용접은 Fig. 4처럼 용접방향을 서로 반대방향으로 하여 용접하였다. 대칭법은 여러 가지 용접순서를 고려하여, 각변형이 최소가 되면서 입열이 대칭적으로 되는 용접순서를 Fig. 5에 나타내었으며 센터우선 대칭법은 ④, ⑥, ③, ⑤, ①, ②의 순서로 엔드우선 대칭법은 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥의 순서로 용접하였다.

Table 6 Welding condition of fillet welding

Fixed	Base metal	Mild steel (150×500×3t, 30×500×3t)
	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
	DSB(mm)	103
Exp. 5	Sequence order	Same direction : SD Opposite direction : OD Ends first :EF Center first : CF



Fig. 3 Schematic of same direction welding (fillet welding)



Fig. 4 Schematic of opposite direction welding (fillet welding)

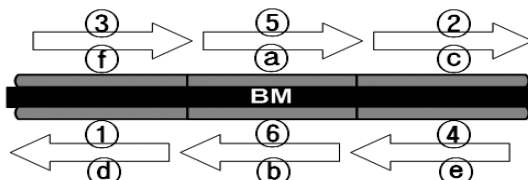


Fig. 5 Schematic of symmetric welding (fillet welding)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비드 온 플레이트 시편의 변형

실험 후 변형량은 변형된 시험편을 정반위에 옆으로 세워 용접시작부와 끝부분에 실을 접촉시켜 팽팽하게 당긴 후 실과 시험편까지의 거리를 변형량으로 정의하여 측정하였고 용융효율(Melting Efficiency)을 계산하기 위해 시험편의 단면을 연마하여 부식한 후 오토캐드로 디지털이징하여 식(1), (2)를 이용하여 계산하였다.

$$M = A_C \times S_W \times \rho \tag{1}$$

여기서, M은 용융속도(g/sec), Ac는 용융단면적(mm²), Sw는 용접속도(mm/sec), ρ는 밀도(g/mm³)이다.

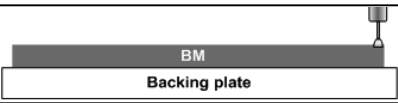
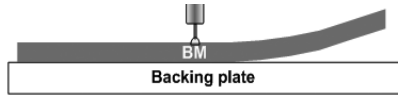
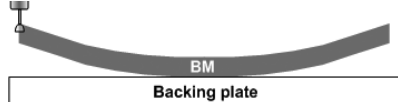
$$\text{Melting efficiency} = \frac{M E t}{\int_0^t I U dt} \tag{2}$$

여기서, E는 감열+잠열(J/g), I는 전류(A), U는 전압(V), t는 시간(sec)이고 전류와 전압은 계측장비를 통해 측정된 측정값을 사용하였다.

3.1.1 구속 유/무에서 용접속도에 따른 변형의 경향

Table 7은 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. 6에 모식도로 나타내었다. 변형량은 Table 8과 9에서 보이듯이 용접속도가 증가 할수록 변형량은 감소를 하였고 용융효율이 증가하였다. 이는 용접속도의 증가로 용융효율이 증가하고 그로 인해 변형량이 감소하였다는 S. J. Yun⁶⁾과 Y. D. Moon⁷⁾의 연구결과와 일치한다. Fig. 7과 8은 용접속도에 따른 변형량과 용융효율을 나타낸다.

Table 7 Distortion motion with torch position on welding process on free fixing condition

Torch position on BM	Shape of specimen
Start	
50%	
End	

3.1.2 구속거리에 따른 변형 실험결과

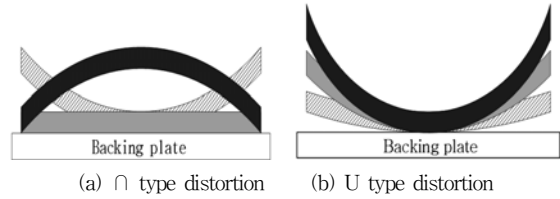


Fig. 6 Schematic of distortion motion after welding by the passage of time (▨ : just after arc off, ▒ : after 50s, ■ : after 100s)

Table 8 Distortion and welds shape with various welding speed on D_{SB}

DSB	welding speed (cpm)	Welds shape	Distortion (mm), type
∞	30		19.0, U
	60		14.0, U
	90		13.0, ∩
	120		11.0, ∩
	150		12.0, ∩
30	30		7.5, U
	60		7.2, U
	90		7.2, U
	120		6.0, U
	150		5.0, U

Table 9 Cross section, ME and Heat input with various welding speed on D_{SB}

DSB	Welding speed (cpm)	Cross section	Cross section area (mm ²)	Heat input (J/mm)	ME (%)
∞	30		13.01	8.06	45.4
	60		14.22	7.52	53.1
	90		15.16	7.27	58.6
	120		15.57	7.05	62.1
	150		16.24	6.94	65.8
30	30		12.54	8.05	43.8
	60		13.79	7.53	51.5
	90		15.46	7.25	59.9
	120		14.98	7.11	59.2
	150		15.91	6.98	64.1

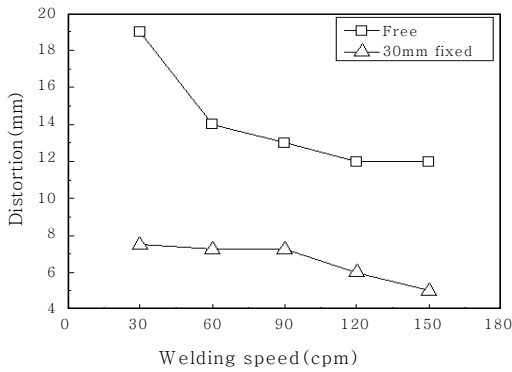


Fig. 7 Distortion with various welding speed on free & 30mm fixed

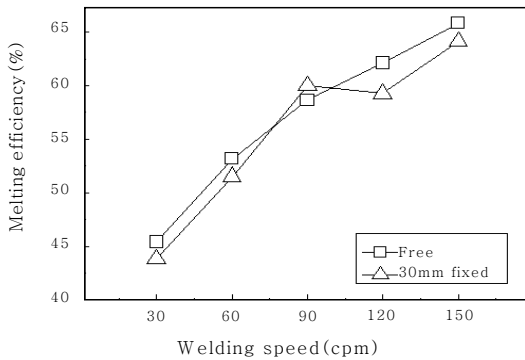


Fig. 8 Melting efficiency with various welding speed on free & 30mm fixed

용접속도가 빠를수록 용융효율의 증가로 인해 변형량이 감소하므로 가장 빠른 용접속도인 150cpm으로 용접이 실시되었다. Fig. 9에 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.

3.1.3 구속재의 열전도도에 따른 변형 실험결과

Fig. 10은 구속재 별 변형량을 나타내었다. 단열(heatinsulated)구속, 스틸 바구속, 흡열(heat conducted)구속 순으로 변형량이 감소하였다. 즉 입열량은 비슷하더라도 열전달이 잘되는 구속재를 사용하면 변형량은 더욱 감소하였다. Ju Li et al. 는 GTAW용접에서 용접 중 용접부 바로 뒤에 CO_2 가스를 분사시켜 용접부의를 급랭시켜 변형량을 획기적으로 줄인바³⁾가

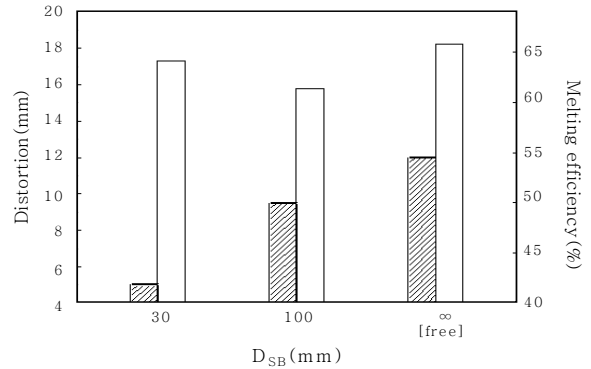


Fig. 9 Distortion and melting efficiency with DSB

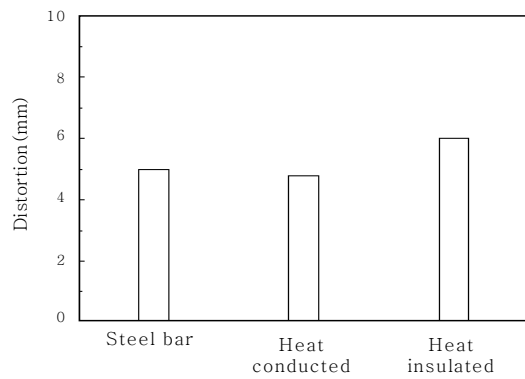


Fig. 10 Distortion with type of fixture

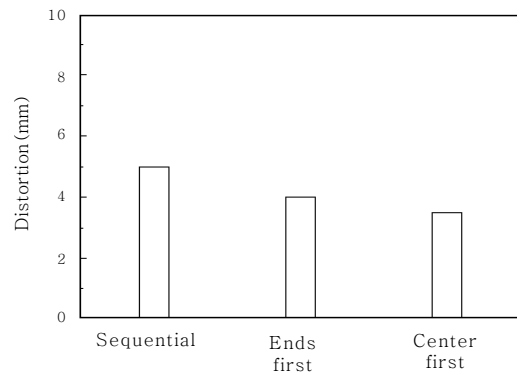


Fig. 11 Distortion with various welding sequence

있으며 본 실험에서도 냉각속도를 빠르게 하기위해 열전도도가 스틸 바보다 5배정도 높은 구리판을 사용하여 용접을 하였으나 CO_2 가스로 냉각시키는 것보다 냉각 효율이 떨어져 변형량의 감소폭이 작은 것으로 판단된다.

3.1.4 용접순서에 따른 변형 실험결과

구리판을 삽입재로 넣는 방법이 변형량이 가장 작지

만 그 감소폭이 미미하여 작업성이 비효율적이므로 여기서는 스틸 바만을 사용하여 용접을 실시하였다. Pierluigi Mollicone et al.⁴⁾은 박판용접의 좌굴변형감소에 있어 “균형적입열(Balanced heat input)”을 강조하였고, 용접접합편⁸⁾에서는 변형감소를 위해 용접선길이의 감소를 강조하였다. 이에 본 연구에서는 동일한 용접선의 길이를 3개로 나누어 용접선중심을 기준으로 균형적으로 입열을 주는 방법을 선택하였다. Fig. 11에 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.

3.2 필릿용접 시편의 변형 실험결과

앞서 비드 온 플레이트로 용접한 실험 결과에서 변형량이 가장 작게 형성된 대칭법이 필릿용접에서도 적용 가능한 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. 12에 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 나타났다. 기존의 좌굴 변형량측정법은 고저편차를 이용하는 고저편차 변형(Distortion from High point to Low point : D_{HL})측정법으로 Fig. 13에서 보이

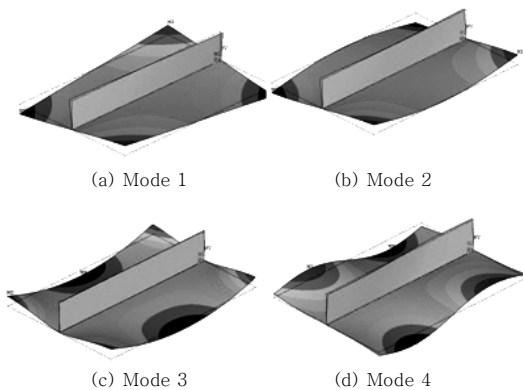


Fig. 12 Buckling modes for fillet welding¹⁾

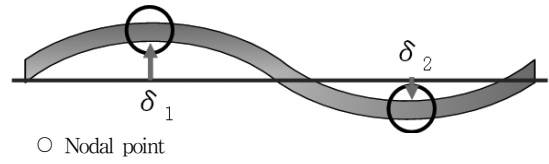


Fig. 13 Schematic of nodal point and δ with deformed flange

는 것처럼 시험편 용접된 시험편의 δ 값의 최대값만을 나타내어 필릿용접에서의 좌굴변형량^{2,9)}으로 정의 하였다. 그러나 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.

본 연구에서는 변형량 측정 방법을 절점수를 고려한 고저변형량(Distorion from High point to Low point by considering Nodal point : D_{HLN}), 비틀림각(Twist Angle : TA)으로 세분화 시켰다. TA측정은 Fig. 14에서처럼 플랜지의 횡방향의 한쪽끝부분을 정반위에 고정시키고 반대쪽의 비틀림각을 측정하였다. D_{HLN} 의 절점수와 변형량은 Fig. 13에서 나타낸 것처럼 플랜지의 길이방향의 양끝 아랫부분을 잇는 직선을 기준으로 절점까지의 수직거리와 절점의 수를 정의하여 측정하였고 아래의 식(3), (4)로 계산되었다.

$$X = \sum |\delta_N| \times NP \tag{3}$$

$$D_{HLN} = \frac{X_R + X_L}{2} \tag{4}$$

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

Table 10은 용접 후 변형형상과 측정방법에 따른 변형량을 조건에 따라 나타내었으며 D_{HL} 은 OD, SD, EF, CF순으로 작아졌고, D_{HLN} 은 EF, CF, SD, OD순으로 작아졌으며 TA는 EF, OD, SD, CF순으로 작아졌다.

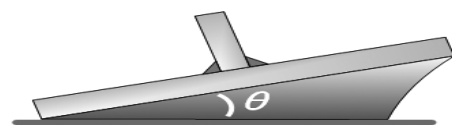






Fig. 14 Schematic of measuring twisted angle

Table 10 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

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 한가지 방법이 될 수 있을 것이다.

4. 결 론

두께3mm의 박판에 비드 온 플레이트용접과 필릿용접을 구속조건과 용접순서를 변경하여 용접한 후 그 변형특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접속도가 증가 할수록 용융효율이 증가하고 그에 따라 변형량이 감소하였다.
- 2) 비슷한 입열량이라 하더라도 구속간 거리가 가까울수록 변형량이 감소하고, 열전달이 잘되는 구속재를 사용하면 변형량은 더욱 감소하였다.
- 3) 단일 비드 온 플레이트 용접에서 대칭법을 사용하였을 때 가장 작은 변형이 발생하였고, 엔드우선 대칭법에 비해 센터우선 대칭법이 좀 더 변형이 작게 발생하였다.
- 4) 필릿용접부의 중방향좌굴 변형에서 좌굴변형형태는 통상 4가지로 나누지만, 본 연구에서는 절점수를 고려한 좌굴변형과 비틀림변형이라는 두 형태의 좌굴변형모드로 구분하여 변형교정공수를 효과적으로 고려할 수 있는 방법을 제안하였다.

려한 좌굴변형과 비틀림변형이라는 두 형태의 좌굴변형모드로 구분하여 변형교정공수를 효과적으로 고려할 수 있는 방법을 제안하였다.

5) 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 감소시킬 수 있는 한 가지 방법이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

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, 22-1(2008), 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) 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, 147 (2004) 328-335
4. Pierluigi Mollicone, Duncan Camilleri, Tom Gray : Procedural influences on non-linear distortions in welded thin-plate fabrication, Thin-Walled structures, 46 (2008) 1021-1034
5. Pearson Education Korea : MODERN WELDING TECHNOLOGY, 2002, 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) 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) 20-22 (in Korean)