대한조선학회 특별논문집
2006 년 9 월

Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea
pp. 122-127, September 2006

Plasma 용접에 의한 박판 겹치기 이음 필릿 용접부의 품질에 미치는 용접 변수의 영향

윤훈성†*, 박금기*, 양종수*, 조상명**

STX 조선주식회사 조선해양연구소*
부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공**

The Effects of Welding Parameters on Quality in Lap Joint Fillet Welds of Thin Plate by Plasma Welding

Hun-Sung Yoon*, Kun-Gi Park*, Jong-Soo Yang* and Sang-Myung Cho**

Shipbuilding & Ocean Research Institute, STX Shipbuilding Co., LTD.*
Major of Materials Processing Eng., Div. of Materials Science & Eng., PKNU**

Abstract

In case of lap joint fillet welds of thin plate, the example which is applicable to Plasma Welding increases substituting for the exiting TIG Welding but the quality of Plasma arc welding has a special feature influenced sensitively by the condition of welding caused by controlling the various parts of welding torch. This research is purposed to improve lap joint fillet welds of thin plate in high quality and attain the high productivity and it is examined that how the change of electrode tip angle and Setback has an effect on the quality of welding and it is investigated how the change of Setback and Standoff has an effect on Melting efficiency using Response Surface Analysis.

※Keywords: Plasma Arc Welding(플라즈마 아크 용접), Melting Efficiency(용융효율), Response Surface Analysis(반응표면분석법)

1. 서 론

박판 STS304L 의 겹치기 이음 필릿용접부의 경우 종래의 TIG 용접을 대체하여 Plasma 용접을 적용하는 사례가 증가하고 있다. 그러나 Plasma arc welding 의 품질은 토치의 각종 부품 조절 등에 의한 용접 조건에 민감하게 영향을 받는 특징이 있다.

일반적으로 TIG 용접은 아크가 안정적이며, 용접부의 품질이 우수하여 고품질 용접에 사용되고

†교신저자: hsyoon@stxship.co.kr 055-548-1911

있으나, 상대적으로 낮은 용접속도로 생산성이 저조하다. Plasma arc welding 은 TIG 용접과 마찬가지로 우수한 용접 품질을 얻을 수 있으며, 고밀도 에너지용접으로 생산성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 박판 겹치기 이음 필릿 용접부의 고품질화 및 높은 생산성을 달성하기 위한 목적으로 전극 팁 선단각, Setback 의 변화가 용접 품질에 미치는 영향을 검토하였으며, 반응 표면 분석법을 이용하여 Setback 과 Standoff 의 변화가 Melting efficiency 에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 정의

Fig. 1 은 플라즈마 토치의 단면 모식도를 보여주는 것으로써 텅스텐 전극 선단에서 Cu insert 선단까지의 거리를 Setback 이라 하며, Cu insert 의 선단에서 모재 표면까지의 거리를 Standoff 라 한다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1 실험 재료

본 연구에서 사용된 시험편은 전극팁 각도, Setback 변경 실험의 경우 STS304 1.2t 시편을 사용하였고, Setback, Standoff 의 변화에 따른 Melting efficiency 분석 실험의 경우 일반 Mild steel 인 SS400 5.5t 시편을 사용하였다. Table 1

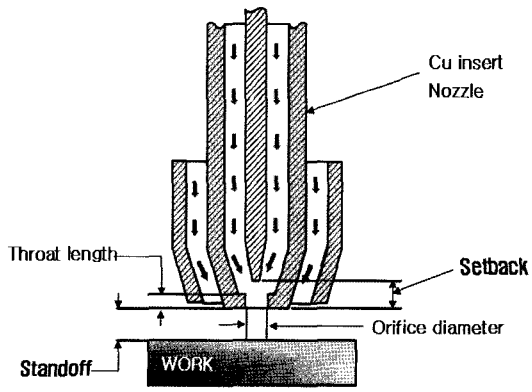


Fig. 1 Definition of setback and standoff

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of STS304

(a) Chemical composition (wt. %)

Cr	Ni	C	Si	Mn	P
19.0	10.0	0.08	0.75	1.30	0.04

(b) Mechanical properties

Yield strength	Tensile strength	Elongation
21kgf/mm^2	53kgf/mm^2	35%

에 STS304 의 화학적 조성과 기계적 성질을 나타내었다.

3.2 실험방법

1) 전극팁 각도, Setback 변경 실험

SBI 의 PMI-500 플라즈마 용접기로 길이 100mm × 폭 30mm × 두께 1.2mm 의 박판을 Fig. 2 와 같이 겹치기 이음 필릿 용접을 하였으며, Arc monitoring system 을 사용하여 용접 시의 출력 전류 및 전압을 실시간으로 계측하였다.

Table 2 는 실험 조건을 나타낸 것이다. Experiment 1 은 Setback 2mm 로 W 전극 팁 각도를 변화시켜 실험하였고, Experiment 2 는 Setback 을 1mm 에서 3mm 까지 0.5mm 씩 변화시켜 실험하였다.

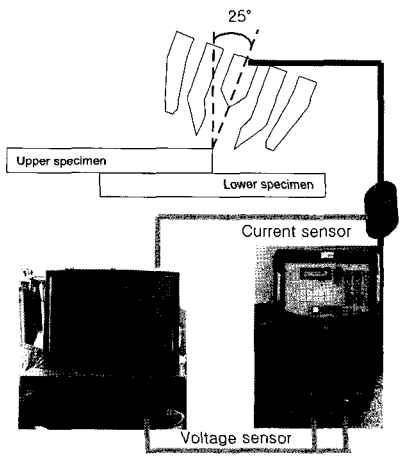


Fig. 2 Schematic of experimental set up for plasma are welding

Table 2 Welding condition for experiments

Fixed	Electrode tip dia.	3mm
Fixed	Standoff	1mm
Fixed	Cu insert dia.	Ø2.3
Fixed	Welding frequency	6Hz
Fixed	Welding current	Ip 110A, Ib 10A
Fixed	Welding speed	40cpm
Fixed	Orifice gas flow rate	0.4L/min (Ar)
Fixed	Shield gas flow rate	10L/min (Ar)
Exp. 1	Electrode tip angle	15°, 30°, 45°
Exp. 2	Setback	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0

Table 3 Levels for experimental design

Level	Coded unit	
	Setback	Standoff
-1	1	1
0	2	2
1	3	3

2) Setback, Standoff 변경에 따른 Melting efficiency 분석 실험

SS400 5.5t 시편을 Melt run 용접하였으며, 표면반응분석법을 이용하여 Setback, Standoff 변경에 따른 Melting efficiency 를 분석해 보았다.

Table 3 은 표면반응분석법 중 3^k 요인배치법를 사용한 실험계획으로 2 인자 3 수준으로 지정하고 중심점 0 에서 Setback 과 Standoff 를 2.0mm 로 설정하였다.

식 (1)은 출력변수인 Melting efficiency 에 대한 2 차 회귀 모델로써 입력변수는 Setback 과 Standoff 이다.

$$y_{ME}=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta_i\chi_i+\sum_{i\le j}^{k}\beta_{ij}\chi_i\chi_j+\varepsilon \qquad (1)$$

여기서, $X_{i,j}$: 입력변수들의 coded unit

y_{ME} : 출력변수인 Melting efficiency

ε : 오차

β : 회귀계수

Table 4 는 2 인자 3 수준 요인배치법으로 계획된 실험조건으로써 10~14 번 조건은 실험 Data 의 신뢰도를 높이기 위한 중심점의 반복 실험 조건이다.

Table 4 Experimental design

No.	Natural variables		Level variables	
	Setback	Standoff	Setback	Standoff
1	1	1	-1	-1
2	1	2	-1	0
3	1	3	-1	1
4	3	1	1	-1
5	3	2	1	0
6	3	3	1	1
7	2	1	0	-1
8	2	3	0	1
9	2	2	0	0
10	2	2	0	0
11	2	2	0	0
12	2	2	0	0
13	2	2	0	0
14	2	2	0	0

식 (2)는 Melting efficiency 의 이론 식을 보여주는 것으로써 이를 이용하여 간단하게 Melting efficiency 를 계산할 수 있도록 식 (3)을 유도하였다.

$$Z_m=\frac{Q_m\cdot A_W\cdot v}{VI} \qquad (2)$$

$$ME=\frac{Z_m}{Q_m}=\frac{A_W}{(VI/v)},\ mm^3/J \qquad (3)$$

여기서, Z_m : Melting efficiency

Q_m : 용접 금속을 녹이는데 쓴 에너지 (J/mm^3)

A_W : 용접 금속 단면적 (mm^2)

I : 전류

V : 전압

v : 용접속도 (mm/sec)

VI/v : 겉보기 입열량 (J/mm)

Fig. 3 은 용접부의 Macro 단면을 보여주는 것으로써 정확한 용접 금속 단면적(A_W)를 산출하기 위하여 Digitizer 기법을 사용하였다.

(a) Macro section

(b) Digitizer

Fig. 3 Comparison of real macro section and digitizer

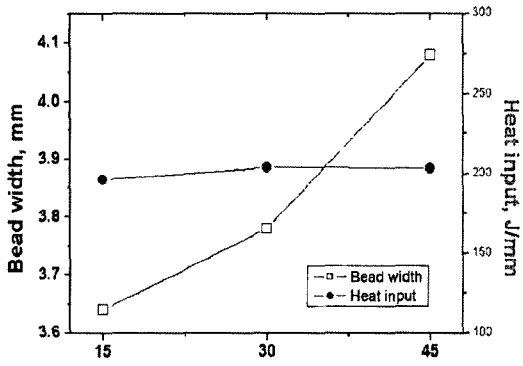


Fig. 4 The effects of electrode tip angle on bead width and heat input

4. 실험결과 및 고찰

4.1 전극팁 각도에 따른 용접 비드폭의 변화

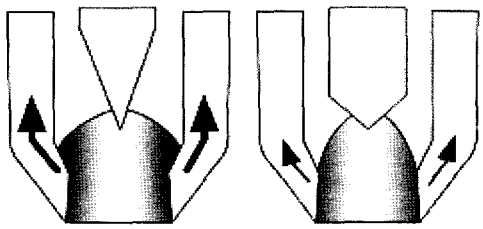
Fig. 4 는 Standoff = 1mm 로 하여 Table 2 의 조건으로 펄스 용접하였을 때, W 전극 팁 각도에 따른 비드폭과 입열량을 나타낸 것이다. 입열량은 유사하였으나, W 전극 팁 각도가 45°일 때 가장 큰 비드폭이 나타났다.

Table 5 에 W 전극 팁 각도에 따른 비드외관을 나타내었다.

Fig. 5 는 W 전극 팁 15°와 45°일 때 Arc 의 형상을 모식도로 나타낸 것이다. W 전극 팁 표면에서 수직 방향으로 전자가 방출됨으로써, Arc

Table 5 Comparison of bead appearance by tip angle

Tip angle	15°	30°	45°
Bead appearance			



(a) tip angle 15° (b) tip angle 45°

Fig. 5 Comparison of arc shape by tip angle

형상은 전극 팁이 15°인 경우가 45°인 경우 보다 넓게 퍼지므로 Cu insert 내면에 더 많이 접촉하게 될 것이다. 따라서 15°인 경우가 Cu insert 쪽으로의 열 손실이 더 커, Arc 긴축 작용이 크게 되어 작은 비드폭을 형성하게 된 것으로 판단된다.

4.2 Setback 변화에 따른 용접부 품질의 변화

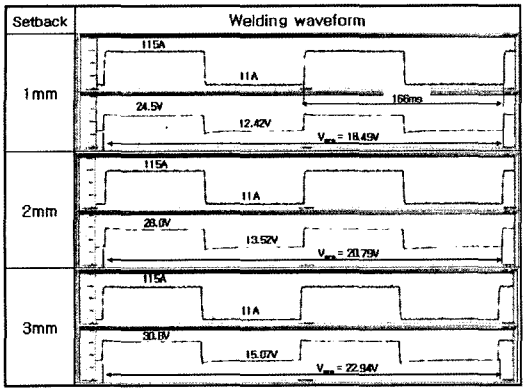
Table 6 은 Standoff = 1mm 로 고정하였을 때, Setback 변화에 따른 용접 시의 파형을 나타낸 것이다. Setback 이 증가할수록 W 전극 팁에서 모재까지의 거리인 Arc 길이(Setback + Standoff)가 길어져 전압이 증가하였다. Fig. 6 은 Setback 변화에 따른 비드폭과 입열량을 나타낸 것이다.

Setback 이 증가하여 입열량이 증가함에도 불구하고 비드폭이 감소하는 경향을 보였다. 이는 Setback 이 증가하게 되면 Cu insert 로의 열 손실이 증가하고 Arc 긴축 작용이 커져서 실제 모재로의 입열량은 감소하기 때문인 것으로 판단된다. Table 7 에 Setback 이 1, 2, 3mm 일 때의 비드 외관을 나타내었다.

4.3 반응표면분석법을 이용한 Setback, Standoff 변경에 따른 Melting efficiency 분석

Table 8 은 반응표면분석법 중 요인배치법을 이

Table 6 Comparison of waveform by setback



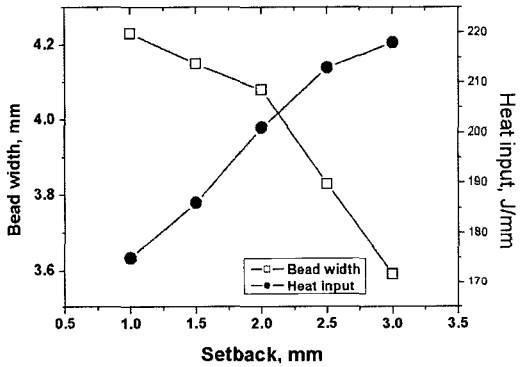
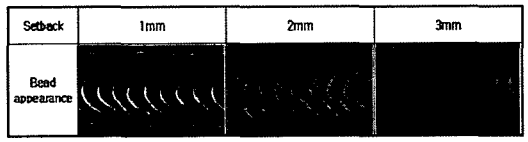


Fig. 6 The effects of setback on bead width and heat input

Table 7 Comparison of bead appearance by setback



용하여 실험한 결과로써 각각의 조건에서 겉보기 입열량과 A_W을 구하여 ME를 계산하였다.

또한, ME 계산 결과를 식 (1)에 대입하여 식 (4)와 같은 2차 회귀 모형을 정립하였다.

$$Y_{ME} = 1.5093 - 0.3613x_1 - 0.24x_2 + 0.0059x_1^2 - 0.0378x_2^2 + 0.0937x_1x_2 \quad (4)$$

Fig. 7 은 식 (4)를 이용하여 ME 에 대한

Table 8 Experimental result

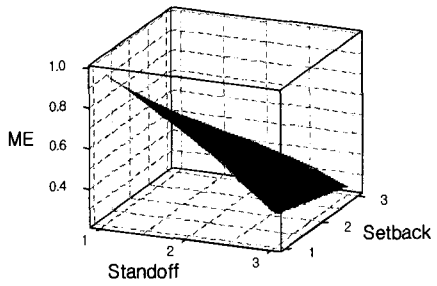
No.	Natural variables		Response
	Setback	Standoff	ME
1	1	1	0.938
2	1	2	0.760
3	1	3	0.333
4	3	1	0.467
5	3	2	0.447
6	3	3	0.216
7	2	1	0.762
8	2	3	0.376
9	2	2	0.568
10	2	2	0.536
11	2	2	0.541
12	2	2	0.538
13	2	2	0.552
14	2	2	0.533

Setback 과 Standoff 의 영향을 살펴본 것이다.

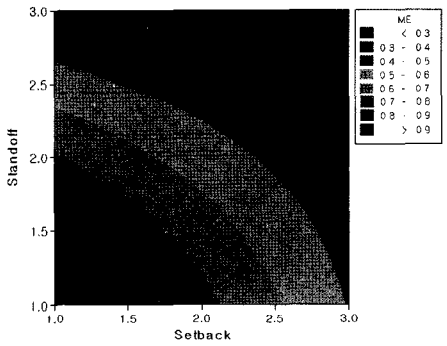
그림 (a)는 ME 에 대한 표면도를 나타낸 것으로써 Setback 과 Standoff 가 작을수록 Melting efficiency 가 증가하는 것을 보여준다. ME 가 클수록 저입열로 고용착이 가능해져서 생산성 향상, 용접변형 저감 및 Root gap 민감도 감소가 가능하므로 가능한 Setback 과 Standoff 를 작게 가져가는 것이 유리할 것으로 판단된다. 하지만 Standoff 가 1.0mm 이하로 낮아지면 Workability 와 Weldability 가 떨어지므로 유의할 필요가 있다. 그림 (b)는 Setback 과 Standoff 에 대한 표고선도를 보여주는 것으로써 표고선의 간격이 Standoff 가 짧다는 것을 알 수 있으며, 이는 Standoff 증가로 인한 Arc 열 손실이 Setback 증가로 인한 Arc 열 손실보다 크다는 것을 의미한다. 또한, 이는 복사 및 실드가스 강제 냉각에 의한 Arc 열 손실이 Cu insert 로의 Arc 열 손실보다 크다고 해석할 수 있다.

5. 결 론

Setback 과 Standoff 를 일정하게 하면 W 전극



(a) Surface plot of ME



(b) Contour plot of ME

Fig. 7 The effects of setback and standoff on ME(Melting Efficiency)

팁 선단각이 커짐에 따라 비드폭이 증가하는 경향을 보였다. 이는 W 전극 팁 선단각이 커짐에 따라 Arc 는 Cu insert 와 접촉 면적이 작아지고, 이로 인해 Cu insert 로의 Arc 열손실이 작아 Arc 긴축 작용이 작아져서 비드폭이 증가한 것으로 판단되었다.

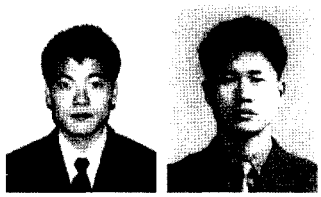
Standoff 를 일정하게 할 때, Setback 이 커짐에 따라 겉보기 입열량이 커짐에도 불구하고 비드폭은 감소하는 경향을 보였다. 이는 Setback 이 증가함에 따라 Cu insert 로의 Arc 열손실이 커 Arc 긴축 작용이 커져서 실제 모재로의 입열량은 감소하기 때문에 비드폭이 감소한 것으로 판단되었다.

Standoff 및 Setback 이 작을수록 Melting efficiency 가 증가할 것으로 판단되었다.

Standoff 증가 시 복사 및 실드가스 강제 냉각으로 인한 Arc 열 손실이 Setback 증가 시 Cu insert 로의 Arc 열 손실보다 크게 나타났다.

참 고 문 헌

- Y. F. Hsu and B. Rubinsky, 1988, " Two dimensional heat transfer study on the keyhole plasma arc welding prdcess" , Journal of Heat and Mass Transfer, pp.1409-1421
- J.K. Martikainen and T. J. I Moisio, 1993 " Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels" , Welding Research Supplement, pp.329-340
- 김대주, 김경주, 백성호, 2005, " 루트갭과 단차에 의한 플라즈마 아크 용접성에 관한 연구" , 대한용접학회 추계학술발표대회 개요집.



< 윤 훈 성 > < 박 금 기 >

< 양 종 수 > < 조 상 명 >