C형 용가재를 사용한 GTAW 공정에서 랩조인트 필릿 용접의 공정 강건성 검토를 위한 연구

김상열* · 서기정* · 주우현* · 조상명*,†

*부경대학교 신소재시스템공학과

A Study on Process Robustness of Lap Joint Fillet Welding in GTAW Using C Type Filler

Sang-Yeol Kim*, Gi-Jeong Seo*, Woo-Hyeon Ju* and Sang-Myung Cho*,†

*Dept. of Materials system Engineering, Pukyong Nat'l Univ, Busan, 48513, Korea

†Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr

(Received December 18, 2018 ; Revised January 21, 2019 ; Accepted July 15, 2019)

Abstract

Thin plate stainless steel is mainly used for lap joint fillet welding in GTAW and GMAW processes. However, due to the machining tolerance of the product, gaps are generated, and the weld line of the product before welding is not consistent. As a result, welding defects such as burn through and discontinuous bead frequently occur. If C-Filler is used for lap joint fillet welding with GTAW, the gap bridging ability is improved compared to rod-type filler due to the wide C-Filler, and it is expected that it will be possible to prevent weld defect even if the weld line is not consistent. In this study, we examined the molten pool flow ahead of the arc by changing the push angle, inclined downward angle and deposition area in lap joint fillet welding. We also increased the gap and moved the weld line to test the process robustness.

Key Words : GTAW, C-Filler, Lap joint fillet welding, Seam leave, Gap bridging, High speed welding

1. 서 론

박판 스테인리스스틸은 주로 GTAW 및 GMAW 공정, 레이저 용접을 통해 랩조인트 필릿용접을 하고 있다. 하지만 제품의 가공 공차로 인해 갭이 발생하고, 용접 전 제품의 용접선이 일정하지 않아 용락 및 비드 어긋남 등과 같은 용접불량이 빈번히 발생하고 있다. GMAW를 통한 랩조인트 필릿용접 시 갭 브릿징을 보다 안정적으로 하기 위해서는 용착단면적을 증가시켜야 한다. 하지만 용착단면적을 증가시키기 위해서 용접속도를 낮추면 생산성이 감소하게 되고, 용가재 송급속도를 증가시키면 용가재 송급속도와 전류가 동기화되어 있는 GMAW의 특성상 입열량이

증가하여 용락 발생의 위험이 높아진다¹⁾. 따라서 용접선이 일정하지 않고, 갭이 존재해도 좋은 품질을 얻을 수 있는 강건한 공정에 대한 연구가 필요하다. 한편, GTAW 공정에 C형 용가재를 사용하여 랩조인트 필릿용접을 하는 경우에는 폭 넓은 C형 용가재로 인해 일반 GTAW 공정 대비 갭 브릿징 능력이 향상되며, 비드폭을 넓게 하기가 용이하기 때문에 용접선이 일정하지 않아도 용접불량을 방지할 수 있다^{2,3)}. 본 연구에서는 전진각과 경사하진을 변경하여 실험을 진행한 후, 토우 각도가 가장 큰 조건을 선정하여 공정의 강건성 확인 실험을 진행하였으며, 공정의 강건성 확인 실험은 갭을 0 mm에서 2.5 mm까지, y축 티칭점은 상판 모서리에서 하판쪽으로 2.0 mm의 위치를 기준으로 하여, ± 1.0 mm로 변경하여 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 재료

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 120 mm × 40 mm × 2 mm의 STS 304 판재의 모식도를 나타내었다. Fig. 2은 GTAW에서 사용한 단면적 5.5 mm²의 STS 316L C형 용가재의 횡단면이다. Table 1은 모재인 STS 304의 조성을 나타낸 것이며, Table 2는 STS 316L 용가재의 조성을 나타낸 것이다.

2.2 티칭 포인트의 정의

Fig. 3은 티칭 포인트의 모식도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 상판의 가장자리를 기준으로 (y, z)로 위치를 지정하여 용접을 실시하였으며, 이 때 상판의 가장자리를 기준으로 (y, z)만큼 이동한 거리를 티칭 포인트라 정의하였다.

Fig. 1 Schematic of base metal(dimensions in mm)

Fig. 2 Cross section of filler metal

Table 1 Chemical composition of base metal(wt%)

Classification	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
STS 304	0.08	0.75	2.00	0.045	0.03	19.00	10.0

Table 2 Chemical composition of filler metal(wt%)

Classification	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	N
STC 316L	0.001	0.38	1.90	12.1	19.1	2.3	0.021	0.021

Fig. 3 Schematic of teaching point

2.3 실험 조건

반복하중을 받는 부재에서 용접비드의 토우 각도가 작을 경우에는 피로파괴가 일어날 수 있으므로⁴⁾, 본 실험에서는 토우 각도 100° - 110°를 양호한 비드, 토우 각도 110° 이상을 우수한 비드라고 정의하였다. 본 실험에서는 전진각과 경사하진을 변경하며 실험한 후 토우 각도가 가장 넓은 용접비드를 형성하는 조건을 찾아보았다. Table 3은 전진각을 사용한 실험조건을 나타내고 있으며, Table 4는 경사하진을 사용한 실험조건을 나타내고 있다.

Table 3 Welding condition of push angle experiment

Fixed	Base metal	STS304, thickness: 2.0 mm
	Filler metal	STS 316L C-Type Filler (cross section area: 5.5 mm ²)
	Shield gas	93% Ar + 7% H ₂ (25 L/min)
	Welding speed(cm/min)	100
	Teaching point(y, z)	2.0, 3.5
	Current(A)	300
Varied	Work angle(°)	20
	Push angle(°)	10, 20, 30
	Deposition area(mm ²)	7, 8, 9, 10 11

Table 4 Welding condition of inclined downward angle experiment

Fixed	Base metal	STS304, thickness: 2.0 mm
	Filler metal	STS 316L C-Type Filler (cross section area: 5.5 mm ²)
	Shield gas	93% Ar + 7% H ₂ (25 L/min)
	Welding speed(cm/min)	100
	Teaching point(y, z)	2.0, 3.5
	Current(A)	300
Varied	Work angle(°)	20
	Inclined downward angle(°)	10, 20, 30
	Deposition area(mm ²)	7, 8, 9, 10 11

Table 5 Welding condition of process robustness experiment

Fixed	Base metal	STS304, thickness: 2.0 mm
	Filler metal	STS 316L C-Type Filler (cross section area: 5.5 mm ²)
	Shield gas	93% Ar + 7% H ₂ (25 L/min)
	Welding speed(cm/min)	100
	Deposition area(mm ²)	9
	Current(A)	300
	Work angle(°)	20
	Inclined downward angle(°)	30
Varied	Gap(mm)	0, 1.0, 2.0, 2.5
	Teaching point(y, z)	(1.0, 3.5), (1.5, 3.5) (2.0, 3.5) (2.5, 3.5), (3.0, 3.5)

Table 5는 공정의 강건성을 확인하기 위한 실험의 용접 조건이다. 전진각과 경사하진 변경 실험의 결과를 바탕으로 용접 비드의 토우 각도가 가장 큰 경사하진 30°로 선정하였으며, 또한 용착단면적이 큰 경우에는 토우 각도가 작게 형성되며, 용착단면적이 작은 경우에는 갭 브릿징 능력이 감소되므로 중간 값인 9 mm²으로 선정하였다. 또한 용접 시에는 용접과형 모니터링 시스템을 통해 용접전압을 계측을 하였다⁵⁾.

3. 토치 전진각과 시편 경사각 변경 실험

3.1 실험 결과

Fig. 4는 전진각을 10°, 20°, 30°로 변경하여 각 전진각 별로 용착단면적을 7 mm²에서 11 mm²으로 증가시켜 가며 실험한 비드의 횡단면을 나타내었다. Fig. 4는 Fig. 3의 각 비드 횡단면의 토우 각도를 측정하여 전진각에 따

Fig. 4 Bead appearances with variable push angle and deposition area **Fig. 5** Toe angle according to push angle **Fig. 6** Bead appearances with variable inclined downward angle and deposition area

른 토우 각도를 나타내었다. 용착단면적이 증가할수록 토우 각도가 감소하는 경향이 나타났으며, 전진각이 10°에서 20°로 증가한 경우 토우 각도가 증가하였으나, 20°에서 30°로 더 증가한 경우에는 토우 각도가 반대로 감소하였다.

Fig. 6는 경사하진 각도를 10°, 20°, 30°로 변경하여 각 경사하진 각도별로 용착단면적을 7 mm²에서 11 mm²으로 증가시켜가며 실험한 횡단면을 나타내었다. Fig. 7는 Fig. 6의 각 비드 횡단면의 토우 각도를 측정하여 경사하진 각도에 따른 토우 각도를 나타내었다. 용착단면적이 증가할수록 토우 각도가 감소하는 경향이 나타났으며, 경사하진 각도가 10°에서 30°로 증가할수록 토우 각도가 증가하였다.

3.2 실험 고찰

Fig. 8은 전진각에 따라 용융풀이 진행되는 것을 나타낸 것이다. 전진각 사용 용접 시, 용융풀을 선행시키는 힘

Fig. 7 Toe angle according to inclined downward angle

Fig. 8 Modelling of phenomenon that the molten pool goes ahead of the arc according to push angle

Fig. 9 Modelling of leaded molten pool according to inclined downward angle

은 아크력이다. 따라서 전진각이 10°에서 20°로 증가하였을 때 용융풀의 선행량이 증가하여 토우 각도가 증가한 것으로 판단된다. 하지만 전진각이 20°에서 30°로 증가하였을 때는 지나치게 큰 전진각으로 인해 아크압력이 모재보다 용가재로 집중된다. 따라서 모재 입열량이 감소하고 용가재 입열량이 증가하여^{6,7)}, 용융풀의 젖음성이 감소되기 때문에 토우 각도가 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 경사하진에 따라 용융풀이 선행되는 것을 나타낸 것이다. 경사하진 사용 용접 시, 용융풀을 선행시키는 힘은 중력이다. 따라서 경사하진이 10°에서 30°로 증가하였을 때 용융풀의 선행량이 증가하여 토우 각도가 증가한 것으로 판단된다. 전진각, 경사하진에 따른 용접 비드의 토우 각도 측정 결과 경사하진 30°에서 토우 각도가 가장 큰 값을 가졌으므로, 공정의 강건성 확인 실험을 위한 용접 조건은 경사하진 30°로 선정하였다. 또한 용착단면적이 큰 경우는 토우 각도가 작게 형성되고, 용착단면적이 작은

경우는 갭 브릿징 능력이 감소되므로⁸⁾ 용착단면적은 중간 값인 9 mm²으로 선정하였다.

4. 공정 강건성 확인 실험

4.1 실험 결과

Fig. 10은 각각의 조건에 대한 비드 횡단면이며, Fig. 11은 Fig. 10의 각 횡단면에서 측정된 토우 각도를 나타낸 것이다. 갭 2.5 mm에서는 큰 갭으로 인해 갭 브릿징을 하지 못하였으나 갭 2.0 mm까지는 건전한 비드를 형성하였다. y축 티칭점이 증가함에 따라 토우 각도가 증가하는 경향을 나타내고 있으며 갭 2.0 mm, y축 티칭점 1.0 mm에서는 토우 각도가 100° 이상 110° 이하로 양호한 수준의 비드를 형성하였다.

4.2 실험 고찰

Fig. 12에서 Fig. 14는 y축 티칭점 2.0 mm에서의 공정의 강건성 확인 실험 중 촬영한 동영상의 스냅샷이다.

Gap Y-axis teaching point	0 mm	1.0 mm	2.0 mm	2.5 mm
1.0 mm				
1.5 mm				
2.0 mm				
2.5 mm				
3.0 mm				

Fig. 10 Bead appearances with variable gap and y-axis teaching point

Fig. 11 Toe angle according to y-axis teaching point

Fig. 12 Snap shot of y-axis teaching point 2.0 mm at gap 0 mm

(a) Grow of droplet (b) Moving and bridging of droplet

Fig. 13 Snap shot of y-axis teaching point 2.0 mm at gap 1.0 mm

Fig. 12는 y축 티칭점 2.0 mm, 갭 0 mm에서 C형 용가재가 상판과 하판 2곳에서 이행되는 것을 보여준다. Fig. 13은 y축 티칭점 2.0 mm, 갭 1.0 mm에서 C형 용가재가 상판에서는 연속교락이행이 일어나고 있지만 하판에서는 용적이 성장하여 중력과 아크압력에 의해 상판 쪽으로 이동중에 용융풀에 교락되는 것을 보여준다. Fig. 14는 y축 티칭점 2.0 mm, 갭 2.0 mm에서 C형 용가재가 상판에서는 연속 교락이행이 일어나고 하판에서는 용적이 성장하여 중력과 아크압력에 의해 상판쪽에서 이행하는 것을 보여준다.

Fig. 15에서 Fig. 18은 각각의 갭에서 y축 티칭점에 따른 아크전압을 측정한 파형이다. 또한 y축 티칭점 3.0 mm에서는 앞서 관찰한대로 용적이 성장하는 분리단계와 용적이 이행하는 교락단계가 나뉘어져 나타난다. Fig. 19는 y축 티칭점 3.0 mm일 때의 전압 파형을 확대하여 나타낸 것이다. 용적이 분리되었을 때는 높은 분리전압이, 용적이 교락되었을 때는 낮은 교락전압이 측정되었으며 갭이 증가함에 따라 교락과 분리의 주기가 증가하는 것이 관찰되었다. Fig. 20은 y축 티칭점이 증가할수록 아크 전압이 증가하는 경향을 나타낸 것이다.

Fig. 21에서 Fig. 24는 GTAW의 랩조인트 필릿 용접에서 C형 용가재를 사용하였을 때 나타나는 이행현상을 관찰하여 모델링한 것이다. C형 용가재를 사용하는 GTAW 용접은 Fig. 21에서 모식화한 바와 같이 하판과 상판 2곳

(a) Grow of droplet (b) Moving of droplet

(c) Bridging of droplet

Fig. 14 Snap shot of y-axis teaching point 2.0 mm at gap 2.0 mm

(a) y-axis teaching point 1.0 mm

(b) y-axis teaching point 2.0 mm

(c) y-axis teaching point 3.0 mm

Fig. 15 Wave forms in 5 second range at gap 0 mm

(a) y-axis teaching point 1.0 mm

(b) y-axis teaching point 2.0 mm

(c) y-axis teaching point 3.0 mm

Fig. 16 Wave forms in 5 second range at gap 1.0 mm

에서 교락이행을 하며 비드가 형성된다. 하지만 갭이 존재하는 경우에는 하판 쪽 용적이 곧바로 교락되어 이행되지

Fig. 17 Wave forms in 5 second range at gap 2.0 mm

Fig. 18 Wave forms in 5 second range at gap 2.5 mm

Fig. 19 Wave forms in 1 second range at y-axis teaching point 3.0 mm

못하고 이동하는 현상이 나타난다. Fig. 22은 갭 1.0 mm로, 하판 쪽 용적이 중력에 의해 C형 용가재의 중심으로 이동하고, 갭이 비교적 작기 때문에 이동하던 용적이 용융 풀에 교락되어 이행되는 현상을 나타냈다. 한편, Fig. 23

Fig. 20 Arc voltage according to y-axis teaching point

Fig. 21 Transfer mode of lap joint fillet welding by C-Filler at gap 0 mm

Fig. 22 Transfer mode of lap joint fillet welding by C-Filler at gap 1.0 mm

Fig. 23 Transfer mode of lap joint fillet welding by C-Filler at gap 2.0 mm

은 이행되지 못한 하판의 용적이 중력에 의해 C형 용가재의 중심으로 이동하고, 아크압력에 의해 상판쪽에서 이행되는 현상을 나타냈다. Fig. 24는 갭이 지나치게 큰 경우에 갭 사이로 용융풀의 처짐량이 증가하여 갭 브릿징에 실패하는 것을 나타내었다.

Fig. 25는 GTAW 공정에 C형 용가재를 사용하는 랩조

Fig. 24 Transfer mode of lap joint fillet welding by C-Filler at gap 2.5 mm

Fig. 25 Weldable area of lap joint fillet by GTAW

인트 필릿용접에서 용접 가능 영역을 나타낸 것이다. 공정의 강건성 확인 실험 결과 갭 2.0 mm까지 갭 브릿징이 가능하였고, y축 티칭점은 ± 1.0 mm까지 용접 가능하였다. 갭 2.0 mm의 y축 티칭점 1.0 mm는 토우 각도가 $100^\circ - 110^\circ$, y축 티칭점 3.0 mm는 용가재의 교락과 분리 중 스파터가 발생하였으므로 normal한 용접비드로 표기하였다. 랩조인트 필릿용접 시 보다 강건한 공정을 위해 CMT, AC GMAW, 레이저 용접, GMAW와 레이저의 하이브리드 용접 등을 통한 많은 연구가 있었다. GMAW 공정을 통해 갭 브릿징 시 갭 2.0 mm에서 용접은 가능하지만 양호하지 못한 비드 횡단면을 확보하였으며^{8,9)}, 레이저 용접은 용착 금속이 없으므로 갭 브릿징이 최대 0.7 mm까지 용접 가능하였다^{10,11)}. 따라서 Fig. 30은 GTAW 공정에 C형 용가재를 사용하는 랩조인트 필릿용접에서 공정 강건성에 대한 범위를 나타낸 것이며 CMT, GMAW, 레이저 용접 대비 공정의 강건성이 더 양호한 것으로 판단된다.

5. 결 론

폭 넓은 C형 용가재를 사용하는 GTAW에 의한 전류 300A, 속도 100 cm/min의 고속용접으로, 두께 2.0 mm인 STS 304 소재의 랩조인트 필릿용접 공정의 갭 변동과 심이탈에 대한 강건성 확인을 위한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 갭 0 mm에서 갭 2.0 mm까지는 모두 건전한 비드를 형성하여 갭변동에 대한 강건성이 확인되었다.
- 2) 상판 모서리에서 하판쪽으로 2.0 mm의 위치를 기준으로 하였을 때 좌우 ± 1.0 mm까지 건전한 비드를 형성하여 용접선 이탈에 대한 강건성이 확인되었다.
- 3) C형 용가재를 사용하여 랩조인트 필릿용접 시 갭 0 mm의 y좌표 기준위치에서는 C형 용가재가 하판 쪽과 상판 쪽 2곳에서 이행되며, 갭이 존재하면 하판 쪽 용적이 곧바로 교락되어 이행되지 못하고 상판 쪽으로 이동하는 현상을 관찰하여 모델링하였다.
- 4) 랩조인트 필릿용접 시 C형 용가재를 사용하는 GTAW 공정은 GMAW공정 및 레이저 용접 대비 공정 강건성이 양호한 것으로 판단된다.

ORCID: Sang-Yeol Kim: <http://orcid.org/0000-0002-1347-2547>

ORCID: Sang-Myung Cho: <http://orcid.org/0000-0001-6258-3625>

References

1. M. Shome and M. Tumuluru, Welding and Joining of Advanced High Strength Steels, *Woodhead Publishing*, Cambridge, United Kingdom, (2015) 1-8.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-436-0.00001-1>
2. J. H Jun, S. R Kim and S. M Cho, A study on productivity improvement in narrow gap TIG welding, *J. Weld. Join.* 34(1) (2016) 68-74.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.68>
3. J. G Byun and S. M Cho, Trend of metal 3D printing by welding, *J. Weld. Join.* 34 (2016) 1-8.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.4.1>
4. P. Lazzarin, T. Lassen and P. Livieri, A notch stress intensity approach applied to fatigue life predictions of welded joints with different local toe geometry, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 26(1) (2003) 49-58.
<https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00586.x>
5. S. M Cho, J. H Park and M. S Son, Development of welding quality monitoring method for TIG Cladding, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 31(6) (2013) 90-95.
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.6.90>
6. N. J. Dupont and R. A. Marder, Thermal efficiency of arc welding processes, *Weld. J. -Including Weld. Res. Suppl.* 74 (12) (1995).
7. M. Ebert-Spigel, S. F Goecke and M. Rethmeier, Possibilities for compensating a higher heat input, in particular by the torch offset relative to the top sheet at the fillet weld on a lap joint, *Weld. in the World*, 59(3) (2015) 443-453.
8. H. J Park, D. C Kim, M. J Kang and S. Rhee, The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 66(5-8) (2013) 867-875.
9. MD. R. U Ahsan, T. H Kim, D. B Kim, C. W Ji, and Y. D Park, A study on the effect of wire composition on welding with gap and offset in cold metal transfer (CMT)

- GMAW, *J. Weld. Join.* 36(5) (2018) 12-18.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.5.2>
10. A. Muller, S. F Goecke, P. Sievi, F. Albert and M. Rethmeier, Laser beam oscillation strategies for fillet welds in lap joints, *Phys. Proc.* 56 (2014) 458-466.
 11. F. Moller, H. Kugler, S. Kotschau, A. Geier and S. F. Goecke, Gap bridging ability in laser GMA hybrid welding of thin 22MnB5 sheets, *Phys. Proc.* 56 (2014) 620-629.