



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

공학석사 학위논문

Super-TIG에 의한 Lap Joint Fillet 용접에서
Process 강건성 향상을 위한 연구



2019년 2월

부경대학교 대학원

신소재시스템 공학과

김 상 열

공학석사 학위논문

Super-TIG에 의한 Lap Joint Fillet 용접에서
Process 강건성 향상을 위한 연구

지도교수 조 상 명

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2019년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템 공학과

김 상 열

김상열의 공학석사 학위논문을 인준함

2019년 2월

위 원 장 공학박사 이 길 근 (인)

위 원 공학박사 이 병 우 (인)

위 원 공학박사 조 상 명 (인)

목 차

Abstract	iv
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적 및 개요	2
제 2 장 이론적 배경	3
2.1 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)	3
2.1.1 GTAW의 정의	2
2.1.2 GTAW의 원리	3
2.1.3 GTAW의 장단점	4
2.2 GTAW 용접기 및 재료	6
2.2.1 용접기	6
2.2.2 용접토치	8
2.2.3 용접재료	9
2.3 TIG 고속용접	11
2.4 플라즈마 스트림 이론(Theory of Plasma stream)	14
2.4.1 플라즈마 스트림 이론의 개념	14
2.4.2 플라즈마 스트림 이론의 관점에서 본 Super-TIG 용접	16
2.5 Teaching point의 정의	18
2.6 Super-TIG 겹치기이음 필릿 용접에서의 에너지 분포	19
제 3장 Lap Joint 필릿 용접에서 용융풀 선행에 관한 검토	21
3.1 Progressive angle 변경실험	21
3.1.1 실험 재료	21
3.1.2 실험 방법	23
3.1.3 실험 결과 및 고찰	26
3.2 Incline 변경실험	32
3.2.1 실험 방법	32
3.2.2 실험 결과 및 고찰	35

제 4장 Process 강건성 향상을 위한 연구	41
4.1 Process 강건성 검토실험	41
4.1.1 실험방법	41
4.1.2 실험결과	45
4.2 용접동영상에 관한 고찰	51
4.3 용접 진압에 의한 이행모드의 고찰	56
4.4 C형 용가재를 사용하는 TIG 용접의 이행모드 모델링	63
4.5 Lap Joint Fillet 용접의 과대 gap에 따른 용락 모델링.....	66
4.6 Super-TIG에 의한 Lap Joint 필릿 용접 가능 영역.....	67
제 5장 결론	68
참고문헌	70



A Study on the Improvement of Process Robostness in Lap Joint Fillet Welding by Super-TIG

Sang-Yeol, Kim

Dept. of Materials Systems Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Thin plate stainless steel is mainly used for Lap Joint fillet welding through GTAW and GMAW processes. However, due to the machining tolerance of the product, gaps are generated, and the seam of the product before welding is not constant, so welding defects such as a burn through and a bead shift frequently occur.

On the other hand, when applying Super-TIG to the lap joint, the gap bridging ability is improved compared to conventional TIG welding due to the wide C-Filler, and it is expected that it will be possible to prevent weld defect even if the seam is not constant because it is easy to broaden the bead width.

In this study, we examined preceding molten pool by changing progressive angle, incline angle, deposition area in lap joint fillet welding.

Key Words : Super-TIG, C-Filler, Lap joint, Fillet Welding, Seam Leave, Gap Bridging, High Speed Welding

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

박관 Stainless Steel은 주로 GTAW 및 GMAW 공정을 통해 Lap Joint 필릿 용접을 하고 있다. 하지만 제품의 가공 공차로 인해 gap이 발생하고, 용접 전 제품의 seam이 일정하지 않아 용락 및 비드 어긋남 등과 같은 용접불량이 빈번히 발생하고 있다. Ahsan, Md RU는 Fig. 1.1과 같이 용접 seam을 변경해가며 실험을 진행하였는데, Fig. 1.1(a)는 seam이 상관쪽으로 치우쳐서 용접된 경우 용접비드의 하관쪽 toe부가 불룩하게 형성된 경우를 나타내고 있으며, Fig. 1.1(c)는 seam이 하관쪽으로 치우쳐서 용접된 경우 상관쪽 용접비드의 언더컷이 생긴 것을 나타낸다.¹⁾ 또한 Hyuk-Yong Kwon등은 lap joint fillet 용접에서 gap을 증가시키면서 실험을 진행하였는데, gap이 과대하게 증가하는 경우 Fig. 1.2와 같이 용락이 발생하였다²⁾. GMAW를 통한 lap joint fillet 용접 시 gap bridging을 보다 안정적으로 하기 위해서는 용착단면적을 증가시켜야 한다. 하지만 용착 단면적을 증가시키기 위해서 용접속도를 낮추면 생산성이 감소하게 되고, 용가재 공급속도를 증가시키면 용가재 공급속도와 전류가 동기화 되어 있는 GMAW의 특성상 입열량이 증가하여 용락 발생의 위험이 높아진다.³⁾ 따라서 seam이 일정하지 않고, gap이 존재해도 좋은 품질을 얻을 수 있는 공정 강건성 향상을 위한 연구가 필요하다. 한편, Super-TIG를 lap joint에 적용하는 경우에는 폭 넓은 C-Filler로 인해 일반 TIG 용접 대비 gap bridging 능력이 향상되며, 비드폭을 넓게 하기가 용이하기 때문에 seam이 일정하지 않아도 용접불량을 방지할 수 있다.



(a) Offset: Negative (b) Offset: Zero (c) Offset: Positive
 Fig. 1.1 Bead cross section according to 'y position' teaching point¹⁾



Fig. 1.2 Gap bridging failure due to excessive gap in lap joint fillet welding²⁾

1.2 연구 목적 및 개요

Super-TIG에 의한 Lap Joint Fillet 용접에서 용접속도 100cm/min의 고속 용접을 적용하여, gap이 발생하거나 y축 teaching point가 바뀌는 경우에도 건전한 비드를 형성할 수 있도록 하는 process 강건성 향상을 위한 용접 공정 개발

제 2 장 이론적 배경

2.1 GTAW(Gas Tungsten Arc Gas)

TIG(Tungsten Inert Gas) 용접이라고도 하며 Ar, He 등과 같은 불활성 가스를 보호가스(Shield Gas)로 사용하면서 비소모성 전극인 텅스텐 전극과 모재 사이에서 발생시킨 아크열로 모재를 용융시켜 접합하는 용접법을 말한다. 용가재를 공급하여 모재와 함께 용융시켜 비드를 얻기도 한다.

2.1.1 GTAW의 정의

가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten Arc Welding)은 Ar, He 등과 같은 불활성 가스를 실드가스로 사용하면서 비소모성 전극인 텅스텐 전극과 모재 사이에서 발생시킨 아크열로 모재를 용융시켜 접합하는 용접법을 말한다. 실드가스로는 모재와 텅스텐용접봉의 산화를 방지하기 위하여 불활성가스인 Ar이나 He 등을 사용하므로 (tungsten inert gas) 용접으로도 부른다. 이 용접법은 모든 용접자세에 적용할 수 있으므로, 아크가 매우 안정되고 용접부 품질이 우수하므로 산화나 질화 등에 민감한 재질의 용접 및 피복아크용접을 적용하기 곤란한 경우에 사용된다. 그러나 가스메탈 아크용접에 비하여 용접속도가 느리므로 생산성은 낮다.

2.1.2 GTAW의 원리

GTAW는 비소모성 텅스텐 용접봉과 모재간의 아크열에 의해 모재를 용융시켜 접합하는 용융 용접으로서 Fig. 2.1과 같이 용접부 및 아크 주위에 불활성 가스(Ar, He)를 보호가스로 사용하여 모재와 텅스텐 전극의 오염을 방지하면서 용접이 이루어진다.⁴⁾

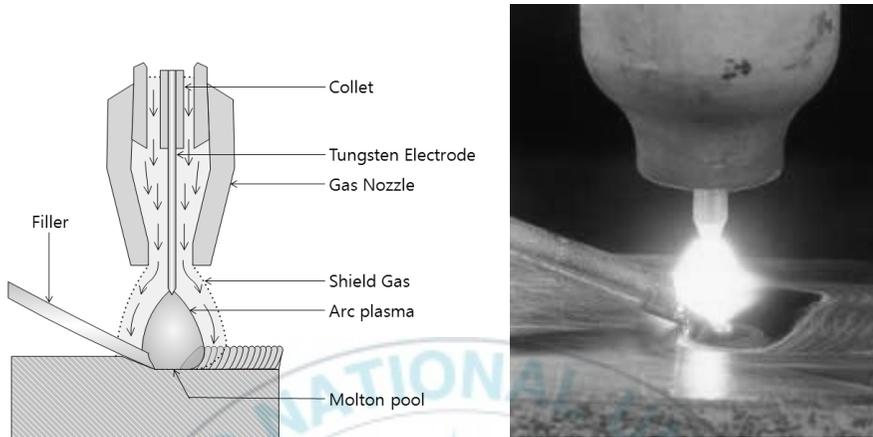


Fig. 2.1 Schematic of GTAW

2.1.3 GTAW의 장단점

1) 장점

GTAW는 용접 입열의 조절이 용이하기 때문에 박판 용접에 매우 좋다. 텅스텐 전극봉이 비소모성이므로 용가재의 첨가 없이도 아크열에 의해 모재를 녹여 용접할 수 있고 거의 모든 금속의 용접에 이용할 수 있다. 그러나 용융점이 낮은 금속 즉, 납, 주석 또는 주석의 합금 등의 용접에는 이용하지 않는다.

- ① 용접부의 기계적 성질이 우수하다.
- ② 내부식성이 우수하다.
- ③ 플럭스가 불필요하여 비철금속 용접이 용이하다.
- ④ 보호 가스가 투명하여 작업자가 용접상황을 잘 파악할 수 있다.
- ⑤ 용접 스파터를 최소한으로 하여 전 자세 용접이 가능하다.
- ⑥ 용접부 변형이 적다.

2) 단점

TIG용접은 일반적으로 SMAW, SAW, GMAW 등의 방법으로 쉽게 용접이 가능한 경우에 이들 용접방법과는 비용에 있어서 경쟁이 안 될 정도로 전체의 가격 상승을 가져오는 경우가 있는데 그것은 다음과 같다.

- ① 소모성 용접봉을 쓰는 용접 방법보다 용접 속도가 느리다.
- ② 용접 잘못으로 텅스텐 전극봉이 용접부에 녹아 들어가거나 오염될 경우 용접부가 취화되기 쉽다.
- ③ 부적당한 용접 기술로 용가재의 끝 부분이 공기에 노출되면 용접금속이 오염된다.
- ④ 불활성 가스와 텅스텐 전극봉은 다른 용접 방법과 비교해 볼 때 고가이다.
- ⑤ SMAW와 같은 다른 용접 방법에 비해 용접기의 가격이 비싸다.



2.2 GTAW 용접기 및 재료

Fig. 2.2와 같이 전원(Power supply), 토치, 비소모성 텅스텐전극, 실드가스 공급을 조절하는 유량계로 이루어져 있다.

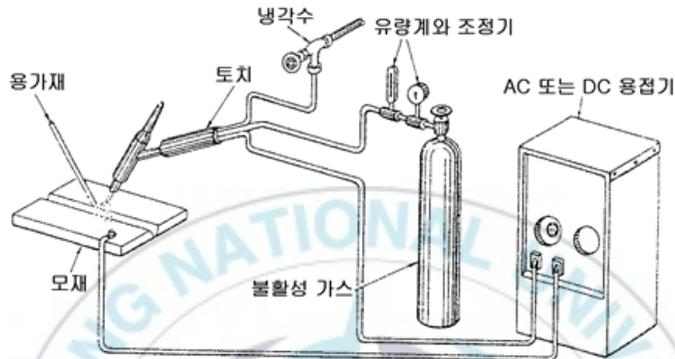


Fig. 2.2 Schematic diagram for GTAW power supply

2.2.1 용접기

현재 사용되고 있는 TIG 용접기 전원은 정전류 특성인 AC 또는 DC이다. 이 때 AC 또는 DC 전원의 선택은 요구되는 용접 특성 및 모재의 재질에 따라 좌우된다. 예를 들어 어떤 금속은 AC 전원으로 보다 쉽게 용접되는 반면에, 어떤 금속들은 DC 전원으로서는 좋은 결과를 얻을 수 있다. AC, DC 전원으로 용접할 때의 특성은 다음과 같다.

1) 직류 봉 마이너스(DCEN)

같은 크기의 용접봉으로도 높은 전류를 사용할 수 있기 때문에 용입이 깊고, 용접속도가 빠르고, 비드폭이 좁아진다. 직류 정극성(DC Straight Polarity)이라고도 한다.

2) 직류 봉 플러스(DCEP)

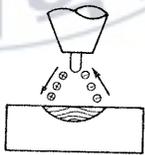
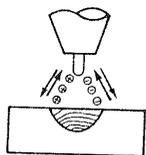
거의 사용하지 않고 특수한 경우 Al, Mg 등의 박판용접에 사용한다.

- ① 용접봉의 발열량이 크기 때문에 용접봉 끝이 녹아내릴 염려가 있어서 같은 전류에서 DCEN의 용접봉보다 4배정도 직경이 큰 용접봉을 사용한다.
- ② 아르곤을 실드가스로 사용할 때 청정작용(Cleaning action)이 있다.
- ③ 직류 봉일 때 용입이 얇고, 비드폭이 넓다.

3) 교류(AC)

- ①고주파 전원을 첨가하여 사용한다.
- ②용입과 비드폭은 DCEN과 DCEP의 중간이다.
- ③청정작용은 DCEP일 때의 반 정도가 일어난다.

Table 2.1 Comparison of bead shape according to the polarity

사 용 극 성	DCEN	DCEP	AC
전자와 이온의 흐름 용입 현상			
청 정 작 용	없다	있다	있다(DCEP의 50%)
발 생 열	70% 모재	30% 모재	50% 모재
	30% 용접봉	70% 용접봉	50% 용접봉
용 입	깊고 좁다	얇고 넓다	중간
용 도	대부분 금속의용접	박판 용접	Al,Mg

2.2.2 용접토치

종류는 냉각 방법에 따라 공랭식과 수냉식의 두 가지가 있다. Fig. 2.3는 수냉 토치를 보여주고 있다.

가스컵(가스 노즐)의 크기는 사용하는 텅스텐 전극봉 직경의 4-6배 정도가 적당 하며, 컵 사이즈가 작으면 과열되어 잘 깨지고, 너무 크면 실드가스 소모가 많다.

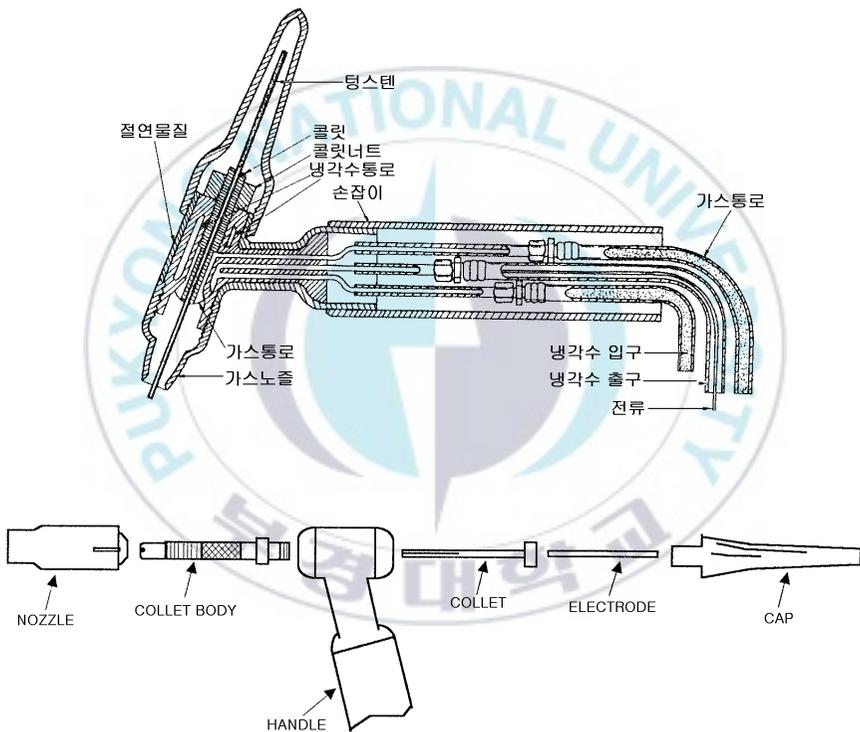


Fig. 2.3 Sectional view for TIG welding torch

2.2.3 용접재료

1) 전극봉

각 용접에서 정확한 종류와 사이즈의 전극봉을 사용하는 것은 중요하며, 적당한 전극봉으로 용접해야 만족할만한 결과를 얻는다.

Table 2.2은 텅스텐 종류에 대한 특징과 사용전원을 나타내고 구분은 보통 텅스텐 전극의 끝단의 색으로 구분할 수 있다.

Table 2.2 Classification of tungsten electrode

종 류	구분 색깔 (Color code)	사용전원	특 성
순 텅스텐	초록(green)	교류 고주파	가격이 싸고, 비교적 낮은 전류를 사용하는 용접에 이용한다.
1% 토리아 텅스텐 (thoria tungsten)	노랑(yellow)	DCEN 또는 DCEP	순 텅스텐보다 비싸지만 수명이 길고, 전류 전도성이 좋다.
2% 토리아 텅스텐	빨강(red)	DCEN 또는 DCEP	1%보다 수명이 길고, 주로 항공기 부품같은 박판 정밀 용접에 사용한다.
지르코니아 텅스텐 (zirconia tungsten)	갈색(brown)	교류 고주파	텅스텐보다 수명이 길고, 주로 교류 용접에 이용한다.

2) 보호 가스(Shield gas)

주로 아르곤과 헬륨을 많이 사용하며, 각각의 특징은 Table 2.3와 같다.

Table 2.3 Characteristic of Ar and He

특징	아르곤(Argon)	헬륨(Helium)
열적 편차력	낮다.	높다.
아크 전압	낮다.(열의 발생이 적다)	높다.(열의 발생이 많다)
아크 발생	헬륨보다 쉽다.	아르곤보다 어렵다.
열영향부(HAZ)	헬륨보다 넓다.	아르곤보다 좁다.
가스 소모량	적다.(분자량 40)	많다.(분자량 4)
아크 안정성	좋다.	아르곤보다 나쁘다.
모재 두께	박판에 좋다.(열의 발생이 적다)	후판에 좋다. (열의 발생이 많다)
청정작용	있다.(DCEP, AC)	없다.
용입(Penetration)	얕다.	깊다.
기타	수동용접에 좋다.	자동용접에 좋다.

혼합가스 : 헬륨(25% 또는 50%)과 아르곤(75% 또는 50%)을 혼합한 가스는 순 아르곤일 때보다 용입이 깊고, 아크 안정성은 순 아르곤일 때와 거의 같다.

2.3 TIG 고속용접 (High speed TIG welding)

TIG용접에서 생산성을 높이는 방법은 대전류로 고속용접을 적용해야 한다. 그러나 일반적인 수동 TIG 용접공정은 수동으로 용접할 경우 10~15cm/min의 용접속도 밖에 얻을 수 없기 때문에 GMA(Gas Metal Arc) 용접에 비해 그 적용에 많은 한계를 갖고 있다. 하지만 TIG용접 공정은 GMAW 공정에 비해 고품질의 용접부를 얻을 수 있으며 용접효율이 높은 많은 이점을 가지고 있다. 고속용접은 주로 박판 lap-joint, fillet joint, butt joint에 주로 사용되며 약 4~8mm²의 작은 용착단면적이 필요한 용접부를 빠른 용접속도로 용접하는데 사용된다. 고속용접은 용접속도가 빠르기 때문에 용착속도를 증가시키지 않으면 큰 용착단면적을 가지기 어렵다. 하지만 용착속도를 증가시키기 위해서는 전류를 높이고 송급속도를 증가시켜된다. 하지만 일반 TIG용접에서는 대전류를 적용하면 강한 아크력에 의해 언더컷과 험핑비드와 같은 결함이 발생하여 용착속도에 한계가 있다. 그래서 TIG용접은 저속 용접에서는 큰 용착단면적을 가질 수 있으나 고속용접에서는 큰 용착단면적을 유지할 수가 없다. 그래서 현재는 위와 같이 작은 용착단면적을 요구하는 분야에서 주로 사용되고 있다.

Fig. 2.4와 Fig. 2.5는 Shimada W.와 Savage W. F.가 정의한 TIG용접에서 전류와 용접속도에 따른 결함발생을 프로세스 맵화 시킨 것이다. 1~10cm/min의 저속용접에서는 전류의 증가에 따라 비드의 결함이 없으나 용접속도 40cm/min이상의 영역에서는 전류가 증가하면 400A이상의 영역에서부터 언더컷과 험핑비드와 같은 결함이 발생한다는 것을 나타내고 있다. Fig. 2.6은 K.Shinozaki의 Hotwire TIG 시스템의 결과이다. 일반 Cold TIG 용접에 비해 약 2배정도의 용착속도인 3.6kg/hr의 용착속도를 가지고 있으며 용접속도는 300cm/min, 3.2mm²의 단면적을 나타내고 있다.

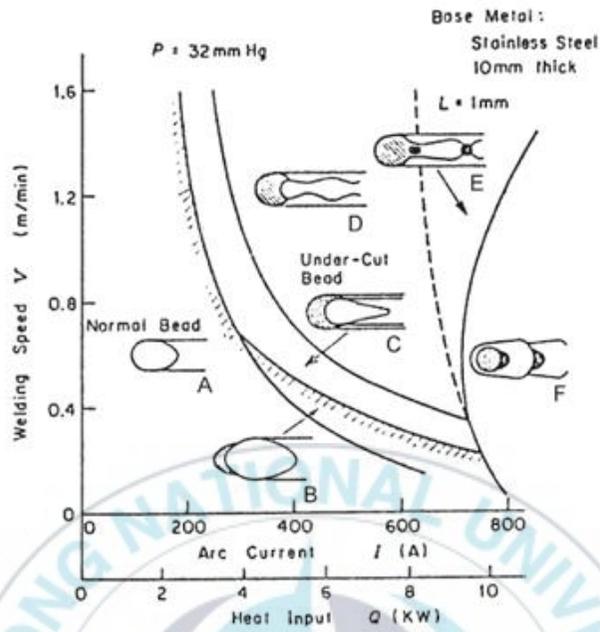


Fig. 2.4 Process map for GTAW at 0.04 atm⁵⁾

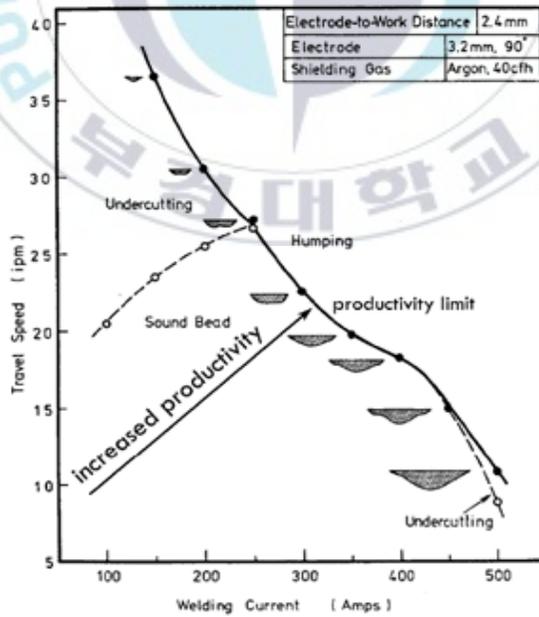


Fig. 2.5 Process map for GTAW at atmospheric pressure⁵⁾

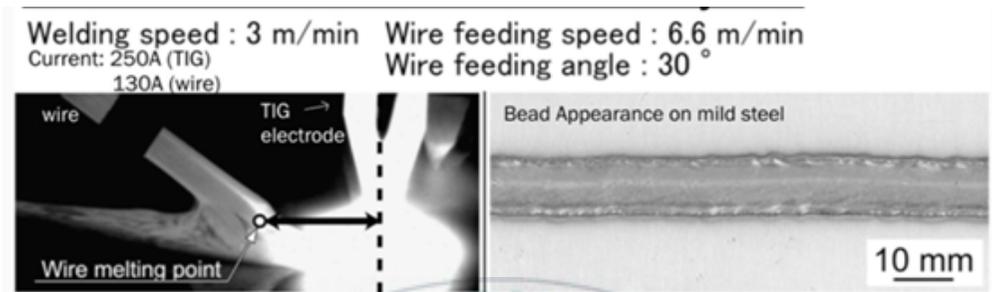


Fig. 2.6 Results with Hotwire TIG system⁶⁾



2.4 플라즈마 스트림 이론(Theory of Plasma stream)

2.4.1 플라즈마 스트림 이론의 개념

기존의 TIG용접에서는 아크를 플라즈마 기둥으로 간주하여 비표면적을 중요시하여 가늘고 등근 와이어를 송급하였다. 그러나 새로운 plasma stream 이론에서는 아크를 플라즈마가 상부 텅스텐 전극에서 용융지 방향으로 유체(Fluid)로 간주하였고, 플라즈마 스트림이라는 아크 물리학적 특징을 모델링 하여 이론적 체계를 확립하였다.

이 이론을 바탕으로 플라즈마 스트림과 직각방향이 되도록 용가재 형상을 오목한 관상으로 고안하여 적용함으로써 생산성이 획기적으로 향상된 Super_TIG 용접 기술을 개발하였다. Fig. 2.7은 기존의 TIG 아크 개념의 아크 플라즈마 기둥을 나타내었고 Fig. 2.8는 plasma stream 이론에 의해 아크는 플라즈마가 상부 텅스텐 전극에서 용융지 방향으로 흘러가는 유체(Fluid)로 간주한 것을 나타내었다.

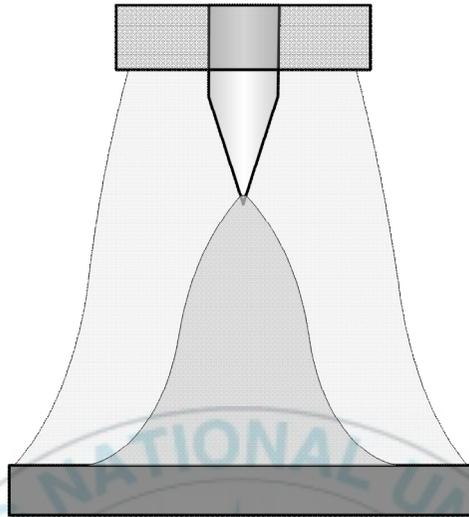


Fig. 2.7 Conventional TIG arc model

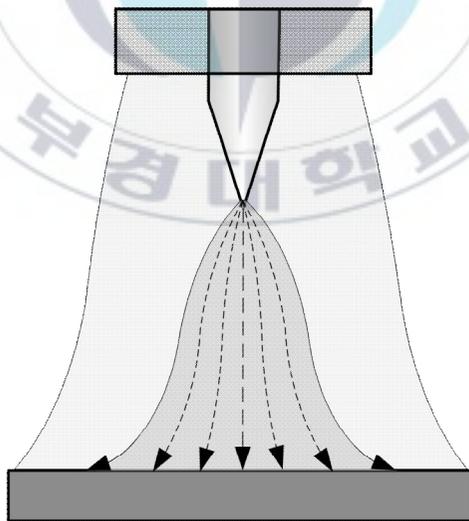


Fig. 2.8 TIG arc model by theory of plasma stream

2.4.2 플라즈마 스트림 이론의 관점에서 본 Super_TIG용접

새로운 plasma stream 이론을 적용하였을 때 기존 와이어 1.2mm는 와이어표면이 불록하여 플라즈마 스트림의 입사가 곤란하고, 플라즈마 스트림의 입사면적이 소직경으로 매우 작은 것을 알 수 있다. 그러나 C-Filler는 폭 5.0mm의 오목형으로 플라즈마 스트림의 입사가 유리하며 플라즈마 스트림의 입사면적도 큰 폭으로 매우 넓은 것을 알 수 있다. 또한 Dong-Soo Oh 등의 연구에 따르면 TIG 용접에서 아크 중심에서 아크압력이 가장 높으므로⁷⁾ 높은 생산성을 위해 높은 전류를 사용할 시 용락의 위험이 있다. 하지만 C-Filler를 사용하면 이 최대 아크압력을 C-Filler가 받아내기 때문에 용입이 깊지 않고 아크압력으로 인해 발생하는 험핑비드를 방지하는데도 효과적이다. Fig. 2.9은 플라즈마 스트림 이론에 의해 1.2mm 와이어에 대한 플라즈마 스트림 입사면적을 나타내었고 Fig. 2.10는 플라즈마 스트림 이론에 의해 5.0mm C-Filler에 대한 플라즈마 스트림 입사면적을 나타내었다.

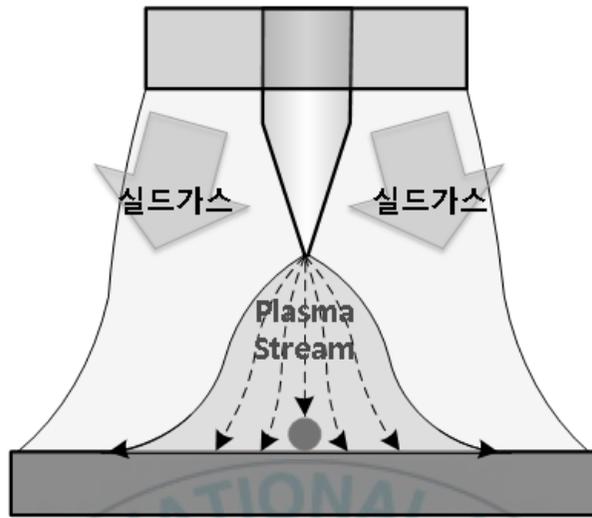


Fig. 2.9 Incident plasma stream on $\Phi 1.2$ wire by theory of plasma stream

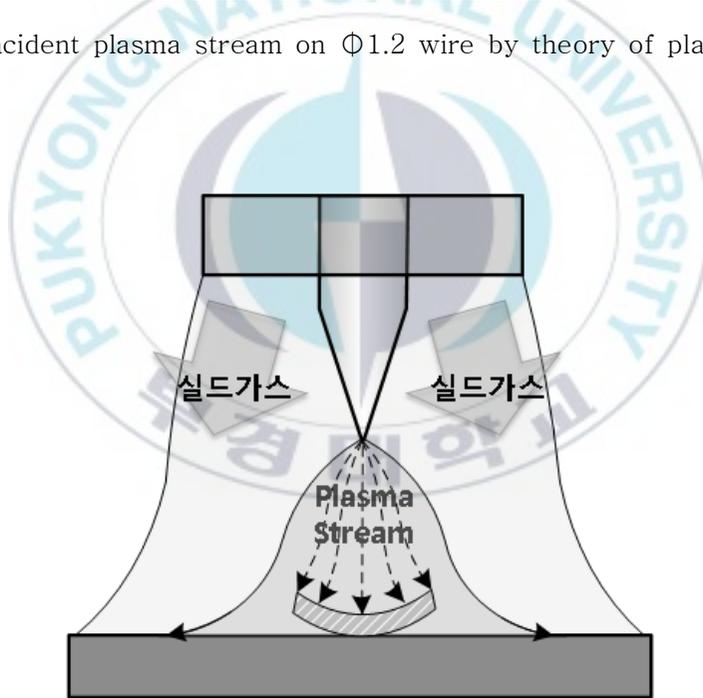


Fig. 2.10 Incident plasma stream on C-Filler by theory of plasma stream

2.5 Teaching point 정의

Fig. 2.11은 lap joint fillet 용접에서의 teaching point 모식도를 나타낸 것이다. 이때 Fig. 2.11의 (a)에 나타나있듯이 teaching point는 상판 edge를 기준으로 설정하였고 Fig. 2.11의 (b)에 나타나있듯이 gap이 증가함에 하여도 상판 edge를 기준으로 teaching 하였기 때문에 상판으로부터 거리는 일정하다.

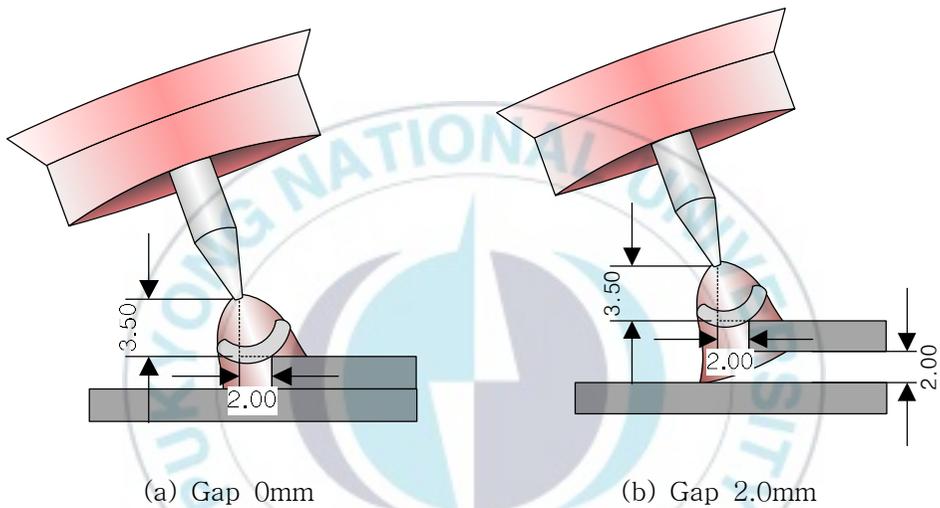


Fig. 2.11 Schematic of teaching point

2.6 Super-TIG 겹치기이음 필릿 용접에서의 에너지 분포

J. N. Dupont 등의 연구에 따르면 TIG 용접에서 전체 에너지는 발생하는 아크에서의 E_{arc} 와 전극에서의 $E_{electrode}$ 로 나누어 구분하고 이렇게 발생한 총 에너지는 아크 및 전극에서 손실된 에너지와 모재로 투입되는 에너지 그리고 모재로 전도된 에너지의 합과 같다⁸⁾. M. Ebert-Spiegel 등은 이를 GMAW lap joint에 적용하였는데⁹⁾ 이를 Super-TIG lap joint에 적용하면 Fig. 2.12 과 같다.

Fig. 2.12에서 손실된 에너지는 텅스텐 전극봉을 냉각시키며 손실되는 에너지 Q_{ELoss} , 아크에서 대기 중으로 일어나는 복사와 전도로 인해 손실되는 에너지 Q_{ALoss} 로 나누어지며 모재로 입열되는 에너지는 모재입열량 Q_{BM} , 용가재입열량 Q_{FM} 으로 나누어진다. Lap joint에서는 모재입열량 Q_{BM} 을 상판입열량 Q_{BMU} 와 하판입열량 Q_{BML} 로 나눌 수 있다.

박판 겹치기이음 필릿 용접에서 텅스텐 전극의 위치가 상판 모서리에서 일정한 거리를 유지하며 용접하면 상판입열량은 일정하다. 이 때 송급되는 용가재의 양이 많아지게 되면 용가재입열량이 많아지므로 하판입열량은 줄어들며 그로인해 하판용입이 감소하고 하판의 융합불량 발생 위험도는 커진다.

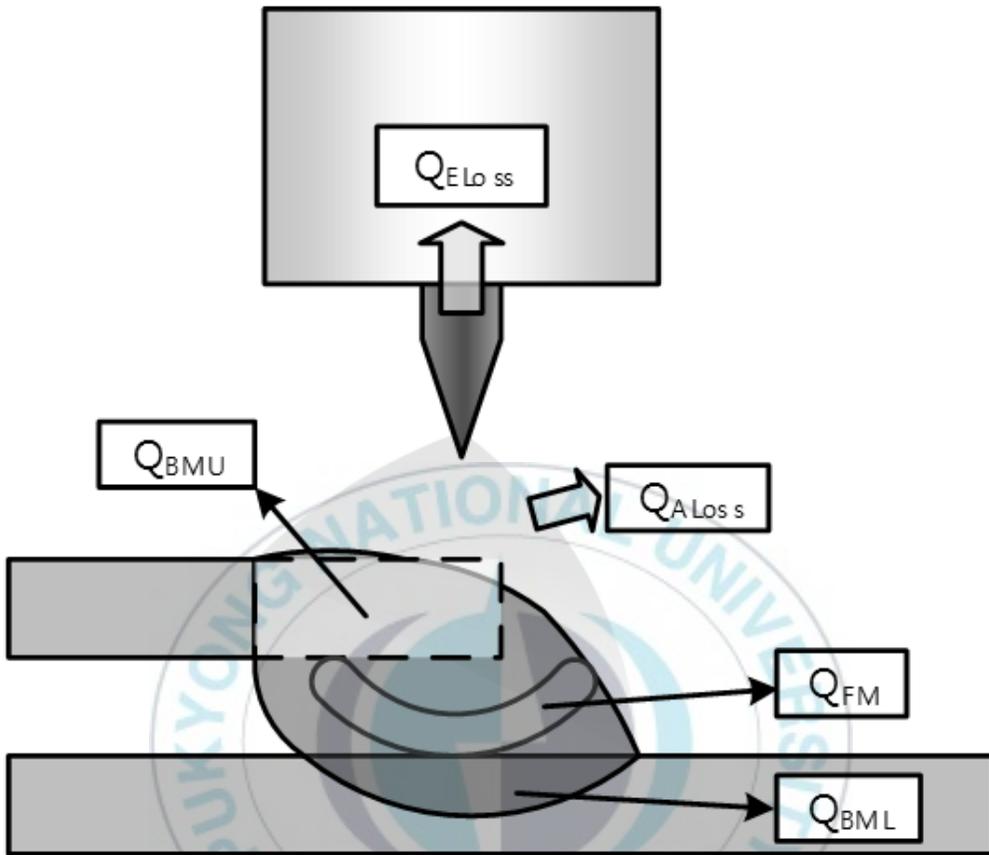


Fig. 2.12 Schematic principle of the energy distribution in lap joint welding process

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{BMU}} + Q_{\text{FM}} + Q_{\text{BML}} + Q_{\text{ELoss}} + Q_{\text{ALoss}} \quad (2.3)$$

Q_{BMU} : Heat input of Upper Base Metal

Q_{FM} : Heat input of Filler Metal

Q_{BML} : Heat input of Lower Base Metal

Q_{ELoss} : Loss energy of Electrode

Q_{ALoss} : Loss energy of Arc

제 3장 Lap Joint Fillet 용접에서 용융풀 선행에 관한 검토

3.1 Progressive angle 변경실험

3.1.1 실험 재료

본 실험에서 모재는 두께 2.0mm, 길이 140mm, 폭 40mm인 STS 304 plate를 사용하였으며, 모재의 형상은 Fig. 3.1에 나타내었다. 용가재는 단면적이 5.0mm²인 STS 316L을 사용하였다. STS 316L C-Filler의 제품명은 STC-316L이다. Fig. 3.2는 사용된 C-Filler의 macro section을 나타낸 것이며, Table 3.1과 Table 3.2는 모재와 용가재의 화학성분을 나타낸 것이다. 용접용 실드가스는 Ar 93%가스에 H₂를 7% 혼합한 가스를 사용하였으며, 실딩 유량은 20ℓ/min으로 하였다.

Table 3.1 Chemical composition of base metal

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
STS 304	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	19.00	10.00	-

Table 3.2 Chemical composition of C-type filler metal

	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Cu	N
STC 316L	0.001	0.38	1.90	0.021	12.10	19.10	2.30	0.25	0.021

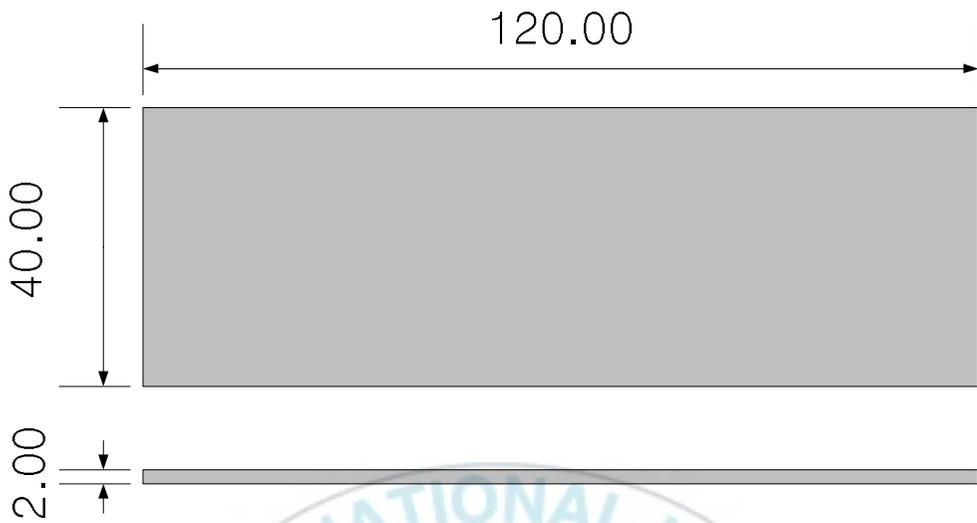


Fig. 3.1 Design of stainless steel 304 sheet



Fig. 3.2 Cross section of C-Filler

3.1.2 실험 방법

용접속도 100cm/min의 고속용접을하며 험핑비드, 언더컷이 없는 건전한 비드를 형성하기 위해 Ar 93%에 H₂를 7%를 혼합 한 가스를 사용하였으며, 100mm를 용접하였다. 용접 후 모재의 용락 및 백비드의 형성 유무를 확인하기 위해 모재인 STS 304 시험편 고정 시 테이블과 모재 용접부 사이에 20mm의 gap이 형성되게 위치하였다. TIG 토치는 아래보기 자세를 유지하며, 텅스텐 전극은 30°로 가공하여 사용하였고, 텅스텐 전극의 중심 직하에 C-Filler의 중심에 배치시켜 C형 용가재가 plasma stream을 균일하게 받을 수 있도록 설치하였다. 비소모성 전극인 텅스텐 전극의 전자방출을 더욱 효율적으로 하기 위해서 전극 선단을 절단하여 사용하였다¹⁰⁾. 텅스텐 전극은 상판 edge를 기준으로 y축으로 2.0mm, z축으로 3.5mm 떨어진 위치에 배치시킨다. 상판과 하판 모두 적절히 용융시키기 위해 작업각은 20°로 유지하였다. Table 3.3은 상세한 실험조건을 나타내었다. 변수로는 전진각 10°, 전진각 20°, 전진각 30°로 변경하며 실험을 진행하였으며, 각 전진각별로 용착단면적 7mm², 8mm², 9mm², 10mm², 11mm²으로 변경하며 실험을 진행하였다. 실험에서 사용한 용접 power source는 Fig. 3.3의 WORLDWELL 100TP2이고, Fig. 3.4는 Super-TIG 용접 전의 실험 세팅 사진이다. Fig. 3.5은 실험에 사용한 텅스텐 전극의 진행각 모식도와 작업각 및 teaching point의 모식도를 나타내었다.

Table 3.3 Welding condition

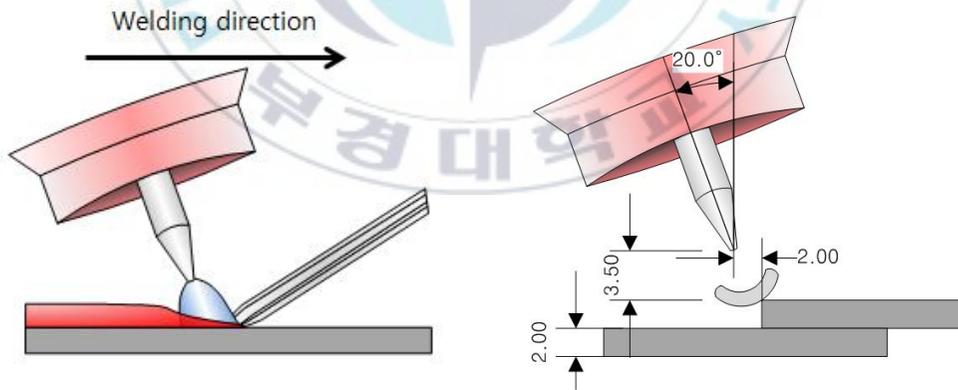
Fixed	Base metal	STS 304, t2.0
	Filler metal	STC 316L, 5.5mm ²
	Shield gas	Ar 93% + H ₂ 7%. 25L/min
	Welding speed	100cm/min
	Teaching point(y, z)	2.0, 3.5
	Current	300A
	Work angle	20°
Variable	Progressive angle	10°, 20°, 30°
	Deposition area	7mm ² , 8mm ² , 9mm ² , 10mm ² , 11mm ²



Fig. 3.3 WORLDWEL LONGRUN 1000PT2



Fig. 3.4 Super-TIG system



(a) Progressive angle

(b) Work angle and teaching point

Fig. 3.5 Schematic of progressive angle, work angle and teaching point

3.1.3 실험 결과 및 고찰

Table 3.4, Table 3.5, Table 3.6은 전진각 10°, 전진각 20°, 전진각 30°에서 lap joint fillet 용접 시 전류를 300A로 유지하면서 용착단면적 변경에 따른 비드외관 및 macro section을 나타내었다. 전진각 10°와 전진각 20°에서는 용착단면적 7mm²에서 아크의 current flux가 모재로 지나치게 집중되어 상판용락이 발생하였고, 용착단면적 8mm², 9mm², 10mm², 11mm²에서는 용착단면적의 증가로 인해 모재로 향하는 current flux가 감소되어 건전한 비드를 형성하였다. 한편, 전진각 30°에서는 지나치게 큰 전진각으로 인해 모재로 향하는 current flux가 감소하고 용가재로 향하는 current flux가 증가하여 모든 용착단면적의 조건에서 건전한 비드를 형성할 수 있었다.^{8,9)}

일반적으로 반복하중을 받는 부재에서 용접비드의 toe angle이 작을 경우에는 피로파괴가 일어날 수 있으므로¹¹⁾, toe angle 100°~110°를 normal한 상태의 비드, toe angle 110° 이상을 우수한 상태의 비드라고 한다. Table 3.7은 각각의 용접 비드의 macro section에서 비드의 toe angle을 측정하여 표로 나타낸 것이며, Fig. 3.6는 용착단면적에 따른 toe angle을, Fig. 3.7은 전진각에 따른 toe angle을 나타낸 것이다. 각각의 조건에 따른 용접비드의 toe angle을 측정한 결과 모든 용접 조건에서 toe angle 110° 이상의 건전한 비드를 확보하였다.

Fig. 3.8은 전진각에 따른 용융풀의 선형을 모식화한 것이다. 전진각 사용 용접 시, 용융풀을 선행시키는 힘은 아크력이다. 전진각 10°에서 전진각 20°로 증가시킴에 따라 용융풀의 선행량이 증가하여 toe angle이 증가하였다. 반면, 전진각 20°을 전진각 30°로 증가시켰을 때에는 지나치게 큰 전진각으로 인해 current flux가 모재보다 용가재로 집중되어 모재 입열량이 감소하였기 때문에, 오히려 용융풀의 선행량이 감소하여 toe angle이 감소한 것으로 판단된다.

Table 3.4 Bead appearance of progressive angle 10°

Deposition area	Bead appearance	Macro section
7mm ²		-
8mm ²		
9mm ²		
10mm ²		
11mm ²		

Table 3.5 Bead appearance of progressive angle 20°

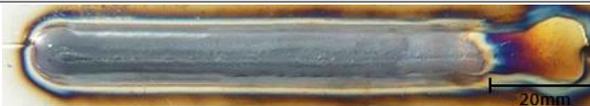
Deposition area	Bead appearance	Macro section
7mm ²		-
8mm ²		
9mm ²		
10mm ²		
11mm ²		

Table 3.6 Bead appearance of progressive angle 30°

Deposition area	Bead appearance	Macro section
7mm ²		
8mm ²		
9mm ²		
10mm ²		
11mm ²		

Table 3.7 Toe angle according to progressive angle

Progressive angle 10°	Deposition area	7mm ²	8mm ²	9mm ²	10mm ²	11mm ²
	Toe angle	-	131.8°	126.4°	122.8°	119.0°
Progressive angle 20°	Deposition area	7mm ²	8mm ²	9mm ²	10mm ²	11mm ²
	Toe angle	-	145.5°	134.7°	128.3°	124.5°
Progressive angle 30°	Deposition area	7mm ²	8mm ²	9mm ²	10mm ²	11mm ²
	Toe angle	143.8°	138.1°	131.5°	126.0°	121.4°

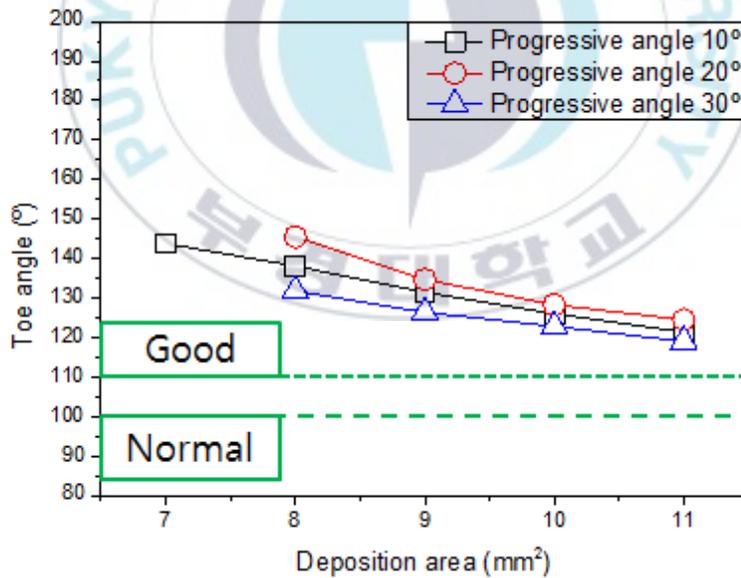


Fig. 3.6 Toe angle according to deposition area

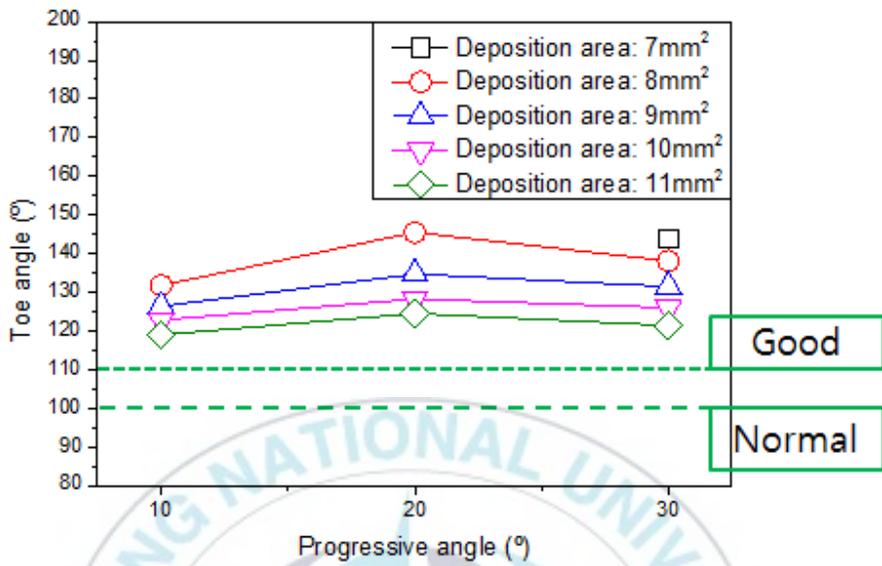
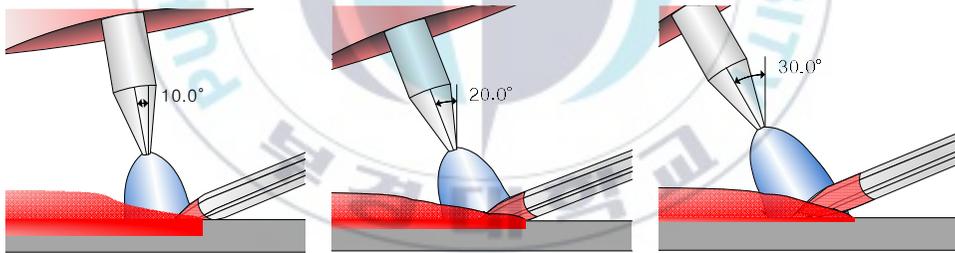


Fig. 3.7 Toe angle according to progressive angle



(a) Progressive angle 10° (b) Progressive angle 20° (c) Progressive angle 30°

Fig. 3.8 Modeling of ledged molten pool according to progressive angle

3.2 Incline angle 변경실험

3.2.1 실험 방법

용접속도 100cm/min의 고속용접을하며 험핑비드, 언더컷이 없는 건전한 비드를 형성하기 위해 Ar 93%에 H₂를 7%를 혼합 한 가스를 사용하였으며, 100mm를 용접하였다. 용접 후 모재의 용락 및 백비드의 형성 유무를 확인하기 위해 모재인 STS 304 시험편 고정 시 테이블과 모재 용접부 사이에 20mm의 gap이 형성되게 위치하였다. TIG 토치는 아래보기 자세를 유지하며, 텅스텐 전극은 30°로 가공하여 사용하였고, 텅스텐 전극의 중심 직하에 C-Filler의 중심에 배치시켜 C형 용가재가 plasma stream을 균일하게 받을 수 있도록 설치하였다. 비소모성 전극인 텅스텐 전극의 전자방출을 더욱 효율적으로 하기 위해서 전극 선단을 절단하여 사용하였다.¹⁰⁾ 텅스텐 전극은 상판 edge를 기준으로 y축으로 2.0mm, z축으로 3.5mm 떨어진 위치에 배치시킨다. 상판과 하판 모두 적절히 용융시키기 위해 작업각은 20°로 유지하였다. Table 3.8은 상세한 실험조건을 나타내었다. 변수로는 경사하진 10°, 경사하진 20°, 경사하진 30°로 변경하며 실험을 진행하였으며, 각 경사하진별로 용착단면적 7mm², 8mm², 9mm², 10mm², 11mm²으로 변경하며 실험을 진행하였다. Fig. 3.9는 Super-TIG 용접 전의 실험 세팅 사진이다. Fig 3.10에는 실험에 사용한 텅스텐 전극의 진행각 모식도와 작업각 및 teaching point의 모식도를 나타내었다.

Table 3.8 Welding condition

Fixed	Base metal	STS 304, t2.0
	Filler metal	STC 316L, 5.5mm ²
	Shield gas	Ar 93% + H ₂ 7%. 25L/min
	Welding speed	100cm/min
	Teaching point(y, z)	2.0, 3.5
	Current	300A
	Work angle	20°
Variable	Incline angle	10°, 20°, 30°
	Deposition area	7mm ² , 8mm ² , 9mm ² , 10mm ² , 11mm ²





Fig. 3.9 Super-TIG system

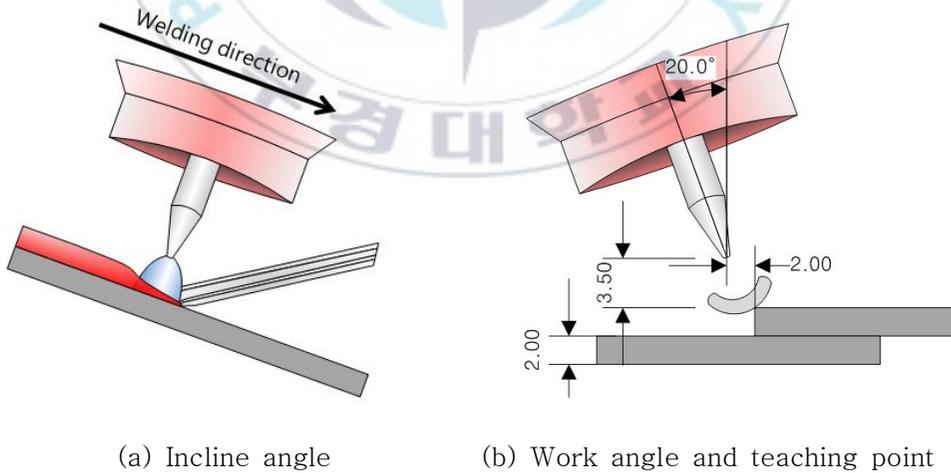


Fig. 3.10 Schematic of incline angle, work angle and teaching point

3.2.2 실험 결과 및 고찰

Table 3.9, Table 3.10, Table 3.11은 경사하진 10°, 경사하진 20°, 경사하진 30°에서 Lap Joint Fillet 용접 시 전류를 300A로 유지하면서 용착단면적 변경에 따른 비드외관 및 macro section을 나타내었다. 경사하진 10°에서 경사하진 30°까지 모든 용착단면적 조건에서 건전한 비드를 형성하였다. 일반적으로 반복하중을 받는 부재에서 용접비드의 toe angle이 작을 경우에는 피로파괴가 일어날 수 있으므로, toe angle 100°~110°를 normal한 상태의 비드, toe angle 110° 이상을 우수한 상태의 비드라고 한다. Table 3.12는 각각의 용접 비드의 macro section에서 비드의 toe angle을 측정하여 표로 나타낸 것이며, Fig. 3.11는 용착단면적에 따른 toe angle을, Fig. 3.12은 경사하진에 따른 toe angle을 나타낸 것이다. 각각의 조건에 따른 용접비드의 toe angle을 측정한 결과 모든 용접 조건에서 toe angle 110° 이상의 건전한 비드를 확보하였다.

Fig. 3.13은 경사하진에 따른 용융풀의 선형을 모식화한 것이다. 경사하진 사용 용접 시, 용융풀을 선형시키는 힘은 중력이다. 경사하진 10°에서 경사하진 30°로 증가시킴에 따라 용융풀에 작용하는 중력이 증가하기 때문에 용융풀의 선형량이 증가하여 toe angle이 증가하였다.

Table 3.9 Bead appearance of incline angle 10°

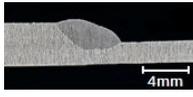
Deposition area	Bead appearance	Macro section
7mm ²		
8mm ²		
9mm ²		
10mm ²		
11mm ²		

Table 3.10 Bead appearance of incline angle 20°

Deposition area	Bead appearance	Macro section
7mm ²		
8mm ²		
9mm ²		
10mm ²		
11mm ²		

Table 3.11 Bead appearance of incline angle 30°

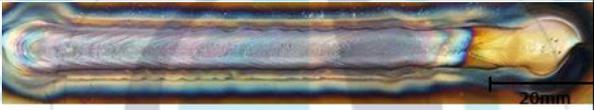
Deposition area	Bead appearance	Macro section
7mm ²		
8mm ²		
9mm ²		
10mm ²		
11mm ²		

Table 3.12 Toe angle according to incline angle

Incline angle 10°	Deposition area	7mm ²	8mm ²	9mm ²	10mm ²	11mm ²
	Toe angle	143.3°	134.1°	124.9°	120.6°	117.8°
Incline angle 20°	Deposition area	7mm ²	8mm ²	9mm ²	10mm ²	11mm ²
	Toe angle	144.5°	143.9°	135.8°	127.5°	117.4°
Incline angle 30°	Deposition area	7mm ²	8mm ²	9mm ²	10mm ²	11mm ²
	Toe angle	152.1°	145.1°	142.0°	127.8°	119.9°

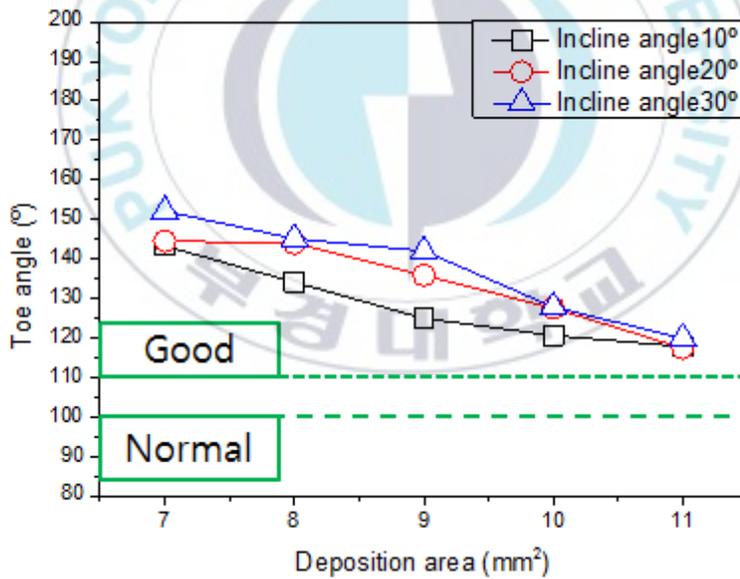


Fig. 3.11 Toe angle according to deposition area

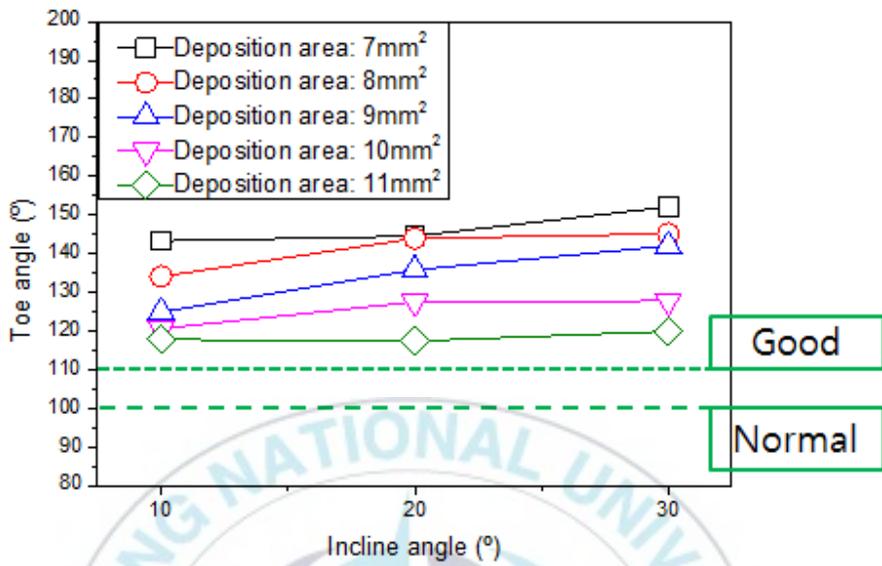


Fig. 3.12 Toe angle according to incline angle

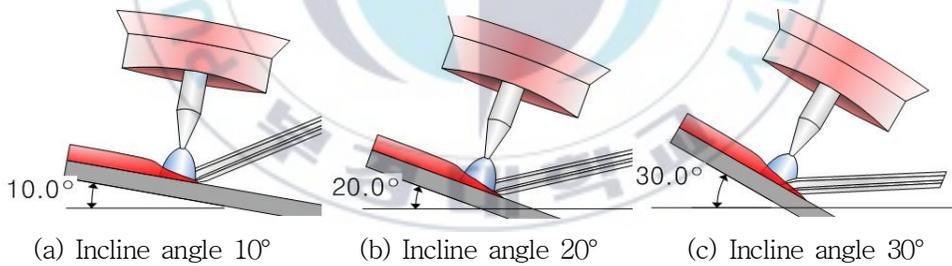


Fig. 3.13 Modeling of leaded molten pool according to incline angle

제 4장 Process 강건성 향상을 위한 연구

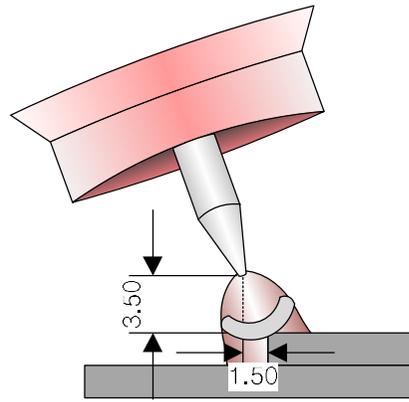
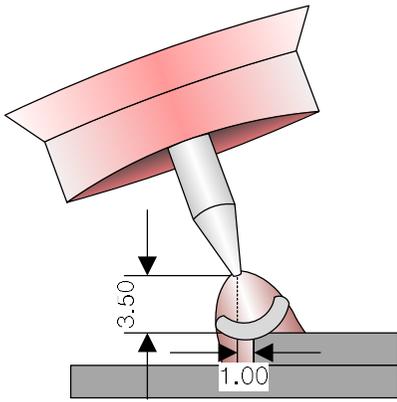
4.1 Process 강건성 검토실험

4.1.1 실험 방법

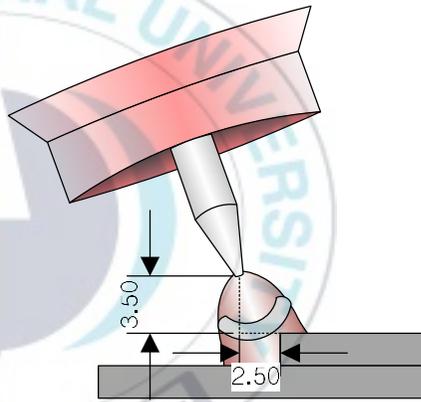
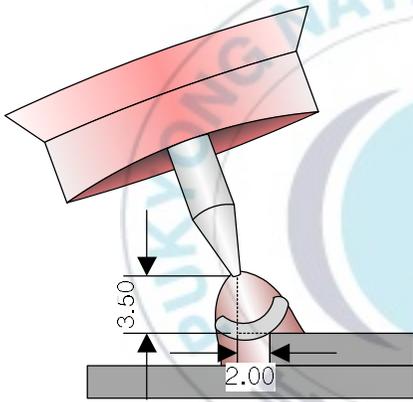
용접속도 100cm/min의 고속용접을 하며 험핑비드, 언더컷이 없는 건전한 비드를 형성하기 위해 Ar 93%에 H₂를 7%를 혼합한 가스를 사용하였으며, 100mm를 용접하였다. 용접 후 모재의 용락 및 백비드의 형성 유무를 확인하기 위해 모재인 STS 304 시험편 고정 시 테이블과 모재 용접부 사이에 20mm의 gap이 형성되게 위치하였다. TIG 토치는 아래보기 자세를 유지하며, 텅스텐 전극은 30°로 가공하여 사용하였고, 텅스텐 전극의 중심 직하에 C-Filler의 중심에 배치시켜 C형 용가재가 plasma stream을 균일하게 받을 수 있도록 설치하였다. 텅스텐 전극은 상판 edge를 기준으로 y축으로 2.0mm, z축으로 3.5mm 떨어진 위치에 배치시킨다. 상판과 하판 모두 적절히 용융시키기 위해 작업각은 20°로 유지하였다. Lap joint fillet 용접에서 gap은 상판과 하판 사이에서 발생한다. 또한 실제 현장에서는 용접전 제품의 seam이 일정하게 관리가 되지 않는다. 따라서 본 실험에서는 gap을 변경해가며, gap에 따라 y축 teaching point를 이동해가며 공정 강건성 검증 실험을 진행하였다. Fig. 4.1은 y축 teaching point를, Fig. 4.2는 gap을 변경하는 모식도를 나타낸다. Chapter 3에서 전진각과 경사하진을 변경하며 실험한 결과 경사하진 30°가 가장 toe angle이 넓었으므로 경사하진 30°를 선정하였으며, 용착단면적이 작을 경우 gap bridging이 더 불리하고, 용착단면적이 클 경우 toe angle이 감소할 것이므로 용착단면적 9mm²을 선정하여 실험을 진행하였다. Table 4.1은 상세한 실험조건을 나타내었다. Gap이 존재하는 조건에서 C-Filler의 이행모드를 관찰하기 위해 동영상 촬영을 실시하였다. 아크전압(arc voltage)을 측정하기 위해 모재(+)와 용접전원단자(-)에 전압센서를 부착하였다.

Table 4.1 Welding condition

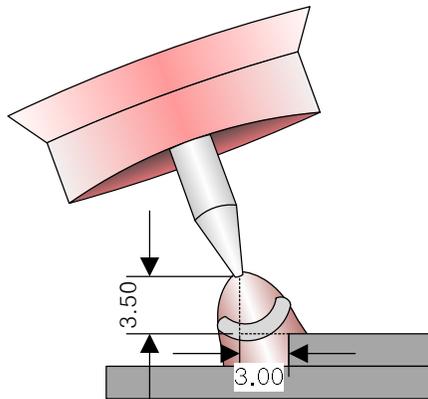
Fixed	Base metal	STS 304, t2.0
	Filler metal	STC 316L, 5.5mm ²
	Shield gas	Ar 93% + H ₂ 7%. 25L/min
	Welding speed	100cm/min
	Deposition area	9mm ²
	Current	300A
	Work angle	20°
	Incline angle	30°
Variable	Gap	0mm, 1.0mm, 2.0mm, 2.5mm
	Teaching point(y, z)	Offset upper plate: (1.0, 3.5), (1.5, 3.5) Default seam line: (2.0, 3.5) Offset lower plate: (2.5, 3.5), (3.0, 3.5)



(a) y axis teaching point: 1.0mm (b) y axis teaching point: 1.5mm



(c) y axis teaching point: 2.0mm (d) y axis teaching point: 2.5mm



(e) y axis teaching point: 3.0mm

Fig. 4.1 Schematic of teaching point

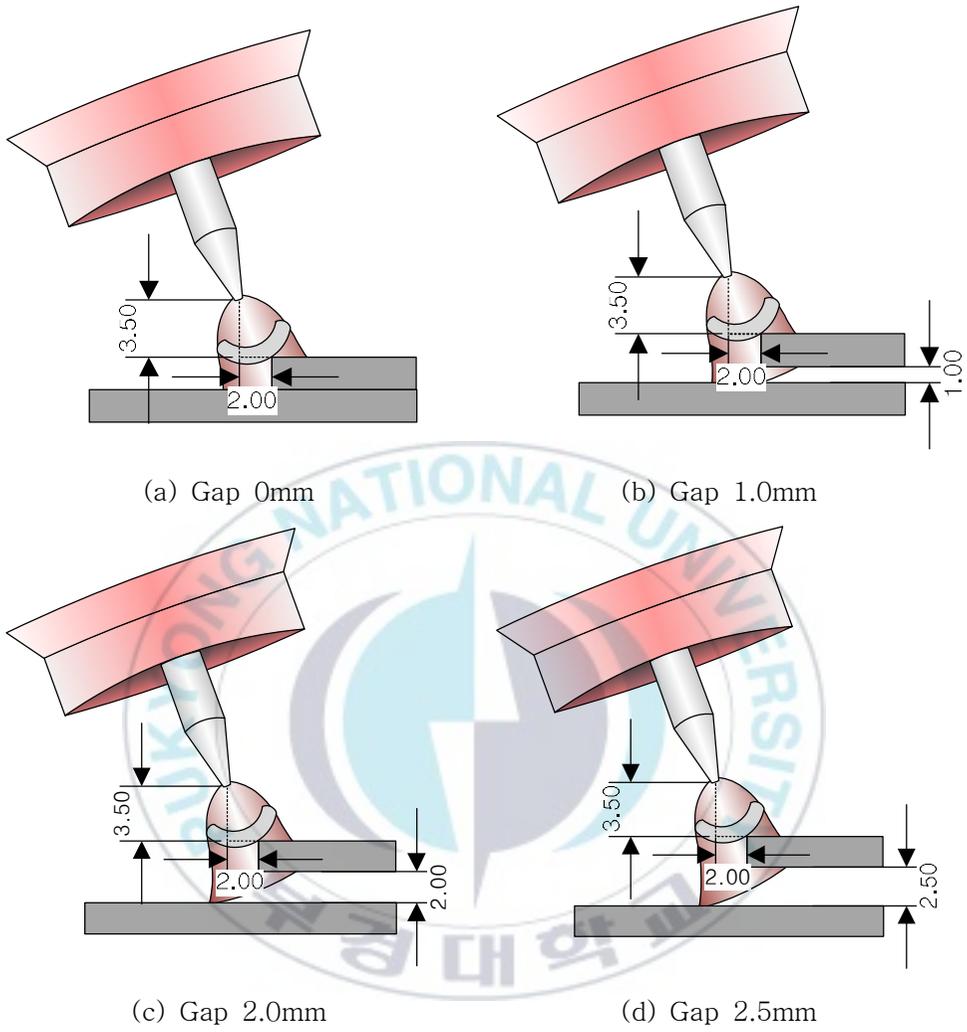


Fig. 4.2 Schematic of teeing point according to gap

4.1.2 실험 결과

Table 4.2, Table 4.3, Table 4.4, Table 4.5는 gap 0mm, gap 1.0mm, gap 2.0mm, gap 2.5mm에서 lap joint fillet 용접 시 전류를 300A, 용착단면적 9mm²로 유지하면서 y축 teaching point 변경에 따른 비드외관 및 macro section을 나타내었다. Gap 0mm에서 gap 1.0mm까지는 y축 teaching point를 변경한 모든 조건에서 건전한 비드를 형성하였고, gap 2.0mm에서는 y축 teaching point가 3.0mm일때 소량의 스패터가 발생하였지만 건전한 비드를 형성하였다. Gap 2.5mm에서는 대부분의 조건에서 gap bridging에 실패하였다. Table 4.6은 용접 비드의 macro section에서 toe angle을 측정하여 표로 나타낸 것이며, Fig. 4.3은 y축 teaching point에 따른 toe angle을 나타낸 것이다. 각각의 조건에 따른 용접비드의 toe angle을 측정한 결과, gap 2.0mm의 y축 teaching point가 1.0mm일때는 toe angle이 107°로 normal한 상태의 용접비드를 형성하였으며 그 외의 모든 조건에서는 110°이상의 우수한 용접비드를 형성하였다. 또한 y축 teaching point가 하판쪽으로 치우침에 따라 toe angle도 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

Table 4.2 Bead appearance of gap 0mm

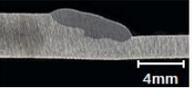
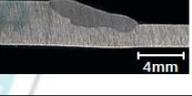
y-axis teaching point		Bead appearance	Macro section
Offset upper plate	1.0		
	1.5		
Default seam line	2.0		
Offset lower plate	2.5		
	3.0		

Table 4.3 Bead appearance of gap 1.0mm

y-axis teaching point		Bead appearance	Macro section
Offset upper plate	1.0		
	1.5		
Default seam line	2.0		
Offset lower plate	2.5		
	3.0		

Table 4.4 Bead appearance of gap 2.0mm

y-axis teaching point		Bead appearance	Macro section
Offset upper plate	1.0		
	1.5		
Default seam line	2.0		
Offset lower plate	2.5		
	3.0		

Table 4.5 Bead appearance of gap 2.5mm

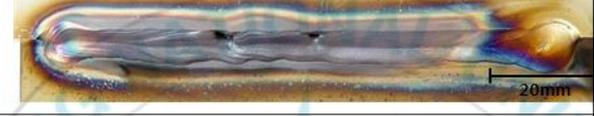
y-axis teaching point		Bead appearance	Macro section
Offset upper plate	1.0		-
	1.5		-
Default seam line	2.0		-
Offset lower plate	2.5		-
	3.0		-

Table 4.6 Toe angle according to gap length

Gap 0mm	y-axis teaching point	1.0mm	1.5mm	2.0mm	2.5mm	3.0mm
	Toe angle	124.7°	127.1°	140.5°	140.7°	146.6°
Gap 1mm	y-axis teaching point	1.0mm	1.5mm	2.0mm	2.5mm	3.0mm
	Toe angle	112.4°	118.5°	126.0°	132.1°	134.2°
Gap 2mm	y-axis teaching point	1.0mm	1.5mm	2.0mm	2.5mm	3.0mm
	Toe angle	107.0°	121.5°	140.5°	145.8°	130.8°

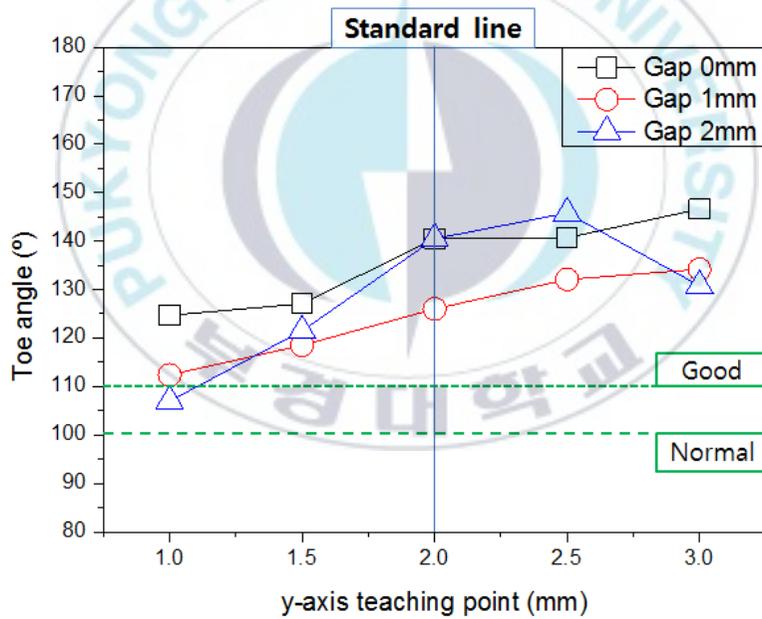


Fig. 4.3 Toe angle according to y-axis teaching point

4.2 용접 동영상에 관한 고찰

용접동영상의 촬영은 가장 대표적인 조건인 y축 teaching point 2.0mm와 가장 특이점을 보인 y축 teaching point 3.0mm에서만 실행하였다. Fig. 4.4, Fig. 4.5는 gap 0mm에서 lap joint fillet 용접실험 중 촬영한 동영상의 snap shot 이다.



Fig. 4.4 Snap shot of y-axis teaching point: 2.0mm



(a) Bridging of droplet



(b) Separation of droplet

Fig. 4.5 Snap shot of y-axis teaching point 3.0mm

y축 teaching point가 2.0mm일 때 C-Filler의 상판쪽과 하판쪽 2곳에서 bridge가 형성되어 용적이 이행되는 것을 관찰할 수 있다. y축 teaching point가 3.0mm일 때 Fig. 4.1의 (e)에서 모식화한 바와 같이 C-Filler가 상판과 하판에서 떨어져있으므로, bridge가 형성되었다가, separation이 반복적으로 되는 현상을 관찰 할 수 있다.

Fig. 4.6, Fig. 4.7는 gap 1.0mm에서 lap joint fillet 용접실험 중 촬영한 동영상의 snap shot 이다.



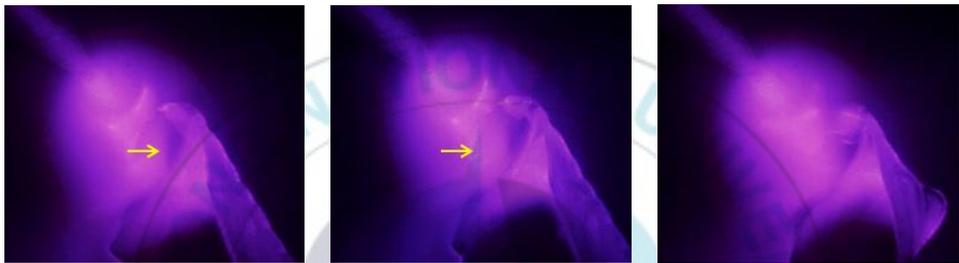
(a) Growth of droplet (b) Moving of droplet (c) Bridging of droplet
Fig. 4.6 Snap shot of y-axis teaching point 2.0mm



(a) Bridging of droplet (b) Separation of droplet
Fig. 4.7 Snap shot of y-axis teaching point 3.0mm

y축 teaching point가 2.0mm일 때 C-Filler의 상판쪽 용적은 연속교락이행이 되고 있지만, 하판쪽 용적은 1.0mm의 gap으로 인해 곧바로 이행되지 못하고, C-Filler의 중심쪽으로 용적이 이동하여 이행되는 것을 관찰 할 수 있다. y축 teaching point가 3.0mm일 때에는 Fig. 4.1의 (e)에서 모식화한 바와 같이 C-Filler가 상판과 하판에서 떨어져있으므로, bridge가 형성되었다가, separation이 반복적으로 되는 현상을 관찰 할 수 있다.

Fig. 4.8, Fig. 4.9는 gap 2.0mm에서 lap joint fillet 용접실험 중 촬영한 동영상의 snap shot 이다.



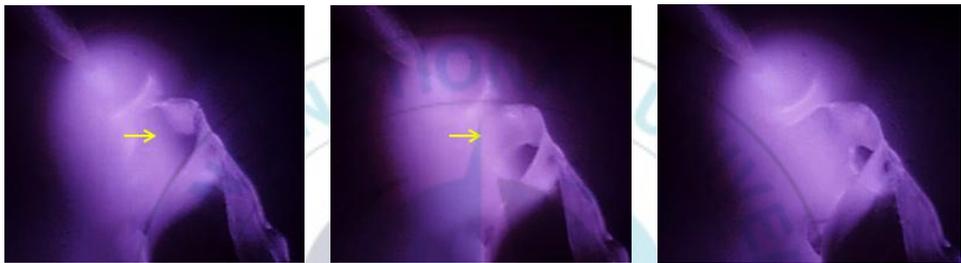
(a) Growth of droplet (b) Moving of droplet (c) Bridging of droplet
Fig. 4.8 Snap shot of y-axis teaching point 2.0mm



(a) Bridging of droplet (b) Separation of droplet
Fig. 4.9 Snap shot of y-axis teaching point 3.0mm

y축 teaching point가 2.0mm일 때 C-Filler의 상판쪽 용적은 연속교락이행이 되고 있지만, 하판쪽 용적은 2.0mm의 gap으로 인해 곧바로 이행되지 못하고, C-Filler의 중심쪽을 지나 다시 상판쪽으로 이동하여 이행되는 것을 관찰 할 수 있다. y축 teaching point가 3.0mm일 때에는 Fig. 4.1의 (e)에서 모식화한 바와 같이 C-Filler가 상판과 하판에서 떨어져있으므로, bridge가 형성되었다가, separation이 반복적으로 되는 현상을 관찰 할 수 있다.

Fig. 4.10, Fig. 4.11은 gap 2.5mm에서 lap joint fillet 용접실험 중 촬영한 동영상의 snap shot 이다.



(a) Growth of droplet (b) Moving of droplet (c) Bridging of droplet
Fig. 4.10 Snap shot of y-axis teaching point 2.0mm



(a) Bridging of droplet (b) Separation of droplet
Fig. 4.11 Snap shot of y-axis teaching point 3.0mm

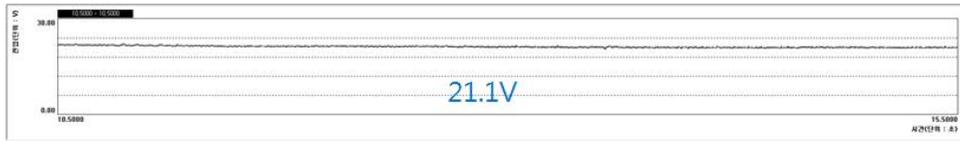
y축 teaching point가 2.0mm일 때 C-Filler의 상판쪽 용적은 연속교락이행이 되고 있지만, 하판쪽 용적은 2.0mm의 gap으로 인해 곧바로 이행되지 못하고, C-Filler의 중심쪽을 지나 다시 상판쪽으로 이동하여 이행되는 것을 관찰 할 수 있다. 하지만 용적이 이행되었음에도 불구하고 지나치게 큰 gap으로 인해 gap bridging이 되지 못하는 것을 관찰할 수 있다.

y축 teaching point가 3.0mm일 때에는 Fig. 4.1의 (e)에서 모식화한 바와 같이 C-Filler가 상판과 하판에서 떨어져있으므로, bridge가 형성되었다가, separation이 반복적으로 나타났으며, gap bridging이 되지 않는 것이 y축 teaching point 2.0mm보다 더 뚜렷하게 관찰되었다. 따라서 process 강건성 향상을 위해서는 C-Filler의 상판쪽과 하판쪽 모두에서 골고루 이행되는 것이 건전한 비드를 형성하는데 유리한 것으로 판단된다.

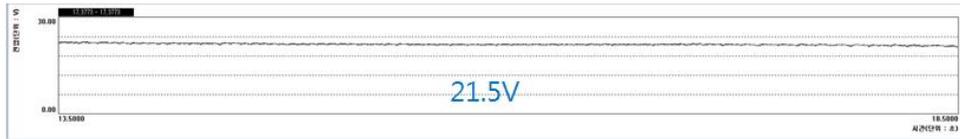


4.3 용접 전압에 의한 이행모드의 고찰

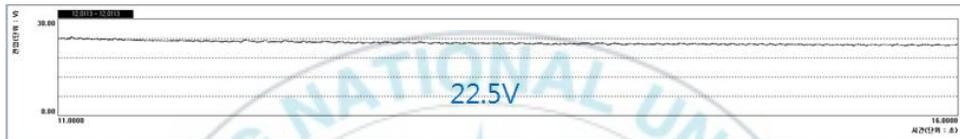
GTAW에서 이행모드와 아크전압과의 관계에 대해 많은 선행연구들이 있다. 측정된 아크전압은 용접상태의 모니터링, 용가재 이행모드의 관찰 등과 같은 곳에 사용되었다. 본 연구에서는 아크전압을 측정하여 이행모드의 특이사항을 관찰하였다. Fig. 4.12, Fig. 4.13, Fig. 4.14, Fig. 4.15은 5초구간의 아크전압 파형(wave form)을 측정한 것이며, Fig. 4.16는 아크전압이 불안정한 조건인 y축 teaching point가 3.0mm일 때의 1초구간 확대파형을 나타낸 것이다. y축 teaching point가 3.0mm일 때는 Fig. 4.5, Fig. 4.7, Fig. 4.9, Fig. 4.11에서 관찰하였듯이 bridge된 용적이 separation되는 현상이 아크 전압으로도 관찰 가능하였으며, gap이 증가함에 따라 separation되는 횟수가 증가함을 알 수 있다. Fig. 4.17는 각각의 gap, y축 teaching point에 대한 아크전압을 그래프로 나타낸 것인데, 대체적으로 y축 teaching point가 증가함에 따라, gap이 증가함에 따라 아크전압이 증가하였다. 이는 Fig. 4.1과 Fig. 4.2에 모식화한 대로, y축 teaching point가 하판쪽으로 치우칠수록 텅스텐 전극으로부터 상판의 거리가 멀어졌기 때문에 아크길이가 증가한 영향으로 판단되며, gap이 증가함에 따라 텅스텐 전극과 하판의 거리가 멀어졌기 때문으로 판단된다.



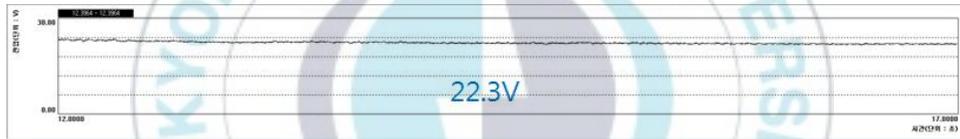
(a) y-axis teaching point 1.0mm



(b) y-axis teaching point 1.5mm



(c) y-axis teaching point 2.0mm

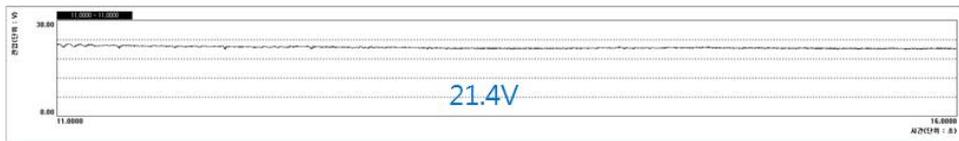


(d) y-axis teaching point 2.5mm

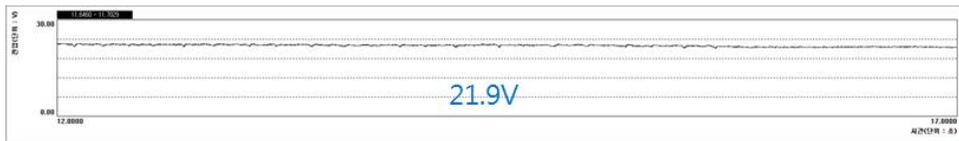


(e) y-axis teaching point 3.0mm

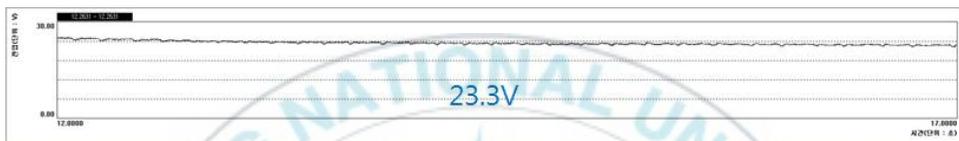
Fig. 4.12 Wave forms in 5 second range at gap 0mm



(a) y-axis teaching point 1.0mm



(b) y-axis teaching point 1.5mm



(c) y-axis teaching point 2.0mm

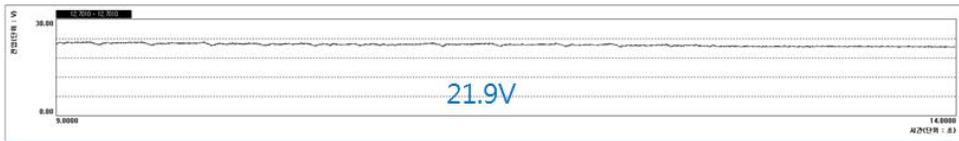


(d) y-axis teaching point 2.5mm

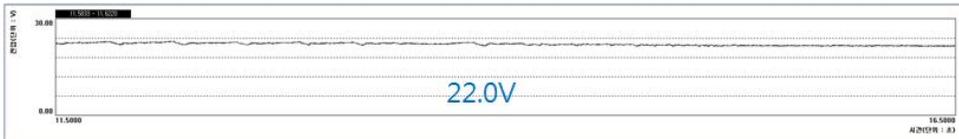


(e) y-axis teaching point 3.0mm

Fig. 4.13 Wave forms in 5 second range at gap 1.0mm



(a) y-axis teaching point 1.0mm



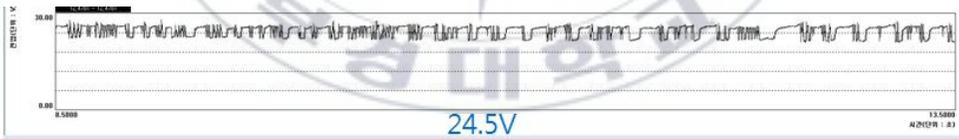
(b) y-axis teaching point 1.5mm



(c) y-axis teaching point 2.0mm

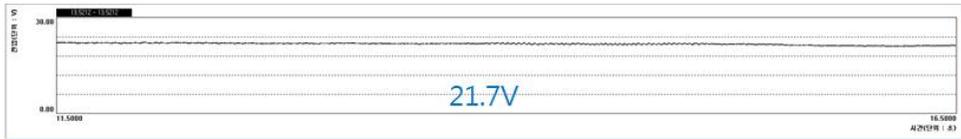


(d) y-axis teaching point 2.5mm

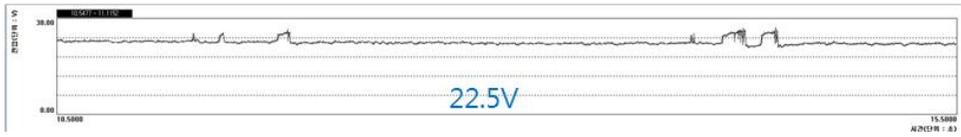


(e) y-axis teaching point 3.0mm

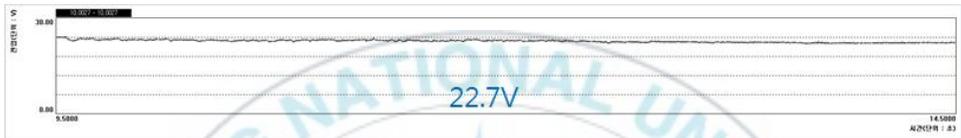
Fig. 4.14 Wave forms in 5 second range at gap 2.0mm



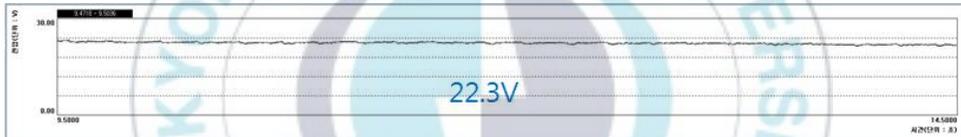
(a) y-axis teaching point 1.0mm



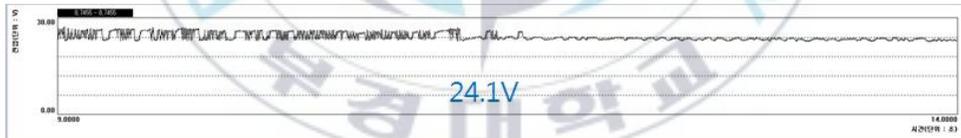
(b) y-axis teaching point 1.5mm



(c) y-axis teaching point 2.0mm



(d) y-axis teaching point 2.5mm

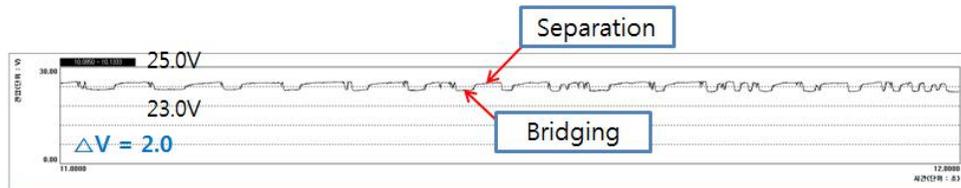


(e) y-axis teaching point 3.0mm

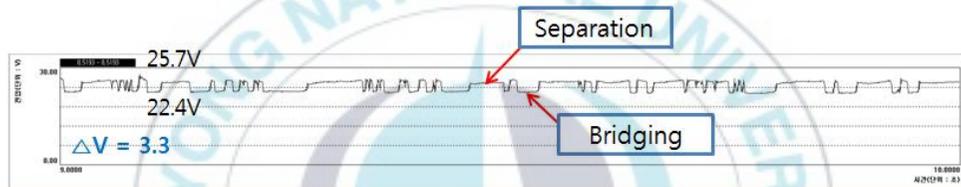
Fig. 4.15 Wave forms in 5 second range at gap 2.5mm



(a) Gap 0mm



(b) Gap 1.0mm



(c) Gap 2.0mm



(d) Gap 2.5mm

Fig. 4.16 Wave forms in 1 second range at y-axis teaching point 3.0mm

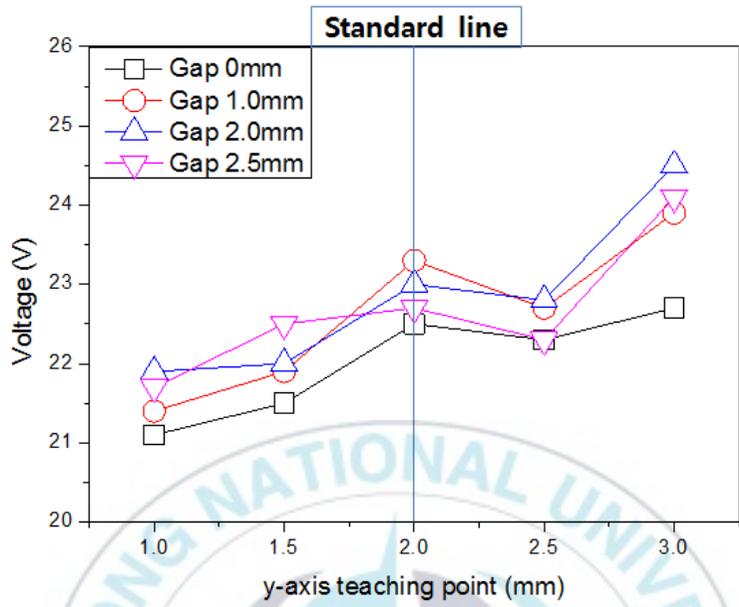


Fig. 4.17 Arc voltage according to y-axis teaching point

4.4 C형 용가재를 사용하는 TIG 용접의 이행모드 모델링

Fig. 4.18, Fig. 4.19, Fig. 4.20, Fig. 4.21은 GTAW의 Lap Joint Fillet 용접에서 C형 용가재를 사용하였을 때 나타나는 이행현상을 관찰하여 모델링한 것이다. Gap 0mm일 때에는 C형 용가재가 용융될 때 하판쪽과 상판쪽 2곳에서 이행되어 비드가 형성된다. 하지만 gap이 존재하는 경우에는 하판쪽 용적이 곧바로 이행되지 못하고 이동하는 현상이 나타난다. Fig. 4.19는 gap 1.0mm일 때 이행현상을 모델링한 것이다. 하판쪽 용적이 중력에 의해 C-Filler의 중심으로 이동하고, gap이 1.0mm으로 비교적 작기 때문에 이동하던 하판쪽 용적이 용융풀에 교락되어 이행된다. Fig. 4.20는 gap 2.0mm일 때 이행현상을 모델링한 것이다. 이행되지 못한 하판쪽 용적이 중력에 의해 C-Filler의 중심으로 이동하고, 아크 압력에 의해 상판의 melting bridge와 융합되는 현상을 나타내었다. Fig. 4.21은 gap 2.5mm일 때 이행현상을 모델링한 것이며, gap이 지나치게 크기 때문에 gap bridging에 실패한 것을 모델링하였다.

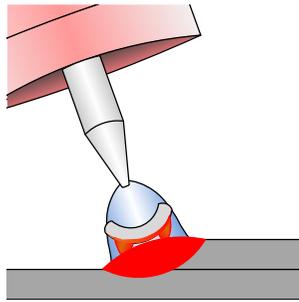
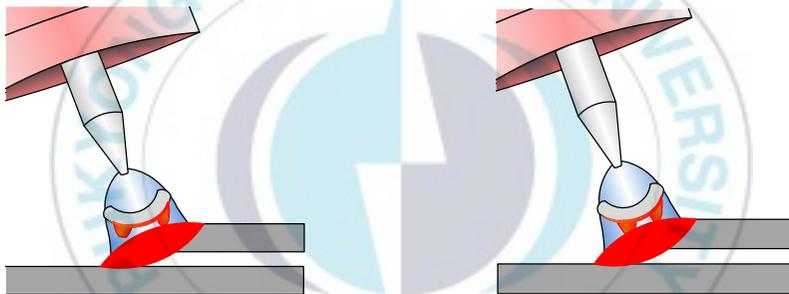


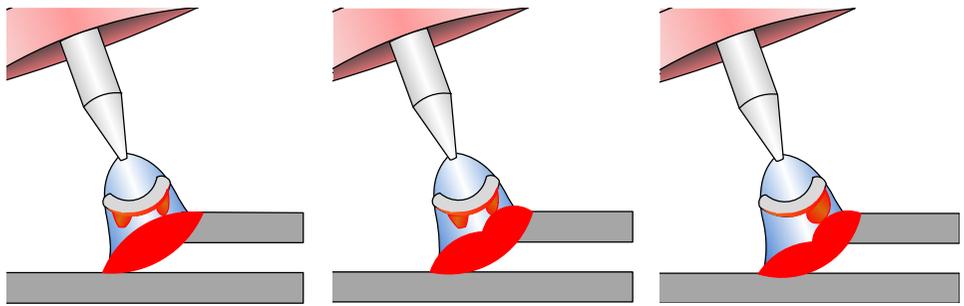
Fig. 4.18 Transfer mode of lap joint fillet welding by Super-TIG at gap 0mm



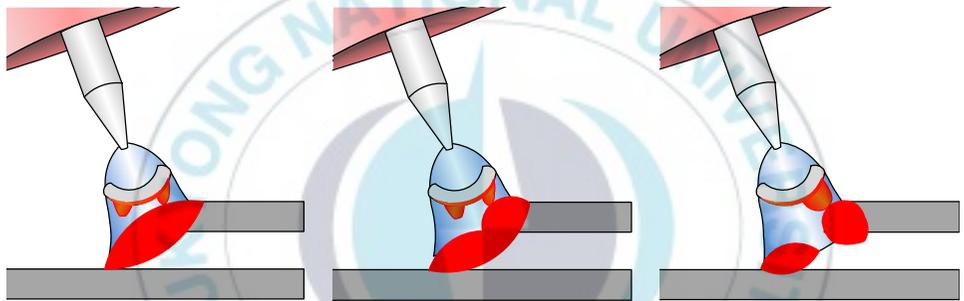
(a) Grow of droplet

(b) Moving and bridging of droplet

Fig. 4.19 Transfer mode of lap joint fillet welding by Super-TIG at gap 1.0mm



(a) Grow of droplet (b) Moving of droplet (c) Bridging of droplet
 Fig. 4.20 Transfer mode of lap joint fillet welding
 by Super-TIG at gap 2.0mm



(a) Grow of droplet (b) Moving of droplet (c) Bridging of droplet
 Fig. 4.21 Transfer mode of lap joint fillet welding
 by Super-TIG at gap 2.5mm

4.5 Lap Joint Fillet 용접의 과대 gap에 따른 용락 모델링

본 연구에서는 lap joint fillet 용접의 과대 gap 조건에서 용락이 발생한 현상을 역학적 관점에서 모델링하였으며, Fig. 4.21는 gap에 따른 비드 처짐을 나타내었다. 단순보에 등분포하중이 작용한다면 이때 발생하는 휨(Deflection, δ)의 크기는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{5PL^4}{384EI} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

δ : Deflection

P: Arc pressure

L: Gap

EI: Bending stiffness

이때 gap 1.0mm, gap 2.0mm, gap 2.5mm일 때의 deflection 값을 비교하면

$$\delta_{2.5} = 2.4\delta_{2.0} = 39.1\delta_{1.0} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

가 된다. 따라서 같은 전류, 같은 아크압력에서도 gap 사이 비드 처짐량은 gap의 크기가 증가함에 따라 급격히 증가하게 되므로 용락발생의 위험이 크다.

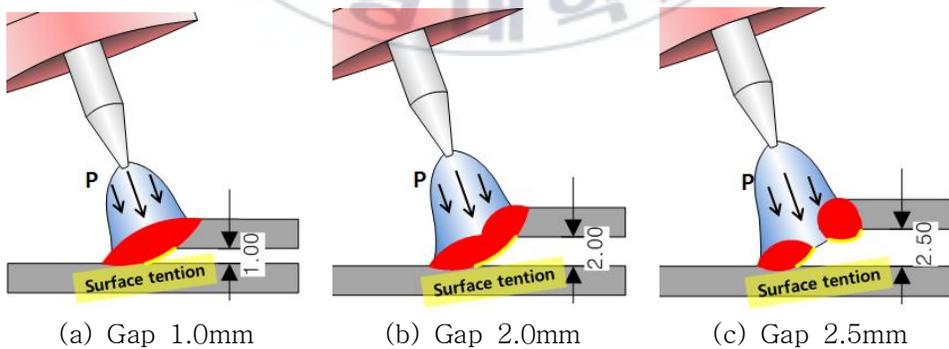


Fig. 4.21 Modeling of bead deflection according to gap

4.6 Super-TIG에 의한 Lap Joint 필릿 용접 가능 영역

Lap joint fillet 용접 시 보다 강건한 공정을 위해 CMT, AC GMAW, Laser용접, GMAW와 Laser의 hybrid용접 등을 통한 많은 연구가 있었다. GMAW 공정을 통해 gap bridging시 gap 2.0mm에서 용접은 가능하지만, 양호하지 못한 비드 횡단면을 확보하였으며^{1),12)}, laser 용접은 용착금속이 없으므로 gap bridging이 최대 0.7mm까지 용접 가능하였다^{13,14)}. 따라서 Fig. 4.22는 Super-TIG 용접이 lap joint fillet 용접에서 GMAW 공정 및 Laser용접 대비 공정의 강건성이 더 우수한 것을 나타낸다.

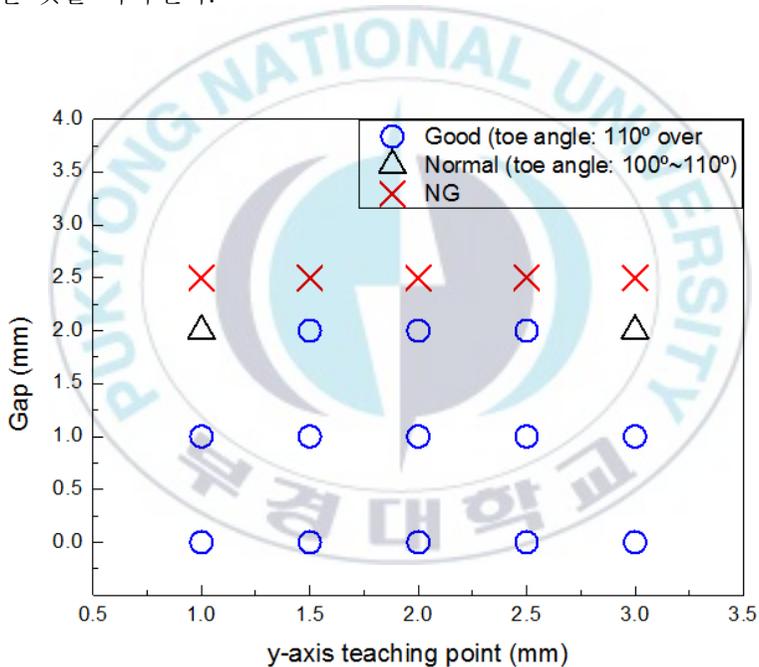


Fig. 4.22 Weldable area of lap joint fillet by Super-TIG

제 5장 결론

본 연구는 stainless steel 304 박판 lap joint fillet 용접에서 용접속도 100cm/min의 고속 용접을 적용하여, gap이 발생하거나 용접선이 이탈하는 경우에도 건전한 비드를 형성시키기 위해 Super-TIG 용접 공정 개발 연구를 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전진각과 경사하진에 따라 용착단면적 변경 실험한 결과, 전진각이 10°에서 20°로 증가하면 아크력에 의해 용융풀의 선행량이 증가하므로 toe angle이 증가하였고, 전진각이 20°에서 30°로 증가하면 지나치게 큰 전진각으로 인해 모재 입열량이 감소하므로 toe angle이 감소하였다. 경사하진이 10°에서 30°로 증가할수록 용융풀에 작용하는 중력이 증가하므로, toe angle이 증가하였다.
- 2) Lap joint fillet 용접결과 경사하진 30°에서 toe angle이 가장 크므로 경사하진 30°로 결정하였으며, 용착단면적이 큰 경우 toe angle이 감소하고 작을 경우 gap bridging 능력이 감소하므로 용착단면적은 9mm²로 선정하여 공정 강건성 검증실험을 진행하였다.
- 3) 공정 강건성 검증 실험 결과 상판 모서리에서 하판쪽으로 2.0mm의 위치를 기준으로 하였을 때 좌우 ±1.0mm까지, gap 0mm에서 gap 2.0mm까지는 모두 건전한 비드를 형성하여 용접선 이탈과 gap 변동에 대한 강건한 공정이 확보되었다.
- 4) 상판 모서리에서 하판쪽으로 2.0mm의 기준위치에서 하판쪽으로 1.0mm 어긋난 곳에 용접이 되면, 금속이행모드는 교락과 분리가 나타났지만 건전한 비드를 형성하였다. 이 경우, 계측된 전압 파형 관찰에 의해 금속이행 모드의

교락과 분리가 반복되는 것이 확인되었다.

5) C형 용가재를 사용하여 lap joint fillet 용접 시 C형 용가재의 하판쪽과 상판쪽 2곳에서 이행되며, gap이 존재하는 경우에는 gap으로 인해 하판쪽 용적이 이행되지 못하고 중력과 아크압력에 의해 상판쪽으로 이동하는 현상을 관찰하여 모델링 하였다.

6) Lap joint fillet 용접 시 C형 용가재를 사용하는 GTAW 공정은 GMAW 공정 및 Laser 용접 대비 용접선 이탈과 gap 변동에 대한 공정 강건성이 우수하였다.



참 고 문 헌

1) Ahsan, Md RU, et al. "A Study on the Effect of Wire Composition on Welding with Gap and Offset in Cold Metal Transfer (CMT) GMAW." *Journal of Welding and Joining* 36.5 (2018): 12-18.

2) Hyuk-Yong Kwon, Development of Super-TIG Welding Process to Improve Gap Bridging Ability in Sheet Welding, *The Korean Welding and Joining Society*, 2015

3) Mahadev Shome, Muralidhar Tumuluru, Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS): The Automotive Industry, Elsevier, Feb 25, 2015

4) Sang myung. Cho : Introducing Welding process, 2002, PP.16

5) MENDEZ, Patricio F.; NIECE, Krista L.; EAGAR, Thomas W. Humping formation in high current GTA welding. In: Proceedings of the International Conference on Joining of Advanced and Specialty Materials II. 2000. p. 151-158.

6) SHINOZAKI, Kenji, et al. Bead formation and wire temperature distribution during ultra-high-speed GTA welding using pulse-heated hot-wire. *Welding in the World*, 2011, 55.3-4: 12-18.

7) Dong-Soo Oh, The Characteristics of Arc Pressure Distribution and Application to High Speed Welding by He mixing in TIG Welding, Department of Mechanical Engineering, The Graduate School, Pukyong National University 2005

8) Dupont J. N., MARDER A. R., Thermal Efficiency of Arc Welding Processes, WELDING RESEARCH SUPPLEMENT, December 1995

9) Ebert-Spiegel M, Goecke SF, Rethmeier M, 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, International Institute of Welding, 2014

10) Sang-Myung Cho : A Study on the Bead Stability in High Speed TIG Welding. KOSME, 18-3(1994)

11) LAZZARIN, P.; LASSEN, T.; LIVIERI, P. A notch stress intensity approach applied to fatigue life predictions of welded joints with different local toe geometry. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003, 26.1: 49-58.

12) PARK, Hyoungh Jin, et al. The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66.5-8: 867-875.

13) MÜLLER, Alexander, et al. Laser beam oscillation strategies for fillet welds in lap joints. Physics Procedia, 2014, 56: 458-466.

14) MÖLLER, F., et al, Gap bridging ability in laser GMA hybrid welding of thin 22MnB5 sheets, Physics Procedia, 56, (2014), 620-629



학위과정 중 주요 학술지 게재 및 발표논문

1. 학술발표대회 발표논문

- 1) Super-TIG에 의한 STS 초박판 Lap Joint Fillet 용접 공정 개발, 대한용접접합학회, 추계학술발표대회, 2017. 11
- 2) Super-TIG에 의한 STS 400계 파이프의 고속 Lap Joint 필릿 용접 공정 개발, 대한용접접합학회, 춘계학술발표대회, 2018. 04
- 3) Super-TIG에 의한 Lap Joint Fillet 용접에서 Process 강건성 향상을 위한 연구, 대한용접접합학회, 추계학술발표대회, 2018. 04
- 4) TIG 아크 AM에서 일반 와이어와 C-필러의 오실레이션에 따른 용적 이행에 관한 연구, 대한용접접합학회, 추계학술발표대회, 2018. 11
- 5) Super-TIG 맞대기 용접의 루트패스에서 용접속도에 따른 변형에 관한 연구, 대한용접접합학회, 추계학술발표대회, 2018. 11

감사의 글

2016년 09월 용접프로세스 및 실험이라는 강의를 들으면서 담당 교수님이었던 조상명 교수님의 열정적인 강의와 산업현장의 묘사 등에 흥미를 느껴 Welding Process Lab.에 들어오게 되었습니다. 학부 4학년부터 석사 2년까지 약 3년의 시간동안 산업 현장 방문 및 현장 진단, 새로운 제품의 용접 공정개발, 학회 발표, 용접 전시회 준비 및 참가 등 다양한 경험을 할 수 있었습니다. 힘들었던 시간도 많았지만, 어떠한 연구를 하더라도 책임감을 가지고 열정을 다한다면 어떤 일이든 해낼 수 있다라는 생각을 가지게 되었습니다.

먼저, 저의 지도교수이신 조상명 교수님께 감사드립니다. 교수님의 지도를 받으면서 물론 용접에 관련된 지식 또한 많았지만, 교수님께 지도받은 가장 가치 있는 배움은 문제의 본질을 파악하는 능력과 문제 해결방식이라고 생각합니다. 또한 석사과정 동안 교수님께서 ‘상열이 너는 역대 연구실의 석사과정중 매우 뛰어난 편이다. 놓쳐서는 안 될 인재라고 생각한다.’ 라고 말씀해 주신적이 있습니다. 그 때 해주신 말씀 한마디가 저의 자존감을 더 높이고, 더 열심히 해야겠다는 마음을 가지게 하였습니다. 3년간 지도해주셔서 다시 한번 감사드리며, 석사과정을 마치고 취업을 하더라도, 조상명 교수님의 제자로서 부끄럽지 않은 용접 엔지니어로 거듭나겠습니다.

논문심사와 논문지도를 해주실 때, 언제나 편안하고 따뜻하게 대해주시고 학부과정때 부식, 방식, 비파괴 검사에 대해 가르침을 주신 이병우 교수님, 항상 인사를 반갑게 받아주시며 말을 걸어주셨던 서원찬 교수님, 용접공정이 전공인 저에게 용접야금학을 이해하기 쉽게 가르쳐 주셨던 방

국수 교수님, 논문을 작성함에 있어서 큰 틀과 방법에 대해 지도해 주셨던 임영수 교수님, 제 논문의 심사위원장이시며 학부과정 때 분말야금학과 재료에 대해서 지도를 해주신 이길근 교수님, 나노소재와 경사기능재료에 대해서 지도를 해주시고, 개인적으로 죄송스러운 마음이 큰 권한상 교수님께 진심으로 감사드립니다.

지금은 졸업하셨지만 지나가다가 무심히 한마디씩 던져주시며 실험의 기초를 알려주신 재규행님, 항상 유머스럽게 장난쳐주시면서 궁금한 내용을 질문하면 알려주시는 재호행님, 현대로템 과제하면서 힘들 때 과제 팀장으로써 이끌어주고, 더 논리적으로 생각하는 법을 알려주신 기정행님, 아침에 항상 커피한잔 마시면서 용접 퀴즈도 내주시고, 같이 삼성SDI 과제하면서 자료 찾는 노하우도 알려주고, 아이디어가 있을 때 같이 토론해주시는 정현행님께 감사드립니다.

학부시절부터 키포용접하면서 ‘이것이 밤샘연구다’ 라는 것을 알려주신 민구행님, 아무것도 모를 때 제가 해보고 싶다는대로 조건 바뀌가면서 랩조인트에 대해서 알려주신 문경행님, 항상 유머스럽고 선대 RA/TA 였던 경철행님, 때로는 엄격할 때도 있지만 항상 허드렛일 하나까지 술선수범해서 직접 알려주시던 영훈행님, 썰렁한 개그 많이 하던 성한행님께도 감사드립니다.

동기이자 한 살 많고 같이 토론할때마다 언성 높아지는 기범이형, 항상 배시시 웃고 다니면서 긍정과워 창민이, 내가 연구실로 영입해서 들어오자마자 밤샘 적층 맨날 같이하던 창익이, 싫은 말 안하고 모든일이든 항상 끝까지 도와주던 랩조인트 후계자 우현이, 내 다음으로 RA/TA하면서 고생도 많이 하고, 삼성 SDI 과제도 함께하면서 서포트 잘 해주는 성현

이, 손재주 좋아서 일잘하고, 요즘은 바빠보여서 보기좋은 효진이, 연구실 들어오자마자 밤샘 실험 군말없이 도와주던 경섭이, 주말에 불려도 웃으면서 도와주러 나오는 형창이, 연구실에 잘 적응해 나가고 있는 것 같아서 보기 좋은 재일이와 기홍이형까지 모두 연구실 생활하면서 즐겁게 연구할 수 있게 도와주셔서 감사합니다.

마지막으로, 지금까지 저를 믿고 항상 뒤에서 든든하고 마음편하게 해주시는, 정작 마음은 항상 자식 걱정하지만 내비치지 않고 묵묵히 응원해주는 존경하는 아버지, 밤샘 연구할 때마다 속상해하시며 진심으로 나를 걱정해주고 응원해주시는 내편 어머니에게 감사하고 사랑한다는 말씀드리고 싶습니다.

