



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

박관용접 겹 브리징 능력 향상을 위한
Super-TIG 용접 프로세스 개발



2015년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템 공학과

권 혁 용

공학석사 학위논문

박판용접 갭 브리징 능력 향상을 위한
Super-TIG 용접 프로세스 개발

지도교수 조 상 명

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2015년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템 공학과

권 혁 용

권혁용의 공학석사 학위논문으로 인준함

2015년 8월



주 심 공학박사 김 성 규 (인)

위 원 공학박사 권 한 상 (인)

위 원 공학박사 조 상 명 (인)

목 차

Abstract	iii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적 및 개요	3
제 2 장 이론적 배경	5
2.1 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)의 정의.....	5
2.1.1 GTAW의 원리	5
2.1.2 GTAW의 장단점	6
2.2 GTAW 용접기 및 재료	8
2.2.1 용접기	8
2.2.2 용접토치	11
2.2.3 전극봉 및 보호가스	12
2.3 플라즈마 스트림의 범선면 도출	14
2.3.1 플라즈마 스트림 이론 관점에서 본 Super-TIG	19
2.4 고장력 강판에서 gap 발생의 원인	21
2.5 험핑비드 부등식의 정의	22
2.6 Super-TIG lap joint 용접에서의 에너지 분포	24
제 3 장 T1.4 박판 Bead on plate(BOP) 전류 변경 실험	26
3.1 Super-TIG 전류 변경실험	26
3.1.1 실험 재료	26
3.1.2 실험 방법	28
3.1.3 실험 결과 및 고찰	31
3.2 GMAW 용착단면적 비교 실험	33

3.2.1 실험 재료	33
3.2.2 실험 방법	34
3.2.3 실험 결과 및 고찰	37
 제 4 장 Super-TIG 박판 lap joint 용접 조건 실험	38
4.1 박판 Super-TIG lap joint 전진각 변경 실험	38
4.1.1 실험 재료	38
4.1.2 실험 방법	39
4.1.3 실험 결과 및 고찰	42
4.2 Lap joint 전류증가 실험	44
4.2.1 실험 방법	44
4.2.2 실험 결과 및 고찰	45
4.3 Lap joint gap bridging 실험	47
4.3.1 실험 방법	47
4.3.2 실험 결과 및 고찰	49
 제 5 장 결론	55
 참고문헌	57

Development of Super-TIG Welding Process to Improve Gap Bridging Ability in Sheet Welding

Hyuk-yong, Kwon

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

Abstracts

In high speed sheet GMAW for automobile, welding failures take place, including burn-through, gap bridging fault, bead position fault, slag, spatter and arc start instability. In high speed welding, arc stability is an important factor for quality, and the arc may become unstable, even with a little change of the wire electrode, and if the arc stability becomes worse, welding failure rate, also, increases.

This study aims to develop and apply a new welding process, suitable for high-speed welding for sheet using Super-TIG welding. Super-TIG welding uses a non-consumable electrode, and the arc is separated from the feed, so it has excellent arc stability. In addition, it uses C-type filler metal, So it has a high deposition rate and is suitable for high-speed welding. Super-TIG welding does not generate spatter and slag, so it can get clean, uniform beads. It can also extend the width of the filler metal significantly larger than the wire of common metal, so it has a big gap bridging ability. Using these characteristics, the applicability of Super-TIG welding to the sheet welding process was examined.

Key Words : GTAW, TIG, High speed welding, Super-TIG, High current,
Shield gas, Humping bead, Under cut, Deposition rate



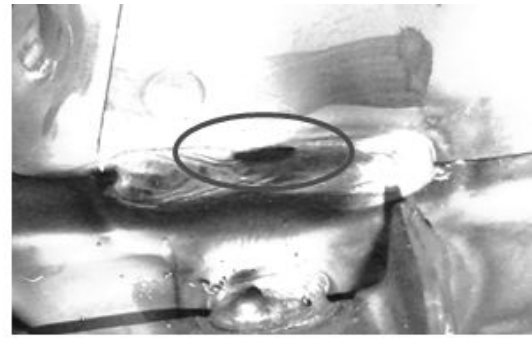
제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

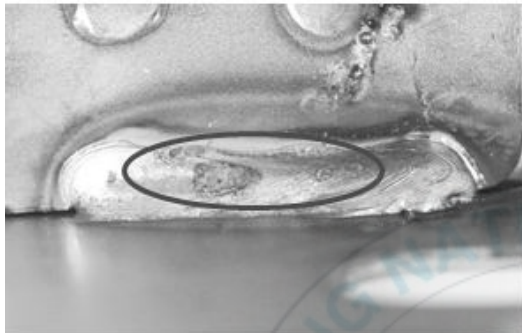
최근의 자동차 산업은 연비규제, 안정성 확보에 대한 판매 규제가 강화되면서 가벼우면서도 고강도강 판재의 사용이 많아지고 있다.¹⁾ 고강도강판은 높은 항복강도로 인해 소성가공 후 Springback 현상이 발생하게 되고²⁾, 이를 이용해 lap joint, butt joint등으로 용접하면 갭이 발생하게 된다. 박판 GMAW에서 갭을 브리징하기 위해서는 용착단면적을 증가시켜야 하는데 생산성 감소 없이 용착단면적을 증가시키기 위해서는 높은 전류가 필요하게 된다. 하지만 높은 전류로 인해 입열량이 커지고 용락 발생의 위험이 높아진다³⁾. 그리고 GMAW에서 발생한 스파터가 강판에 부착되면 페인팅 품질저하의 원인이 되며 아연도금강판에서 스파터로 인해 아연도금층이 손상될 수 있다. 페인팅 품질을 저하 시키는 또 다른 원인으로 비드표면에 붙은 산화물 슬래그가 있는데 슬래그는 비드 표면에 붙어 잘 떨어지지 않고, 페인팅이 완료된 후 슬래그가 떨어지며 페인트층 손상을 일으키게 되고 결국 부식을 일으키는 원인이 된다. Fig. 1.1(a)는 제품 표면에 붙은 과도한 스파터를 나타내고 있으며 Fig. 1.1(b)는 갭이 발생한 부위에 용접을 진행한 결과 발생한 용락 Fig. 1.1(c)는 비드 표면에 발생한 산화물 slag를 나타내고 있다. Fig. 1.1(d)는 과도한 갭으로 인해 비드 브리징이 제대로 되지 않은 것을 보여준다.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.1.1 Problems in sheet GMAW (a)spatter, (b)burn through, (c)bead surface slag, (d)bead bridging failure

1.2 연구 목적 및 개요

자동차용 고강도강판의 용접에는 GMAW를 주로 사용하는데 스패터와 용접 흠 등으로 인해 용접작업환경이 악화된다. 스패터와 용접 흠이 발생하지 않고 비드표면 슬래그가 없는 청정한 용접을 하기위해 TIG 용접을 사용할 수 있지만 기존의 Cold TIG 용접은 Fig.1.2에 나타난 바와 같이 용착속도가 최대 1Kg/hr로 생산성이 매우 낮고 고속용접을 사용하면 언더컷이나 험핑비드 등의 용접결함이 발생할 수 있다. TIG의 청정한 용접이라는 장점을 유지한 채로 낮은 생산성 문제를 해결하기 위한 방법으로 용가재 형상을 직사각형의 flat type strip으로 변경하여 아크의 열유속을 크게 받도록 변경시켜 생산성 향상을 도모한 선행 연구가 이루어진 바 있다. 여기서 더 나아가 플라즈마 스트림 이론을 적용하여 strip을 곡면으로 구부린 C-type 필러가 고안되었으며 동일 용접조건에서 flat type strip보다 용착속도가 증가하여 생산성 증대가 이루어졌다. 위와 같은 C-type 필러를 사용하는 TIG용접을 Super-TIG용접이라 하며 본 연구는 Super-TIG용접을 통해 스패터가 없는 청정한 비드를 가지면서도 아크압력으로 인한 험핑비드와 언더컷의 발생을 감소시켜 고속용접에 적합한 특징을 가지는 Super-TIG 용접법을 자동차용 lap joint, butt joint, T joint 등에 적용하여 생산성 향상과 함께 깨끗한 작업환경을 유지할 수 있는 공정의 개발 연구를 진행하게 되었다.

박판용접에 Super-TIG를 적용하기 위해 박판 bead on plate 적정 전류테스트를 진행하고 실제 lap joint에 적용하여 갭의 크기에 따른 갭브리징 능력을 실험을 통해 확인하였다.

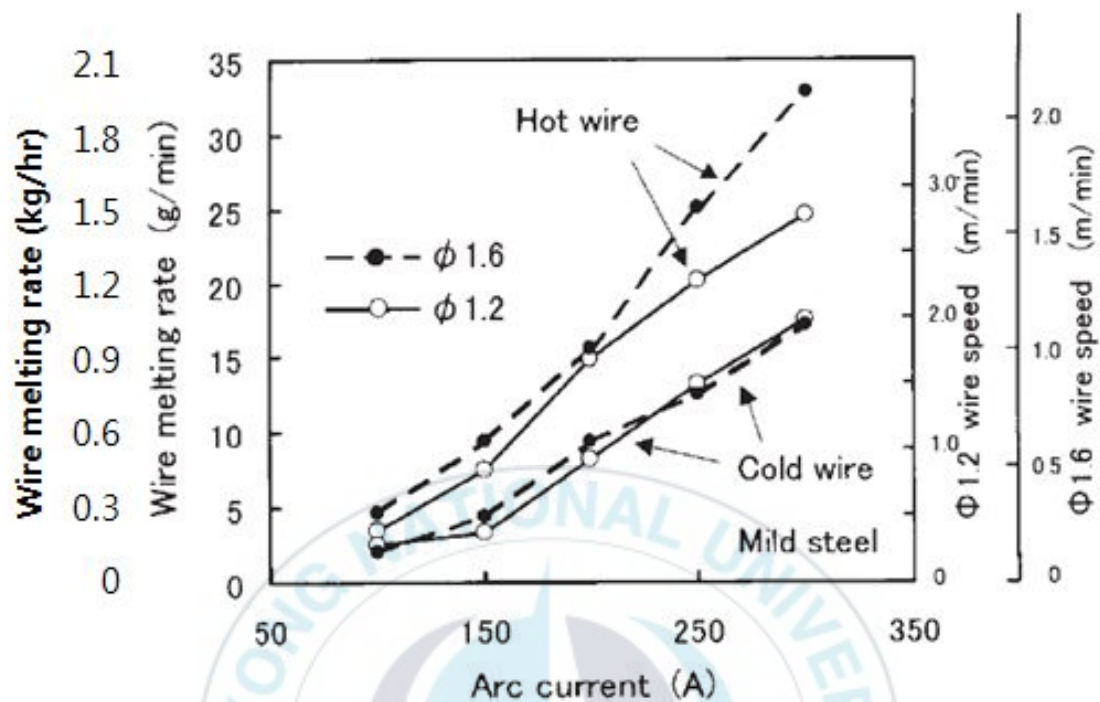


Fig.1.2 Typical welding conditions for two-handed semi-automatic hot wire TIG welding

Table.1.1 Welding condition of TIG field welding (arc length 3~5mm)

Wire	Φ 1.2mm / 330cpm
전류(A)	280
전압(V)	12
입열량(J/cm)	9,164
용착금속 용융효율(%)	15.27
용착금속1g당 입열량(J/g)	6,932

제 2 장 이론적 배경

2.1 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)의 정의

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

2.1.1 GTAW의 원리

GTAW는 비소모성 텅스텐 용접봉과 모재간의 아크열에 의해 모재를 용접하는 방법으로서 Fig. 2.1과 같이 용접부 주위에 불활성 가스(Ar, He)를 보호가스로 사용하면서 용접하는 것이다.⁴⁾

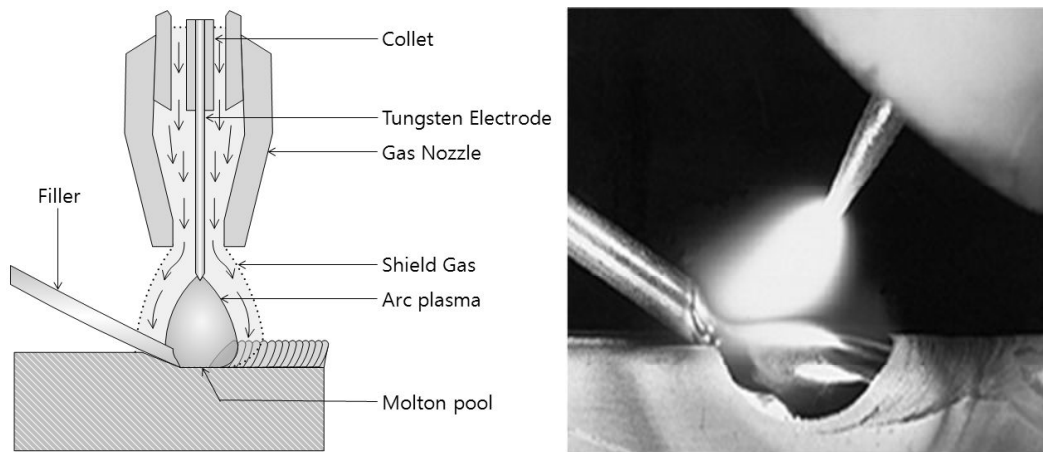


Fig. 2.1 Schematic of GTAW

2.1.2 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

TIG 용접은 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 높은 가격이다.
- 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 있으며 핫와이어의 경우 와이어 저항 발열장치가 추가된다.

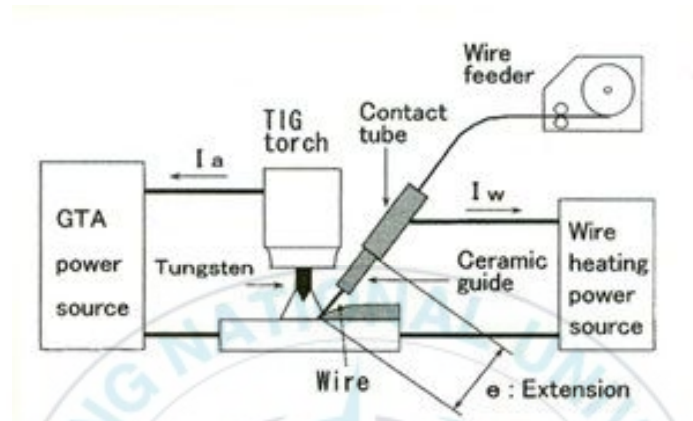


Fig. 2.2 Schematic diagram for hot wire GTAW

2.2.1 용접기

현재 사용되고 있는 TIG 용접기 전원은 정전류 특성인 AC 또는 DC이다. 이때 AC 또는 DC 전원의 선택은 요구되는 용접 특성 및 모재의 재질에 따라 좌우된다. 예를 들어 Al합금과 같은 금속은 AC 전원으로 보다 쉽게 용접되는 반면에, Al합금이외의 대부분의 금속은 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)

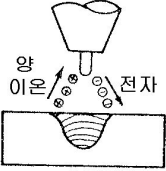
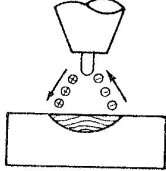
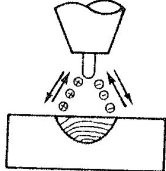
거의 사용하지 않고 특수한 경우 Al, Mg 등의 박판용접에 사용한다.

- 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 Fig. 3.8과 같이 용입이 얇고, 비드폭이 넓다.

3) 교류(AC)

- ① 고주파 전원을 첨가하여 사용한다.
- ② 용입과 비드폭은 DCEN과 DCEP의 중간이다.

Table 2.2 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	얕고 넓다	중간
용 도	대부분 금속의 용접	박판 용접	Al, Mg

③ 청정작용은 DCEP일 때의 반 정도가 일어난다.

2.2.2 용접토치

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

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

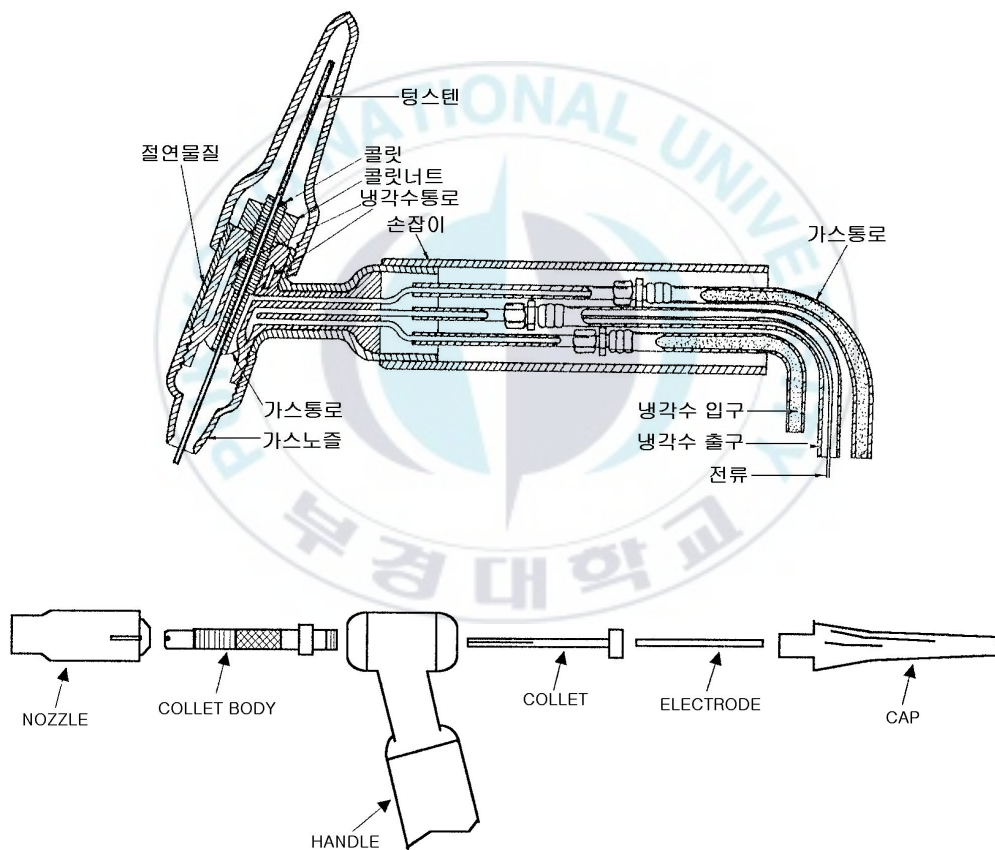


Fig. 2.3 Sectional view for TIG welding torch

2.2.3 전극봉 및 보호가스

1) 전극봉

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

Table 2.3은 텅스텐 종류에 대한 특징과 사용전원을 나타내고 구분은 보통 텅스텐 전극의 끝단의 색으로 구분할 수 있다.

Table 2.3 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 부품 같은 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 2.4와 같다.

Table 2.4 Characteristic of Ar and He

특징	아르곤(Argon)	헬륨(Helium)
열적 핀치력	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 플라즈마 스트림의 법선면 도출

TIG Arc Plasma Stream은 용가재의 표면에 법선 방향으로 충돌했을 때 용가재에 투입되는 열량이 가장 높다.

따라서 Fig.2.8과 같이 Strip 형상을 곡면으로 하면 용가재의 투입열량이 증가할 것으로 판단된다. 여기서 Strip이 가지는 곡률은 아크 플라즈마 스트림 라인의 법선면된다.

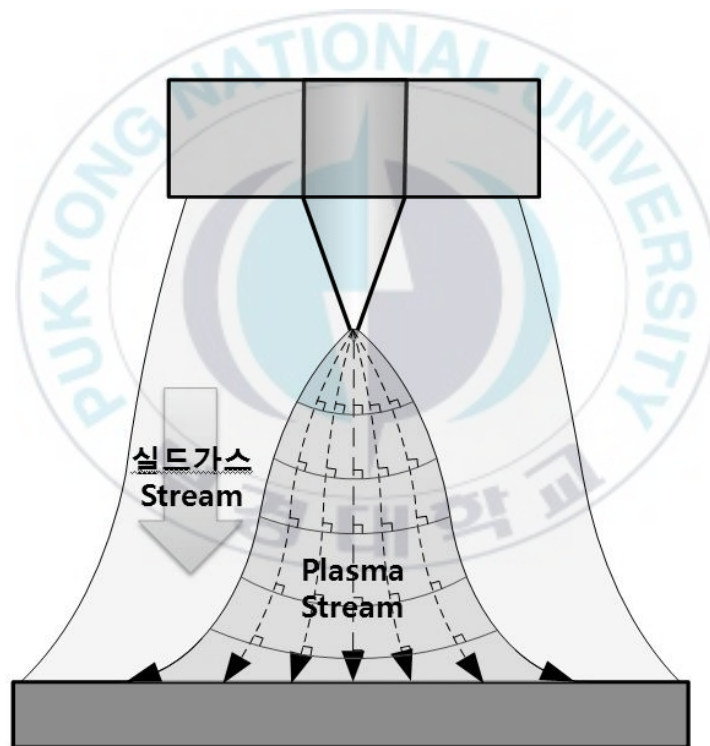


Fig. 2.8 TIG arc model by theory of plasma stream

다음은 아크 플라즈마의 형상을 함수로 표현하였다. 아크는 아래의 Fig.2.9와 같은 그래프와 같은 가우시안 분포형태를 가진다고 가정하면

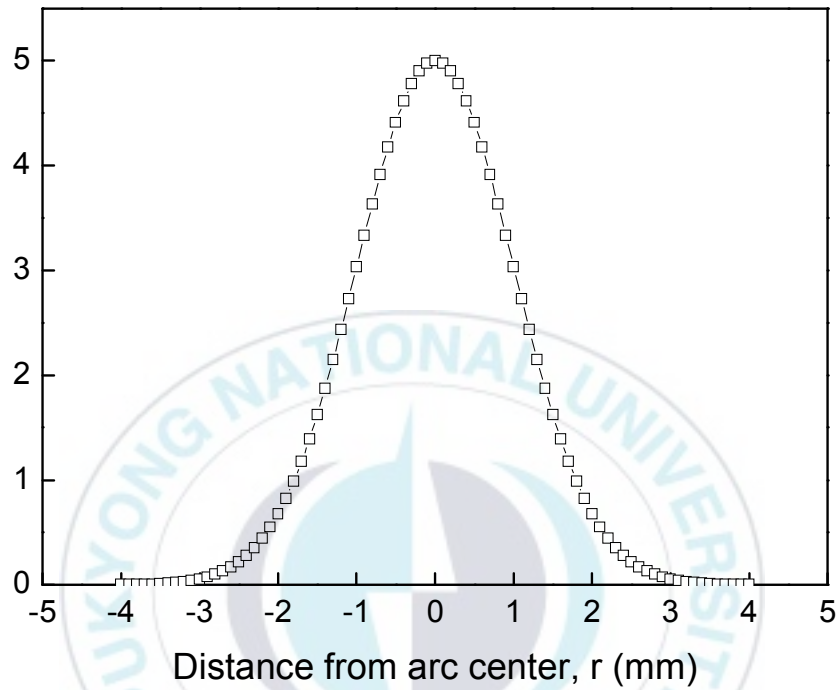


Fig. 2.9 Functional schematic of arc plasma

아래 (2.1)와 같은 식이 나오게 되고 이때 $f(r)$ 값은 아크 표면의 높이가 된다.

$$f(r) = f_{(0)} e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)} \dots\dots\dots (2.1)$$

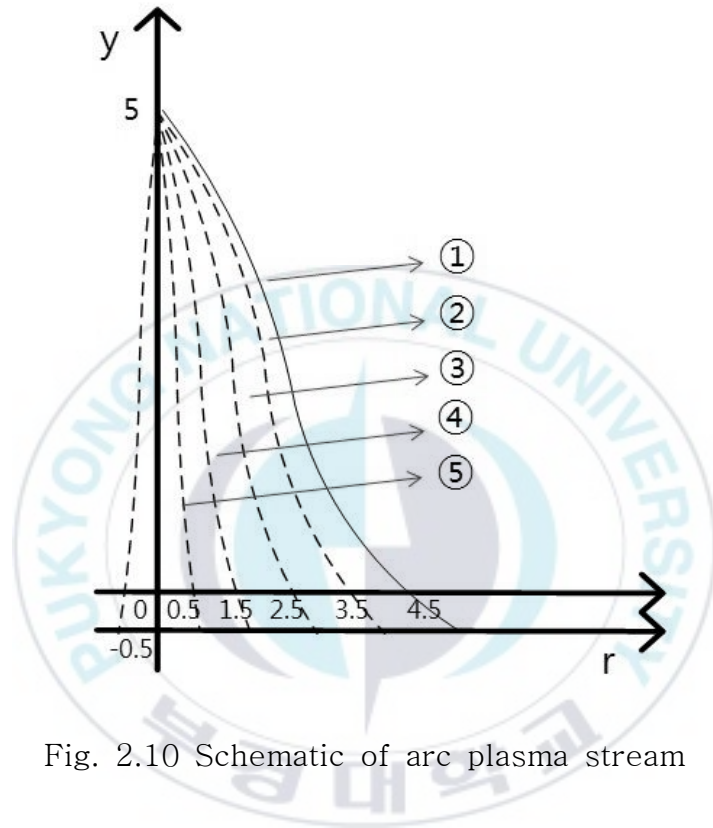


Fig. 2.10 Schematic of arc plasma stream

다음은 아크 플라즈마 스트림의 함수에 Fig. 2.10의 스트림 라인 모식도의 라인의 최댓값에 맞추어 $f(0)$ 값을 조절하고 $y=0$ 일 때 r 값이 각각의 스트림 라인의 값에 맞도록 σ 값을 변경하였고 그 값은 Table 2.5과 같으며 그 함수를 Fig. 2.11에 그래프로 표시해보았다.

Table 2.5 F(0) value and σ value of stream line

Stream line	f(0) Value	σ Value	Equation
①	5.5	1.43	$f(r) = 5.5e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)}$
②	5.5	1.27	$f(r) = 5.5e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)}$
③	5.5	1.07	$f(r) = 5.5e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)}$
④	5.5	0.83	$f(r) = 5.5e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)}$
⑤	5.5	0.48	$f(r) = 5.5e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)}$

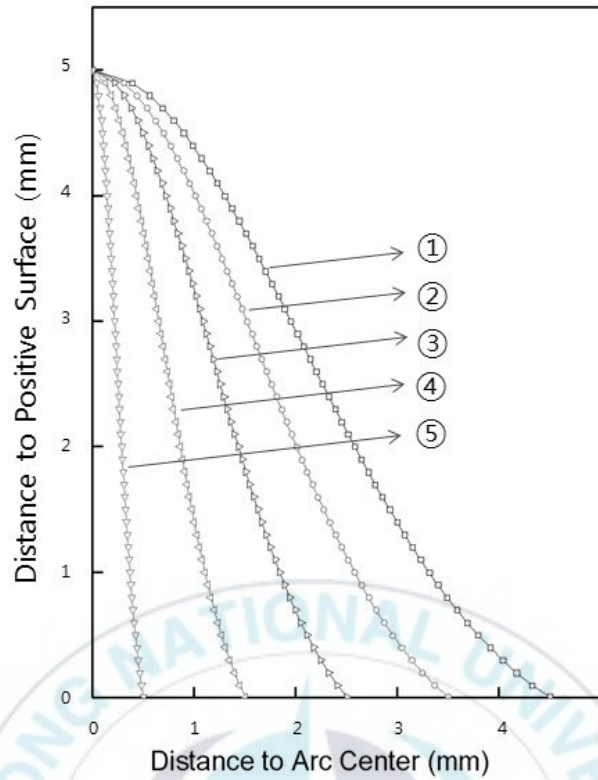


Fig. 2.11 Functional schematic of stream line in arc plasma

다음은 플라즈마 스트림라인의 각 좌표에서 법선 방정식을 계산하고 y축과 ⑤번 스트림라인의 법선 방정식의 교점을 계산한다. 그리고 y축과 ⑤번 스트림라인 사이의 같은 거리를 만족하는 좌표를 계산하고 위의 과정을 ⑤ → ④ → ③ → ② → ① 순서로 각 스트림라인 사이의 같은 거리를 만족하는 좌표를 획득한다. 이후 각 스트림라인의 법선 방정식의 좌표와 스트림라인 사이의 점을 연결하면 Fig. 2.12과 같은 아크 플라즈마 스트림라인의 법선면이 나오게 된다. Table 2.6은 각 스트림라인에서 계산된 법선 방정식이다.

Table 2.6 Equation of normal in stream line

Stream line	법선 기울기	법선 절편	법선 방정식
①	1.55	1.88	$y=1.55x+1.88$
②	1.26	1.81	$y=1.26x+1.81$
③	1.52	1.47	$y=1.52x+1.52$
④	2.25	0.82	$y=2.25x+0.82$
⑤	6.25	0.18	$y=6.25x+0.18$

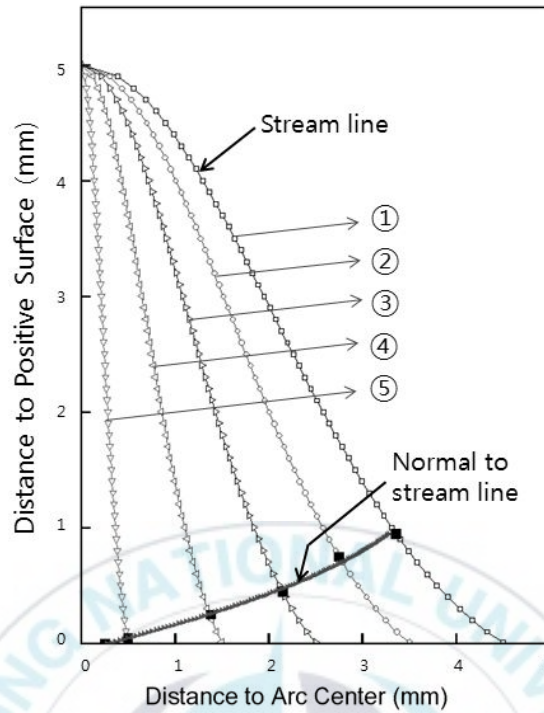


Fig. 2.12 Normal face to stream line

2.3.1 플라스마 스트림 이론 관점에서 본 Super-TIG

Fig.2.13는 Plasma stream 이론의 관점에서 본 wire와 C-type 필러의 차이를 나타내고 있으며 wire는 표면이 불록하기 때문에 plasma stream 입사가 곤란하고 입사면적이 작으나 C-type 필러는 Plasma stream이 표면전체에 직각으로 입사되어 C-type 필러의 용융효율을 극대화 할 수 있는 것을 나타내고 있다. Dong-Soo Oh 등의 연구에 따르면 TIG 용접에서 아크 중심부에서 아크압력이 가장 높는데⁵⁾ C-type 필러를 사용하면 이 최대아크압력을 filler가 받아내기 때문에 용입이 깊지않고 아크압력으로 인해 발생하는 험핑비드를 방지하는데도 효과적이다.

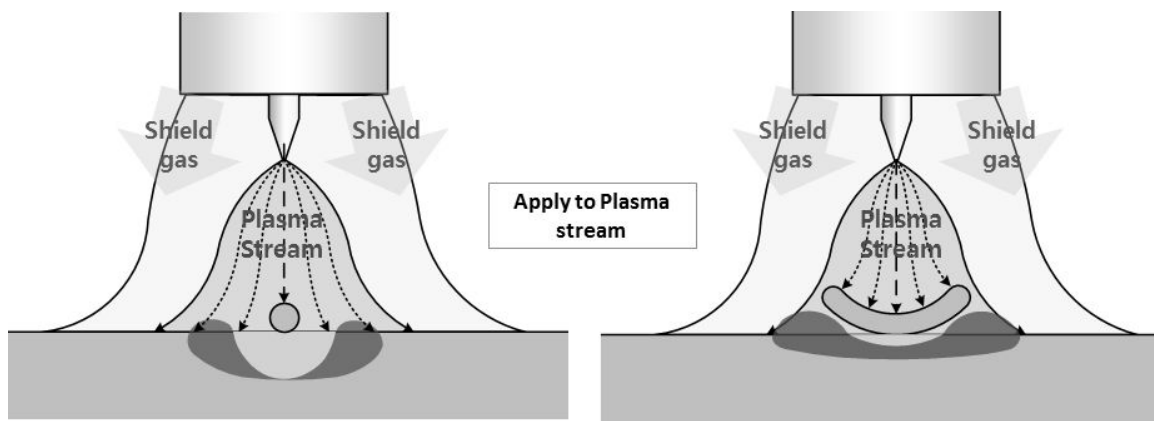


Fig.2.13 Incident plasma stream on wire and C-type filler
by theory of plasma stream



2.4 고장력강판에서 gap 발생의 원인

자동차 산업에 사용되는 고장력강판 및 초고장력강판은 인장강도가 높고 연신율이 낮은 특성을 가지고 있다. 이런 고장력강을 성형하게 되면 박판이 금형에 의해 강제적으로 변형을 겪은 후 금형으로부터 이탈되었을 때 박판 내부의 응력이 정적 평형상태를 유지하기 위해 탄성적으로 재편되는데 이 현상을 Spring back 이라 한다⁶⁾. Fig 2.14와 같이 성형을 완료한 후 Spring back이 발생하면 설계된 치수와 달라져 공차가 발생하게 되고 용접이음부에서 갭이 발생하게 된다. Spring back을 일으키는 변수가 많기 때문에 일정한 갭을 얻기가 힘들다.



Fig. 2.14 Generation of spring back in high strength steel

2.5 험핑비드 부등식의 정의

아크용접에서 생산성을 향상시키기 위해서는 용접속도를 높이고 전류를 증가시켜야 하지만 험핑비드의 발생으로 인해 이러한 생산성의 향상에 제약이 생기게 된다. Fig. 2.15와 같이 전류와 용접속도가 증가하면 험핑비드의 발생 또한 증가하게 된다⁷⁾.

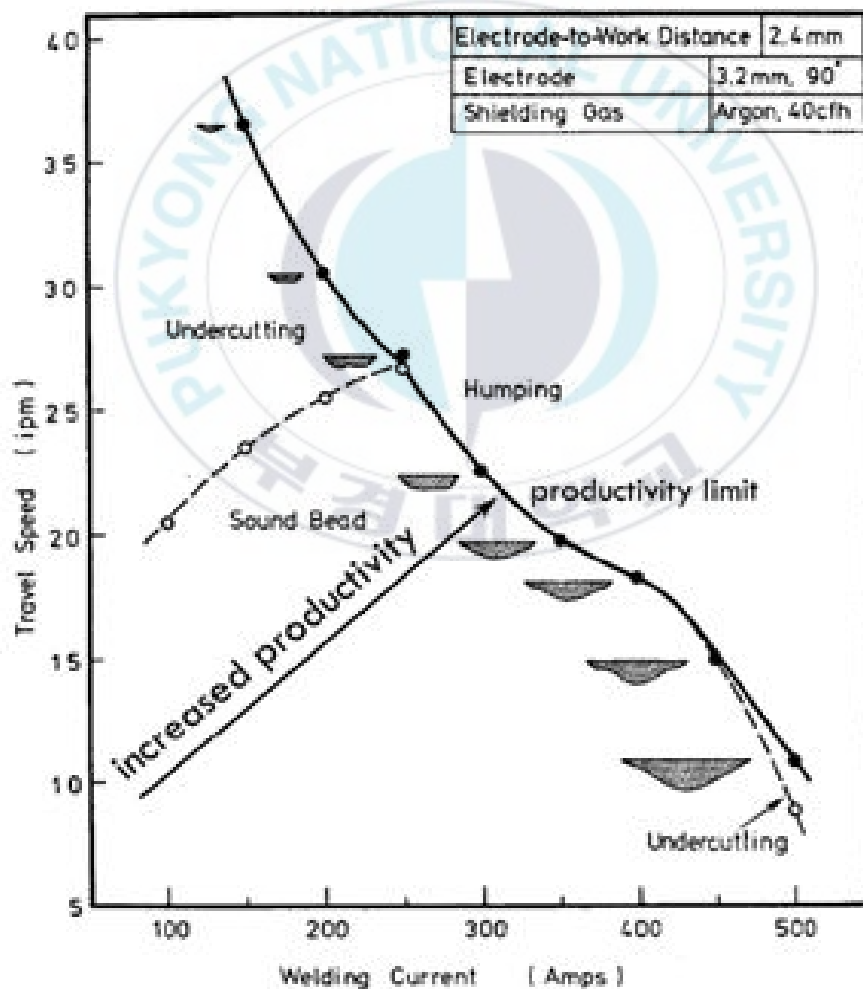


Fig.2.15 Process map for GTAW at atmospheric pressure⁷⁾

험핑비드는 Fig. 2.16과 같이 압입깊이 D_{DP} 와 용융풀깊이 D_{MP} 의 관계에 의해 발생한다. D_{DP} 가 D_{MP} 보다 크거나 같으면 용융풀이 밀려나 fusion line이 드러나게 되고 용융풀이 채워지지 못하게 되어 험핑비드가 발생한다. 이것은 식(2.2)와 같은 부등식으로 나타낼 수 있으며 이 식을 험핑비드 부등식이라 한다. 여기서 $D_{MP}=0$ 이 되면 융합불량(LF, Lack of fusion)이 발생한다.

$$D_{DP} \geq D_{MP} \quad (2.2)$$

D_{DP} : Depth of Depression

D_{MP} : Depth of Molten pool

* $D_{MP}=0$: Lack of fusion

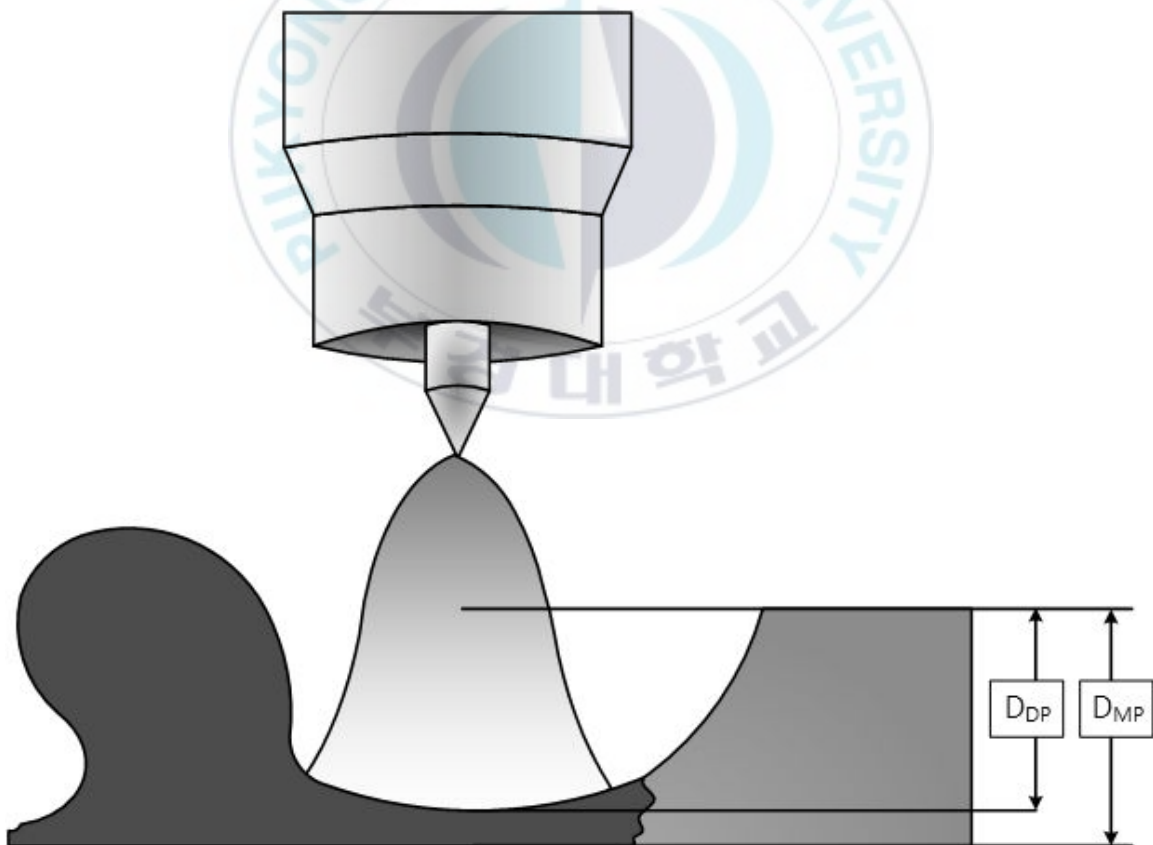


Fig 2.16 Schemetic of humping bead formation

2.6 Super-TIG lap joint 용접에서의 에너지 분포

J. N. DuPONT 등의 연구에 따르면 TIG 용접에서 전체 에너지는 E_{arc} 와 $E_{electrode}$ 로 나누어 구분하고 이렇게 발생한 에너지는 손실된 에너지와 모재로 투입되는 에너지 그리고 모재로 전도된 에너지의 합과 같다⁸⁾. M. Ebert-Spiegel 등은 이를 GMAW lap joint에 적용하였는데⁹⁾ 이를 Super-TIG에 적용하면 Fig. 2.17과 같다.

Fig. 2.17에서 손실된 에너지는 전극봉을 냉각시키며 손실되는 에너지 Q_{ELoss} , 아크에서 대기중으로 복사와 전도로 인해 손실되는 에너지 Q_{ALoss} 로 나누어지며 모재로 입열되는 에너지는 모재입열량 Q_{BM} , 용가재입열량 Q_{FM} 으로 나뉘어진다. Lap joint에서는 모재입열량 Q_{BM} 을 상판입열량 Q_{BMU} 와 하판입열량 Q_{BML} 로 나눌 수 있다.

박판 lap joint 용접에서 전극팁이 상판 모서리에서 일정한 거리를 유지하며 용접하면 상판입열량은 일정하다. 이 때 송급되는 용가재의 양이 많아지게 되면 용가재입열량이 많아지므로 하판입열량은 줄어들며 하판용입이 감소하고 융합불량 발생이 커진다.

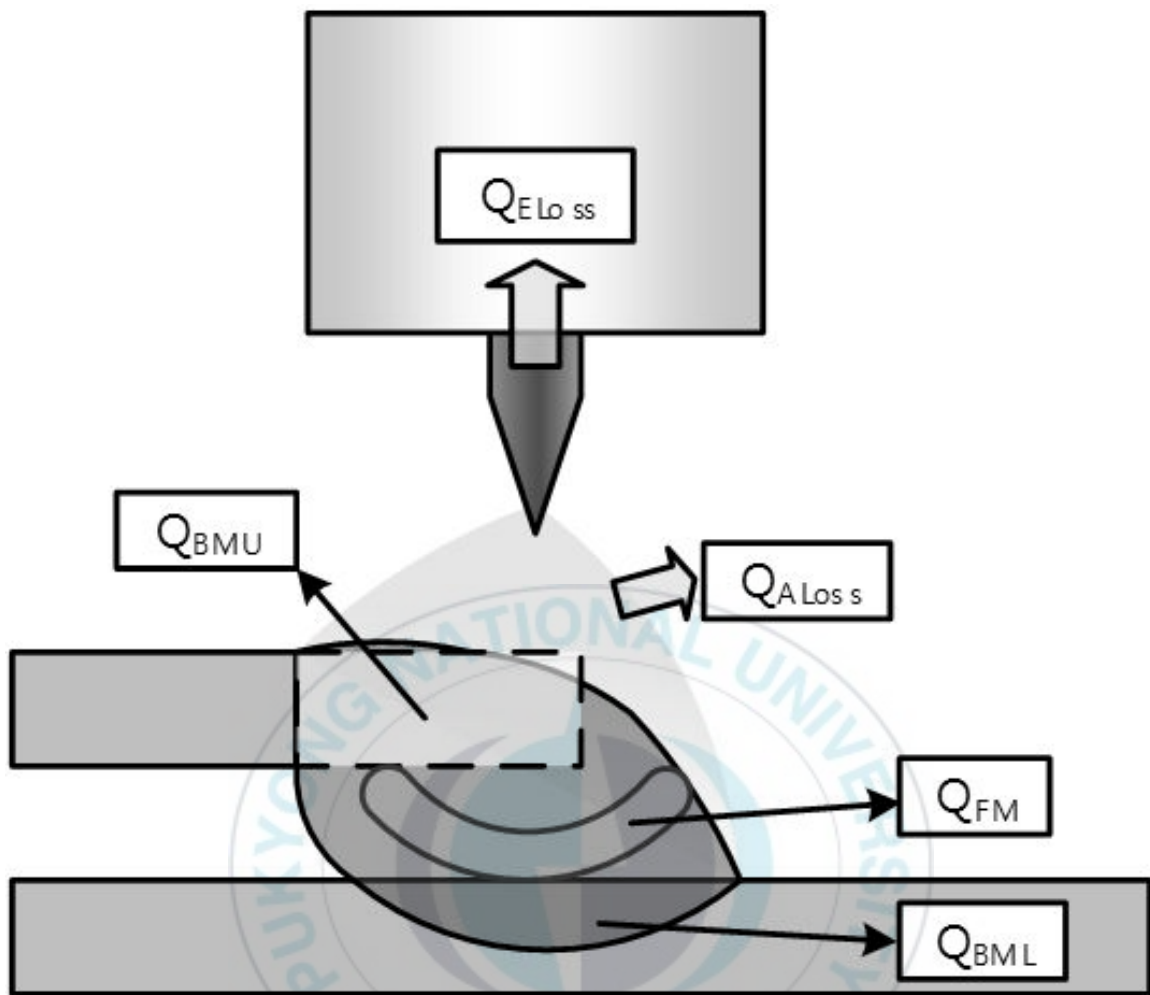


Fig. 2.17 Schematic principle of the energy distribution
in lap joint welding process

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

Q_{BMU} : 상판입열량

Q_{FM} : 용가재입열량

Q_{BML} : 하판입열량

Q_{ELoss} : 전극봉손실에너지

Q_{ALoss} : 아크손실에너지

제 3 장 T1.4 박판 Bead on plate(BOP) 전류 변경 실험

3.1 Super-TIG 전류 변경 실험

3.1.1 실험 재료

본 실험에서 모재는 Fig 3.1의 길이 130mm, 폭 40mm, 두께 1.4mm인 SPFC 590MPa 고장력강판을 사용하였으며 용가재는 단면적 6.6mm^2 ER 316L C-type 필러를 사용하였다. C-type 필러 단면 형상은 Fig.3.2에 나타나 있으며 모재의 조성은 Table 3.1에 나타내었다. 실드가스는 Ar 90%에 He 10%를 혼합했고 20L/min의 유량으로 설정하였다.

Table 3.1 Chemical composition of base metal

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
SPFC 590	0.09	0.25	1.6	0.03	0.003	-	-	-

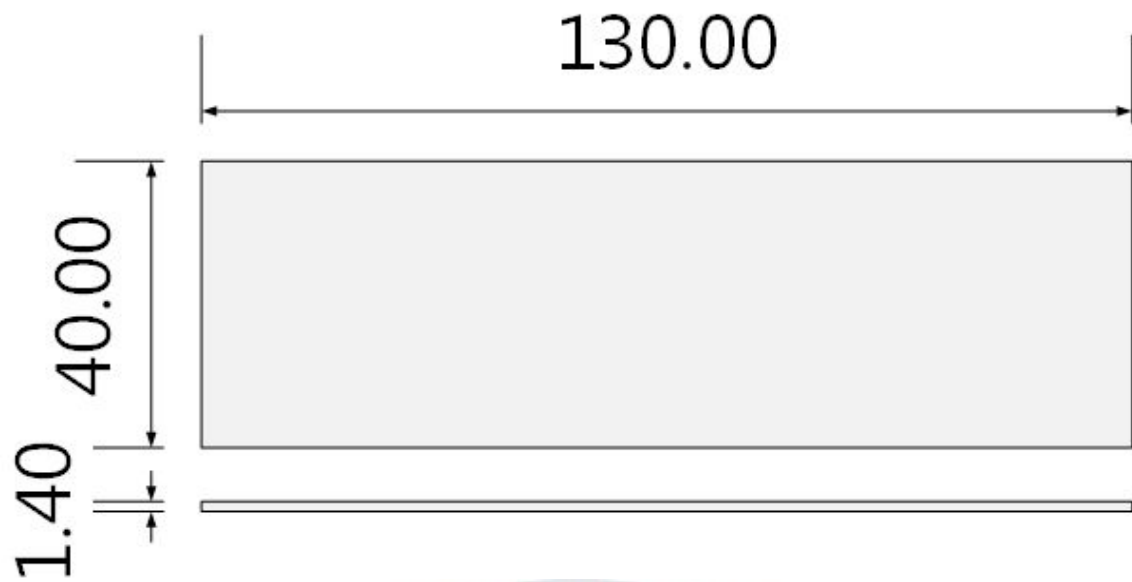


Fig.3.1 Design of SPFC590MPa high strength steel sheet

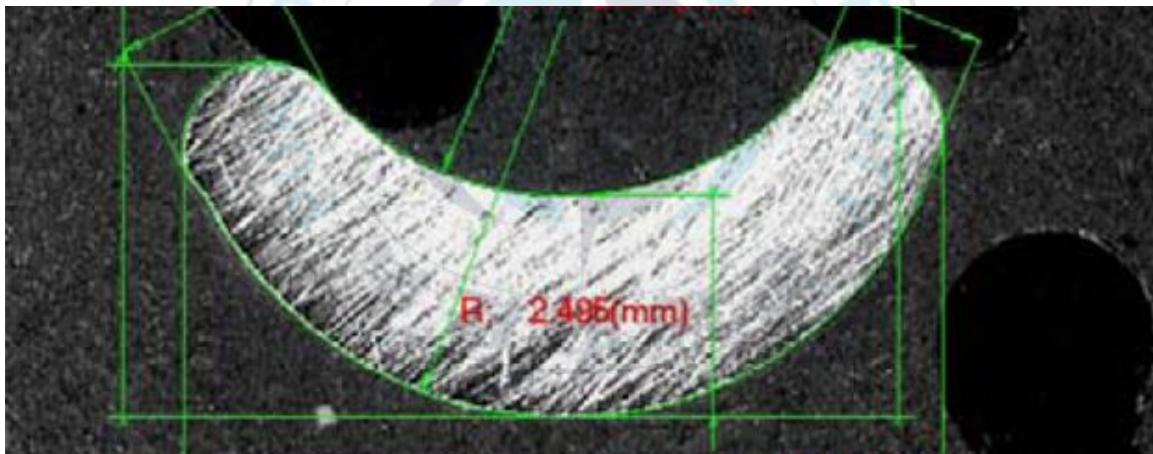


Fig.3.2 Cross section of C-type filler

3.1.2 실험 방법

Jung Hyun Park 등이 Super-TIG를 이용한 고속용접 선행 연구를 진행한 바 있는데¹⁰⁾ 용접속도 100cm/min의 고속용접을 진행하기 위해 실드가스로 Ar 70%에 He을 30% 혼합 사용하여 언더컷, 험핑비드 없는 정상적인 비드를 형성하였다. 본 실험에서는 He의 양을 10% 첨가하여 용접원가를 감소시켰다. 모재인 SPFC 590 고장력강판을 테이블에 고정하는데 용락발생 유무를 확인하기 위해 테이블과 모재사이에 갭이 10mm 발생하도록 한다. TIG토치는 아래보기 자세를 유지하며 전극팁 중심과 C-type 필러의 중심이 일치하여 C-type 필러가 아크 중심으로 공급되도록 설치한다. 용접속도는 100 cm/min으로 설정하였다. 200A 이상의 대전류 고속용접에는 선단절단전극을 쓰는 것이 유리하므로 선단절단전극을 사용하였다¹¹⁾. Table 3.2는 박판 Super-TIG BOP 용접 조건을 나타내었다. 실험에서 사용된 용접 전원은 Fig.3.3의 Powwel DC TIG 600EP이고 Fig.3.4의 Super-TIG system을 사용하여 용접을 진행했다.



Fig.3.3 Powel DC 600EP

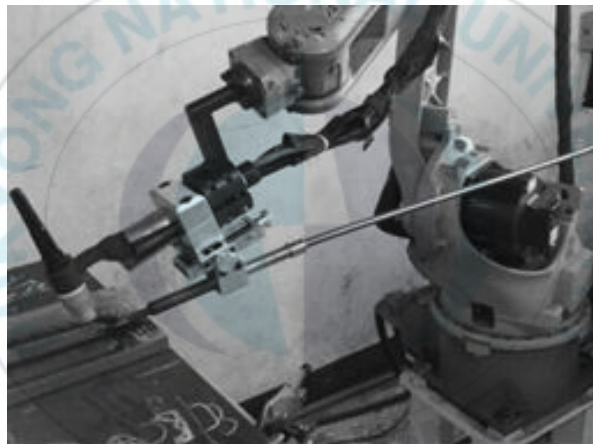


Fig.3.4 Super-TIG system

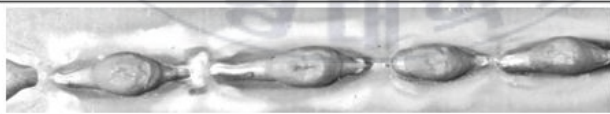
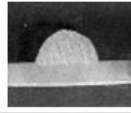
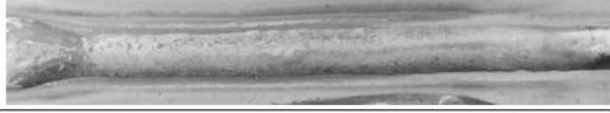
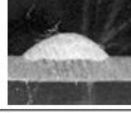
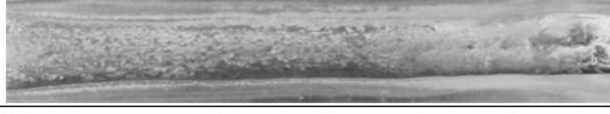
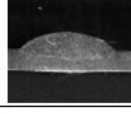
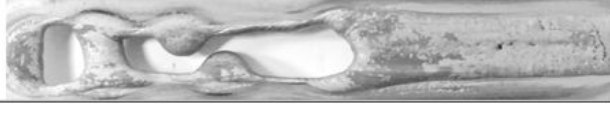
Table 3.2 Welding condition for Super-TIG welding
with bead on plate test

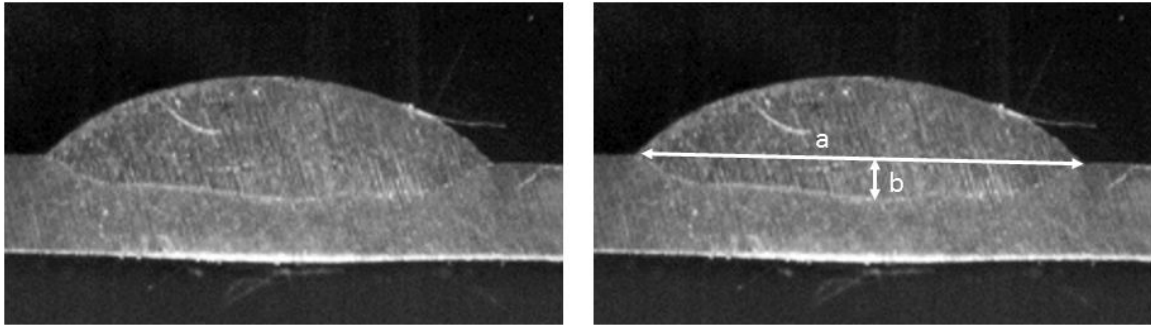
Fixed	Base metal	SPFC 590 t1.4				
	Current (A)	350				
	Filler metal	ER 316L				
	Strip cross section area (mm ²)	6.6				
	Feed rate (cpm)	120				
	Welding speed (cpm)	100				
	Deposition area (mm ²)	7.9				
	Deposition rate (kg/hr)	3.8				
	Shield gas	Ar + He 10% , 20L/min				
Variable	Current (A)	200	250	300	350	400

3.1.3 실험 결과 및 고찰

Table 3.3은 Super-TIG BOP 용접에서 용접속도를 100cm/min으로 유지하면서 전류변화에 따른 비드외관과 용입을 나타내었다. 전류를 200, 250, 300, 350, 400A로 변경하며 실험을 진행한 결과 200A에서 모재가 녹지 않아 용합불량이 발생하여 제대로 된 측정이 불가능 하였고, 250A에서는 좁고 볼록한 비드가 만들어졌으며 낮은 전류로 인해 0.14mm의 용입을 나타내었다. 300A와 350A에서 적정 비드외관을 가지며 350A에서 더욱 안정적인 용입을 나타내었다. 400A의 전류로 용접했을 때 용락이 발생하여 측정에서 제외하였다. 용입측정은 Fig. 3.5와 같이 모재표면에서 Fusion line까지의 최대 깊이로 측정하였다. Fig 3.6에서 확인할 수 있듯이 전류 증가에 따라 용입이 깊어진 것을 알 수 있다. 용접 중 스패터와 비드표면 슬래그는 발생하지 않았다.

Table 3.3 Bead appearance and cross section with bead on plate by Super-TIG

Current	Bead Appearance	Cross Section/ Penetration
200A		LF
250A		 0.14mm
300A		 0.30mm
350A		 0.67mm
400A		Burn through



Symbol	Meaning	
a	Bead width	비드의 fusion line - fusion line 연결선의 길이
b	Penetration	모재표면부터 fusion line까지의 최대 깊이

Fig.3.5 Measurement of penetration

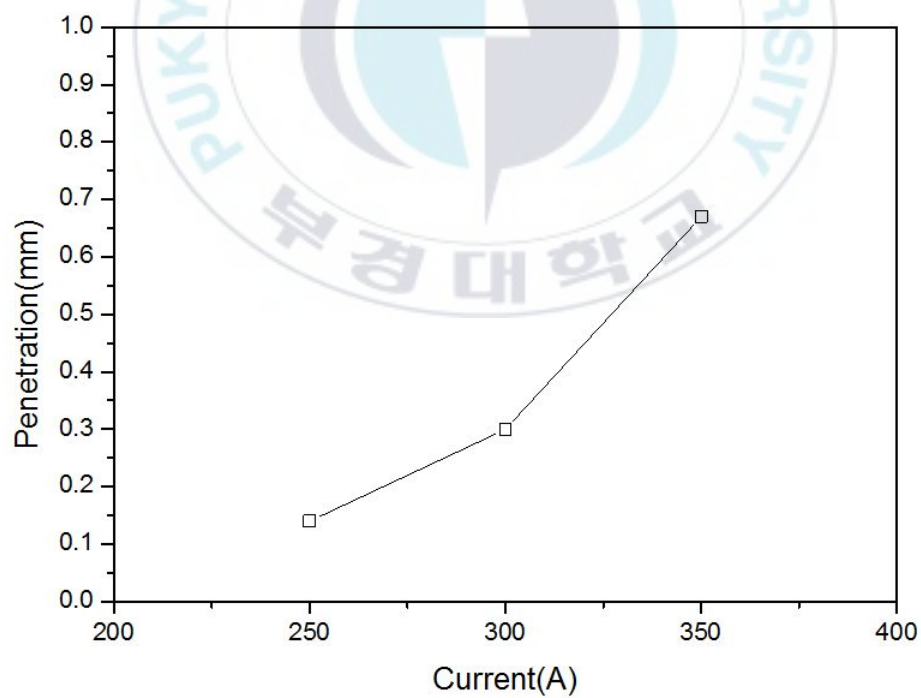


Fig.3.6 Penetration by current in bead on plate test

3.2 GMAW 용착단면적 비교 실험

3.2.1 실험 재료

본 실험에서는 모재는 Super-TIG BOP 실험과 동일한 SPFC590 고장력강판을 사용하였다. 용접용 와이어는 ER70S 연강용 와이어를 사용했으며 화학조성은 Table 3.4에 나타내었다.

Table 3.4 Chemical composition of filler wire

wt%

품명	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
ZO-28	0.08	0.50	1.05	-	-	-

3.2.2 실험 방법

SPFC 590 소재의 고장력강판이 테이블에 고정되는데 박판 Super-TIG 전류 변경 실험과 마찬가지로 모재와 테이블 사이에 갭이 10mm 유지되도록 고정시켜 용락발생 유무를 관찰하였다. 용접 토치는 HP20 로봇에 고정되어 아래보기 자세로 위치한다. 팬던트 설정에 의해 자동으로 용접을 진행하며 사용된 용접전원은 Fig. 3.7의 Fronius TransPuls Synergic 7200이다. Fig. 3.8의 GMAW 모니터링 시스템으로 전류를 측정하였다. 박판 Super-TIG BOP 실험과의 비교를 위해 동일 용착단면적인 7.9mm^2 로 실험을 진행하였다. GMAW의 용가재는 직경 1.2mm의 ER70S 소재를 사용하였고 GMAW는 송급속도에 의해 전류가 결정되므로¹²⁾ 용착단면적인 7.9mm^2 를 맞추기 위해 송급속도 720cm/min을 사용하였고 이 때 측정된 전류는 279A이다.



Fig. 3.7 Fronius TransPuls Synergic 7200



Fig 3.8 GMAW Monitoring System

Table 3.5 Welding condition for GMAW with bead on plate test

Fixed	Base metal	SPFC 590 t1.4
	Current (A)	279
	Filler metal	ER70S ø1.2
	Wire cross section area (mm ²)	1.1
	Deposition rate (kg/hr)	3.8
	Feed rate (cpm)	720
	CTWD (mm)	12
	Welding speed (cpm)	100
	Shield gas	Ar + CO ₂ 10% , 20L/min
Variable	Welding Speed (cpm)	100
	Deposition area (mm ²)	7.9

3.2.3 실험결과 및 고찰

Super-TIG와 GMAW의 생산성을 비교하기 위해 진행된 이번 실험은 Table 3.5에서 알 수 있듯이 GMAW는 Super-TIG와 같은 용접속도 100cm/min에서 용착단면적인 7.9mm^2 를 가지기 위해 전류 279A가 필요했고 이 전류에서 용접속도에 관계없이 용락이 발생한 것을 확인할 수 있다. Super-TIG는 아크 최대압력을 C-type 필러가 막아주어 350A에서도 비드를 형성하였지만 GMAW는 아크최대압력이 바로 모재로 전달되어 용락이 쉽게 발생한 것으로 판단된다.

Table 3.5 Bead appearance with bead on plate by GMAW

Current	Welding Speed	Bead Appearance	Cross Section Penetration
279A	100cpm		Burn through

제 4 장 Super-TIG 박판 lap joint 용접조건 실험

4.1 박판 Super-TIG lap joint 전진각 변경 실험

4.1.1 실험 재료

본 실험에서는 두께 1.4mm, 길이 130mm, 폭 40mm 의 SPFC 590 고장력 강판을 모재로 사용하였고 ER316L C-type 필러를 용가재로 사용하였다. 이때 사용한 모재와 용가재의 화학성분은 Table 4.1과 Table 4.2에 나타내었다.

Table 4.1 Chemical composition of base metal

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
SPFC 590	0.09	0.25	1.6	0.03	0.003	-	-	-

Table 4.2 Chemical composition of C-type filler

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
ER316L	0.0001	0.38	1.90	0.021	-	12.10	19.10	2.30	0.25	0.021

4.1.2 실험 방법

Lap joint 용접에서 용락을 방지하고 비드폭을 넓게 하기 위해 전진각을 적용하는 실험을 진행하였다. 모재 2장을 겹쳐 테이블에 고정한다. 텅스텐 팁의 각도는 30° 로 가공하였고 텅스텐 팁의 위치는 Fig 4.1과 같이 위치시키고 상판과 하판사이에 C-type 필러가 위치하여 최대아크압력이 모재에 직접 전달되는 것을 막아준다. 작업각은 30° 로 유지한다. 고속용접을 위해 용접속도는 100cm/min으로 유지하였으며 상세 실험조건은 Table 4.1에 나타내었다. 변수로는 Fig. 4.2와 같이 전진각을 0° , 10° , 20° , 30° , 40° 로 변경하여 실험을 진행하였다



Table 4.3 Welding condition for Super-TIG welding
with progressive angle

Fixed	Base metal	SPFC 590 t1.4				
	Current (A)	350				
	Filler metal	STS 316L				
	Filler cross section area(mm ²)	6.6				
	Feed rate (cpm)	120				
	Welding speed(cpm)	100				
	Deposition area(mm ²)	7.9				
	Deposition rate(kg/hr)	3.8				
	Work angle (°)	30				
	Shield gas	Ar + He 10% , 20L/min				
Vairiable	Progressive angle (°)	0	10	20	30	40

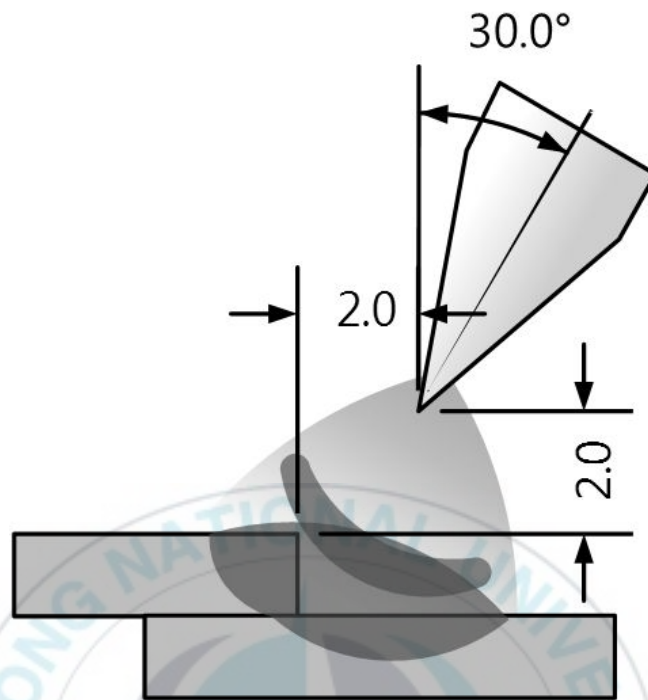


Fig. 4.1 Schemetic of teaching point

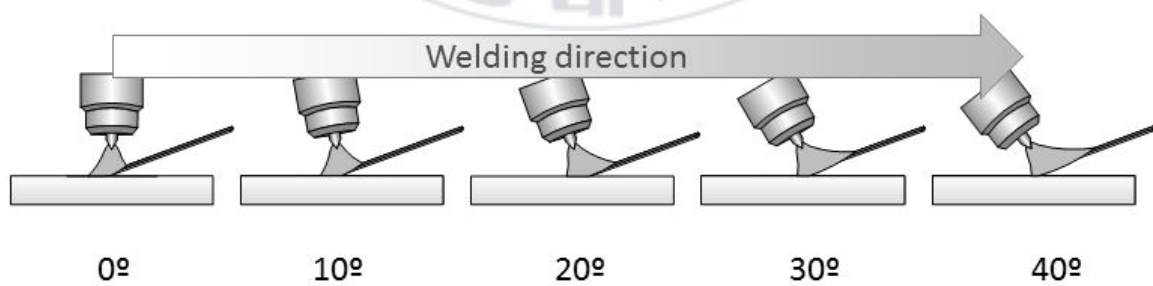
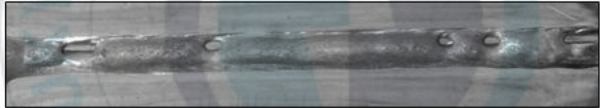
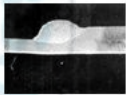
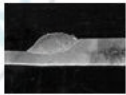
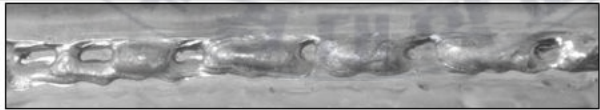
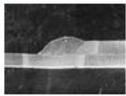
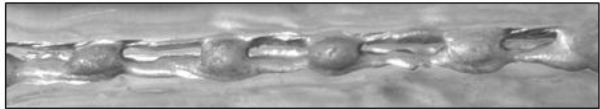
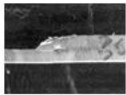
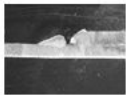


Fig. 4.2 Schemetic of Progressive angle

4.1.3 실험 결과 및 고찰

실험결과 0°와 10°에서 험핑비드가 발생하였고 20°, 30°, 40°에서 하판이 녹지 않아 융합불량이 발생하였으며 그 결과를 Table 4.2에 나타내었다. 전진각이 커질수록 융합불량의 발생이 증가하게 되는데 그 이유는 Fig 4.3에 나타낸 바와 같이 전진각이 증가하면서 filler metal의 입열이 증가하여 하판의 입열이 감소하고 하판의 용입이 감소하게 되어 융합불량의 발생이 증가하게 된 것으로 판단된다.

Table 4.2 Bead appearance and cross section
by progressive angle

Progressive angle (°)	Bead Appearance	Cross Section Penetration
0		 0.45mm
10		 0.27mm
20		 하판 LF
30		 하판 LF
40		 하판 LF

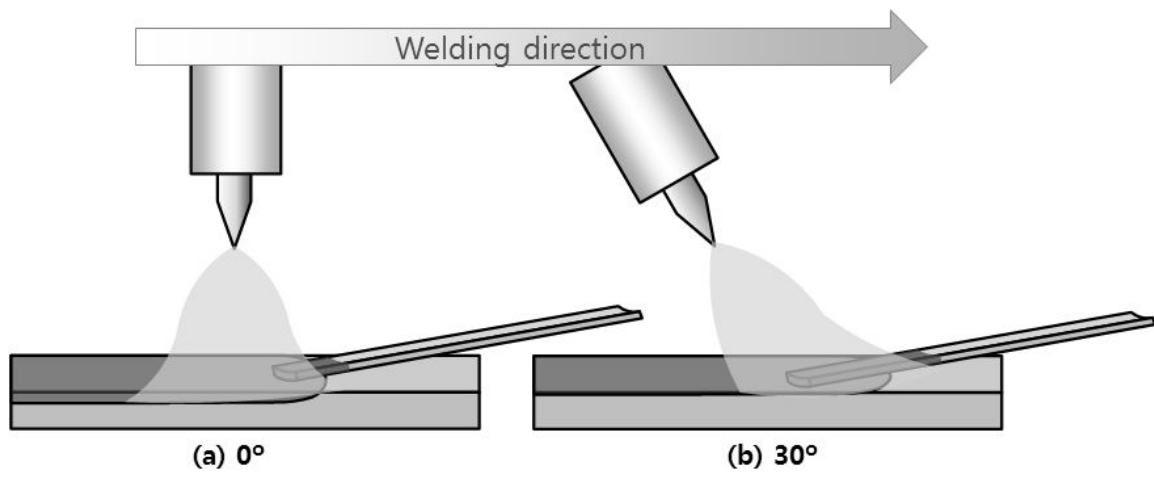


Fig 4.3 Cause of lack of fusion by increment of progressive angle



4.2 Lap joint 전류증가 실험

4.2.1 실험 방법

작업각 30°, 전진각 10°에서 전류를 350A, 370A, 390A, 410A로 증가시키면서 실험을 진행하였고 자세한 조건은 Table 4.3에 나타내었다.

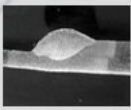
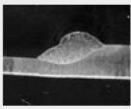
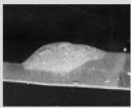
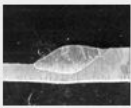
Table 4.3 Welding condition for Super-TIG welding with current

Fixed	Base metal	SPFC 590 t1.4			
	Filler metal	STS 316L			
	Filler cross section area(mm ²)	6.6			
	Feed rate (cpm)	120			
	Welding speed(cpm)	100			
	Deposition area(mm ²)	7.9			
	Deposition rate(kg/hr)	3.8			
	Work angle (°)	30			
	Progressive angle (°)	10			
	Shield gas	Ar + He 10% , 20L/min			
Variable	Current (A)	350	370	390	410

4.2.2 실험 결과 및 고찰

전류 350A에서 험핑비드가 발생했고 370A에서 정상적인 비드가 만들어졌으나 비드가 블록하였다. 390A, 410A에서 정상적인 비드가 만들어졌다. Fig. 4.4를 보면 350A와 370A는 용입이 비슷한데 390A에서 용입이 증가한 것을 보여주는데 이는 370A까지는 C-type 필러가 아크 중심에서 녹아 최대아크 압력을 막아주기 때문에 하판에 직접 영향을 주지 못하지만 전류가 높아지면 용가재가 아크전방에서 녹게 되고 최대아크압력이 하판에 부분적으로 작용하였기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 3.6과 Fig. 4.4에서 동일전류인 350A의 용입을 비교해보면 bead on plate에서 보다 lap joint에서 용입이 더 작게 나타나는데 lap joint에서는 상판 입열과 하판입열로 나뉘어 하판입열이 감소하여 lap joint에서 하판 용입이 감소하였다고 판단된다.

Table 4.4 Bead appearance and cross section by current

Current	Bead Appearance	Cross Section penetration
350A		 0.35mm
370A		 0.36mm
390A		 0.58mm
410A		 0.94mm

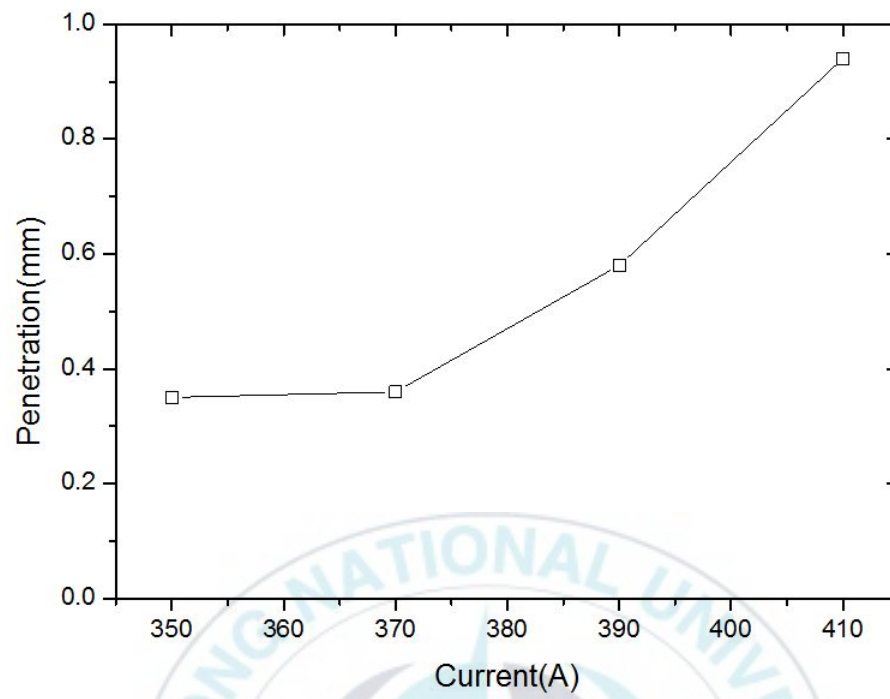


Fig.4.4 Lower sheet penetration by current in lap joint

4.3 Lap joint gap bridging 실험

4.3.1 실험 방법

Lap joint에서 겹은 상판과 하판 사이에 발생한다. 겹의 크기가 일정하지 않으므로 겹 0mm, 1mm, 2mm, 3mm에서 각각 브리징 실험을 실시하며 Fig. 4.5와 같이 겹 0mm(a) 보다 겹 2mm(b)에서 겹을 브리징하기 위해 필요한 용착단면적이 커지게 되고 용착단면적을 증가시키기 위해서는 송급속도의 증가가 필요해진다. 따라서 각각의 겹에 따라 송급속도 80~240cm/min까지 20cm/min씩 상승시키면서 송급속도에 따른 용착단면적 증가와 겹 브리징 능력의 관계 테스트를 진행하였고 그 실험조건을 Table 4.5에 나타내었다.

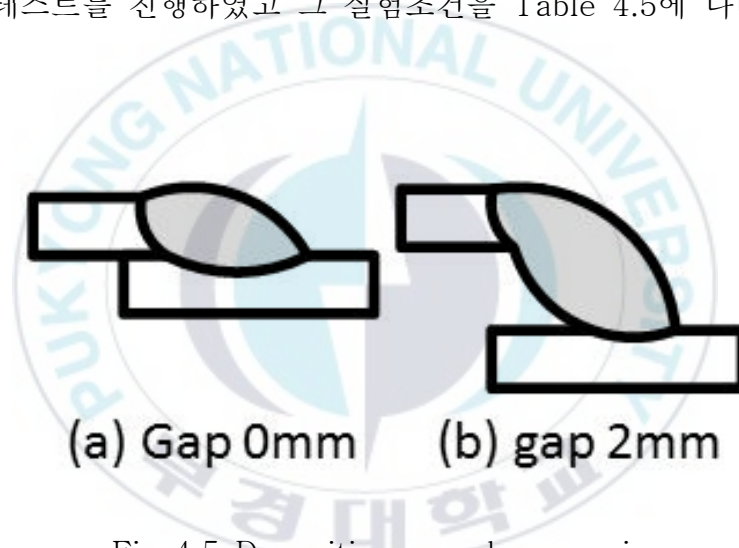


Fig 4.5 Deposition area by gap size

Table 4.5 Welding condition for Super-TIG welding
with variation of gap height

Fixed	Base metal	SPFC 590 t1.4
	Current (A)	390
	Filler metal	STS 316L
	Welding speed(cpm)	100
	Work angle (°)	30
	Progressive angle (°)	10
	Shield gas	Ar + He 10% , 20L/min
Variable	Gap (mm)	0, 1, 2, 3
	Feed rate(cpm)	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240

4.3.2 실험 결과 및 고찰

Lap joint에서 gap bridging 실험 결과 갭이 0mm일 때 송급속도 80cm/min에서 험핑비드가 발생했고 100 ~ 200cm/min까지 정상적인 비드를 생성하였다. 240cm/min에서 하판이 녹지 않아 융합불량이 발생했고 이때 비드 외관과 비드 단면 및 용입을 Table 4.6에 나타내었다. 갭이 1 mm일 때 험핑비드와 융합불량 발생이 늘어나서 정상적인 비드를 형성한 송급속도 조건은 140, 160, 180cm/min 구간이었으며 비드외관 및 비드 단면은 Table 4.7에 나타내었다. 2mm에서 갭브리징 가능한 구간은 120, 140, 160cm/min 조건이었고 그 결과는 Table 4.8에 나타내었다. Lap joint의 갭이 3mm 일 때 모든 조건에서 갭브리징이 불가능하였고 실험 결과에 따른 비드외관을 Table 4.9에 나타내었다.

실험을 통해 각 갭 크기에 따라 서로 다른 송급속도 영역에서 갭브리징이 이루어졌는데 Fig. 4.6에 갭 크기에 따른 갭브리징 가능구간에 대해 나타내었다. 갭 3mm는 갭브리징이 불가능하여 제외하였으며 갭 크기가 클수록 갭 브리징이 가능한 최대 송급속도가 낮아지는 것을 확인 할 수 있는데 갭이 커질수록 아크와 하판의 거리가 멀어지고 식 (2.2)에서 아크 길이가 길어져 Q_{ALoss} 가 커지게 되며 하판용입이 감소하고 융합불량이 증가한 것으로 판단된다. 이는 Fig. 4.7에서 확인 할 수 있는데 송급속도가 일정할 때 갭이 클수록 하판 용입이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig 4.7에서 갭 크기가 같으면 송급속도가 높을 때 하판용입이 감소하는데 전류가 같기 때문에 전체입열량 Q_{Total} 은 일정하고 송급속도가 높으므로 용가재입열량 Q_{FM} 이 증가하게 된다. 따라서 용가재입열량이 증가한 만큼 하판입열량 Q_{BML} 이 감소하여 하판용입이 감소한다.

Hyoung Jin Park등의 연구¹³⁾와 W.J. Kang등의 연구¹⁴⁾에서 박판에 발생한 2mm의 갭을 AC pulse GMAW를 이용하여 브리징하였는데 Super-TIG를 이용하여 1.4mm 박판에 발생한 2mm갭을 브리징한 것과 비교해보면 동등한 수준의 갭브리징 능력을 가진 것으로 판단할 수 있다.

Table 4.6 Bead appearance and cross section with 0mm gap

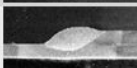
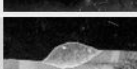
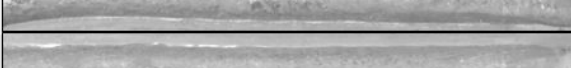
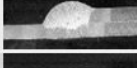
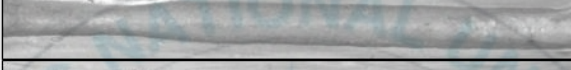
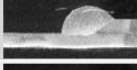
Gap	Feed rate	Bead Appearance	Cross Section penetration
0mm	80cpm		 0.84mm
	100cpm		 0.75mm
	120cpm		 0.72mm
	140cpm		 0.70mm
	160cpm		 0.63mm
	180cpm		 0.61mm
	200cpm		 0.28mm
	220cpm		 하판 LF
	240cpm		X 하판 LF

Table 4.7 Bead appearance and cross section with 1mm gap

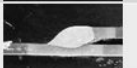
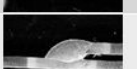
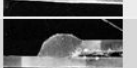
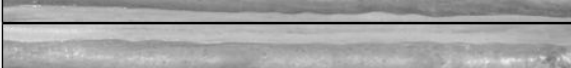
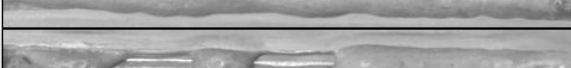
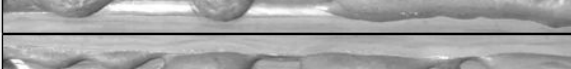
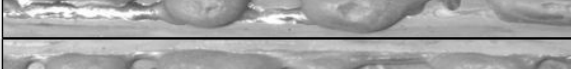
Gap	Feed rate	Bead Appearance	Cross Section penetration
1mm	80cpm		 0.74mm
	100cpm		 0.71mm
	120cpm		 0.60mm
	140cpm		 0.54mm
	160cpm		 0.34mm
	180cpm		 0.27mm
	200cpm		X 하판 LF
	220cpm		X 하판 LF
	240cpm		X 하판 LF

Table 4.8 Bead appearance and cross section with 2mm gap

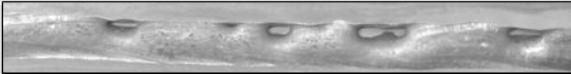
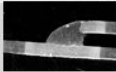
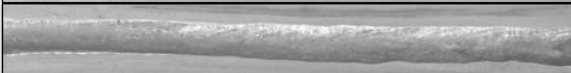
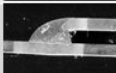
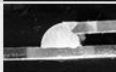
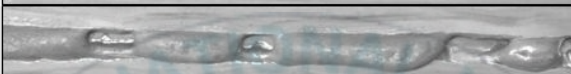
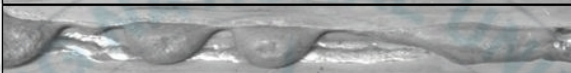
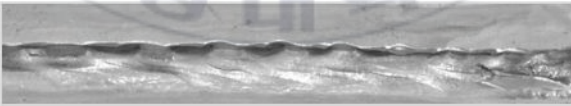
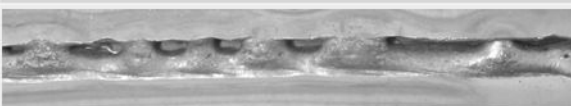
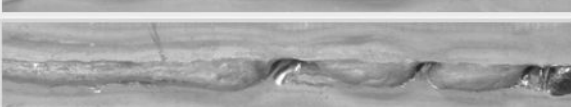
Gap	Feed rate	Bead Appearance	Cross Section penetration	
2mm	80cpm			0.73mm
	100cpm			0.56mm
	120cpm			0.33mm
	140cpm			0.32mm
	160cpm			0.31mm
	180cpm			0.28mm
	200cpm		X	하판 LF
	220cpm		X	하판 LF
	240cpm		X	하판 LF

Table 4.9 Bead appearance and cross section with 3mm gap

Gap	Feed rate	Bead Appearance	Cross Section Penetration
3mm	120cpm		X
	140cpm		X
	160cpm		X
	180cpm		X
	200cpm		X

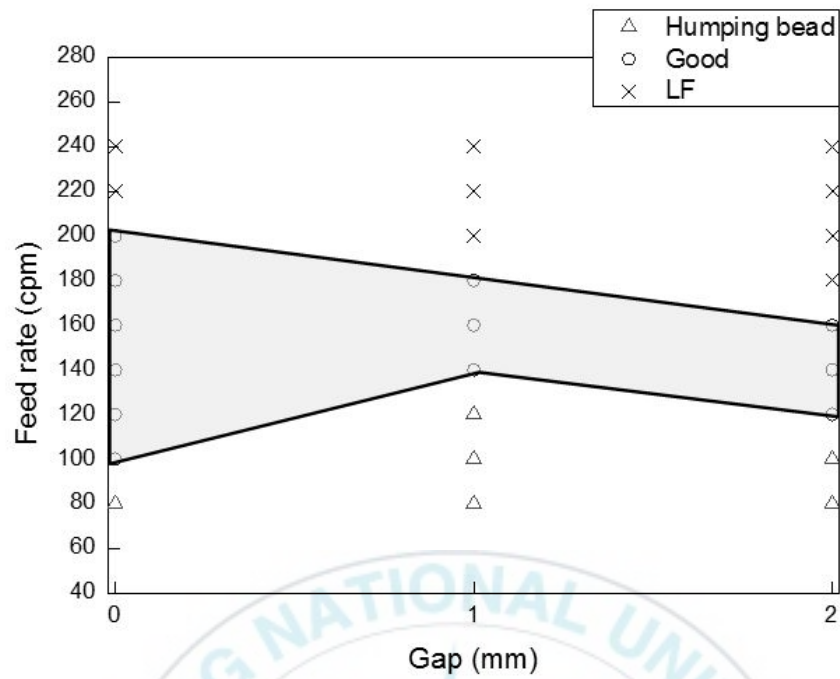


Fig. 4.6 Mapping of gap bridging area

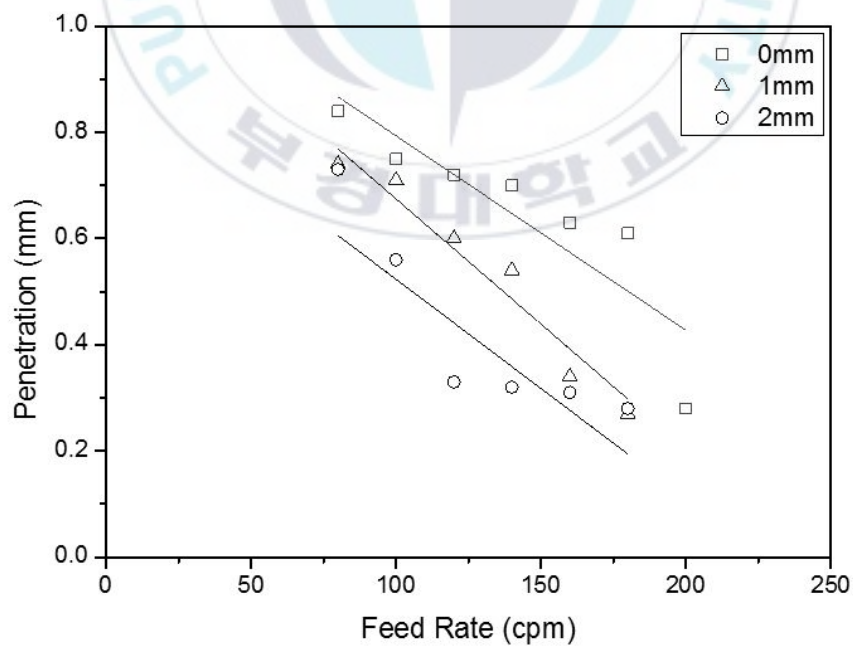


Fig 4.7 Variation of lower sheet penetration by increment of feed rate

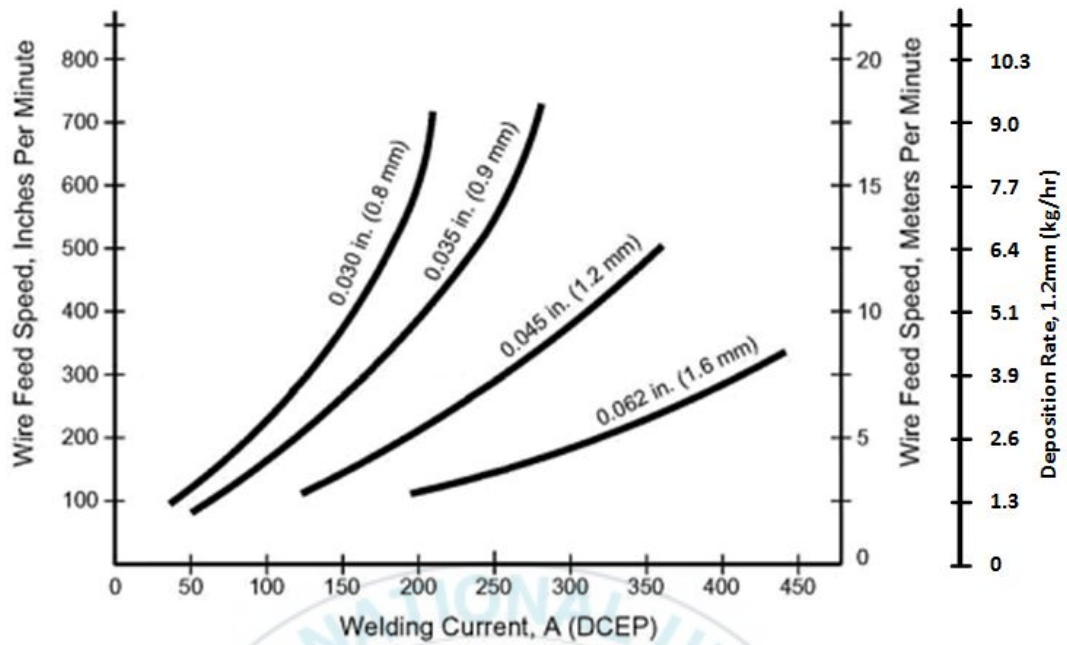


Fig. 4.8 Welding current versus wire feed speed¹²⁾

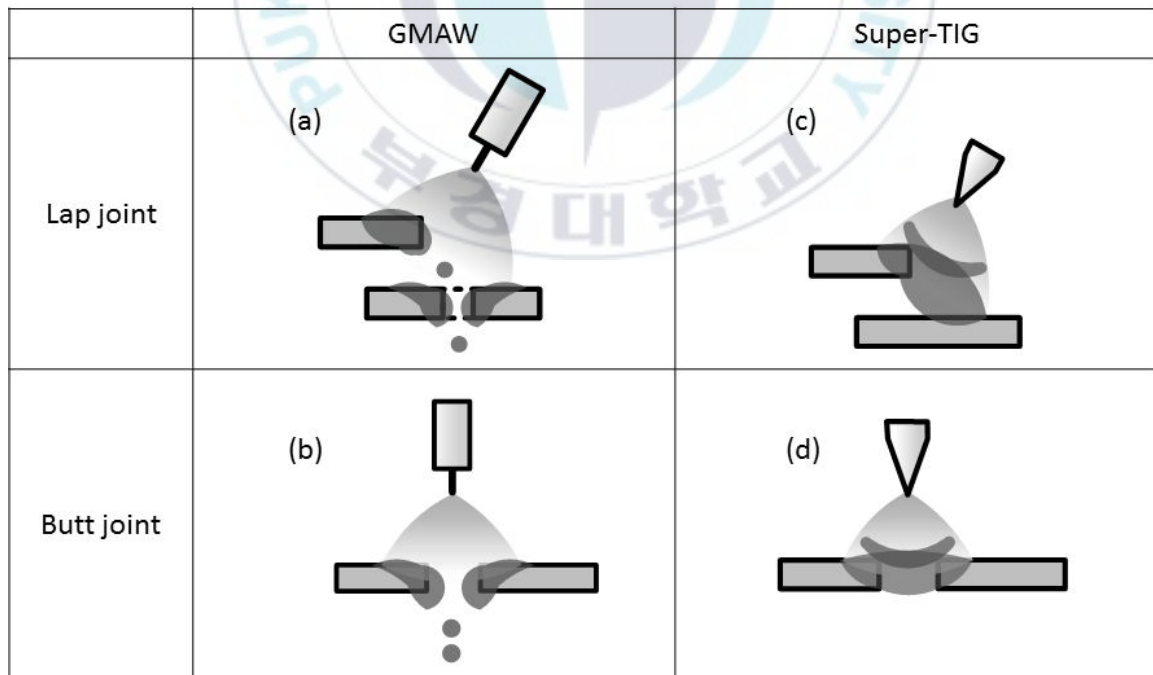


Fig. 4.9 Prevention of burn through by Super-TIG in sheet welding

본 연구에서 송급속도가 120cm/min일 때 용착속도는 3.8kg/hr이다. William Galver의 Welding Essentials에서 Fig 4.8과 같이 박판용접에서 사용하는 1.2mm 직경의 와이어로 본 연구와 동일한 용착속도인 3.8kg/hr 생산성을 얻기 위해서 필요한 전류가 260A로 나타난다¹¹⁾. GMAW에서 이 전류를 박판용접에 사용하면 용락발생으로 인해 용접이 되지 않고 실제로 GMAW bead on plate 실험에서 실제 용착속도 3.8kg/hr를 만들기 위해 279A의 전류를 사용했고 이 때, 용락이 발생하여 용접이 불가능하였다. 그러나 Super-TIG에서는 더욱 높은 전류인 350A에서도 용락이 발생하지 않았는데 이것은 C-type 필러가 최대아크 압력을 막아주어 모재가 과도하게 용융되는 것을 방지하기 때문이다. 이것은 갭이 있는 박판용접에도 적용이 되는데 Fig 4.9(a)의 GMAW lap joint 용접에서 갭이 발생하면 아크에너지가 갭사이로 들어가게 되는데 이렇게 되면 상판의 과도한 용융으로 갭브리징 불량 발생하며 최대아크압력이 하판에 직접 작용하여 용락 발생위험이 높아진다. 하지만 Fig. 4.9(c) Super-TIG lap joint 용접은 C-type 필러가 상판과 하판 사이에 위치하게 되는데 상판 모서리의 과도한 용융을 막아주고 하판에 최대아크압력이 직접 영향을 미치는 것을 방지하므로 용락 발생의 위험이 줄어들고 갭브리징 능력이 증가한다. Fig. 4.9(b)와 같이 갭이 있는 butt joint에서 GMAW를 사용하면 아크에너지에 의해 모재의 양쪽 모서리가 과도하게 용융될 수 있어 용락으로 인한 생산성 향상이 어렵지만 Fig 4.9(d)의 Super-TIG butt joint 용접은 갭 사이에 C-type 필러가 위치하여 최대아크압력이 모재에 직접 작용하는 것을 막아주므로 용락을 방지하는데 효과적이다.

Patricio 등의 연구에서는 TIG용접에서 전류가 너무 높거나 용접속도가 너무 높으면 험핑비드나 언더컷 등의 결함이 발생한다고 나타내었다⁷⁾. 그러나 본 연구는 Super-TIG를 이용하여 박판 lap joint용접 실험을 진행해 390A의 높은 전류와, 100cm/min의 높은 용접속도에서 정상적인 비드를 얻어 박판용접의 높은 생산성의 용접공정을 개발이 가능하였다.

제 5장 결론

본 연구는 박관 용접에서 용접속도 100cm/min의 고속 용접을 적용하여 생산성을 높이면서 용락의 발생 없이 갭 브리징 능력을 향상시키기 위해 Super-TIG 용접프로세스 개발 연구를 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) C-type 필러 송급속도 120cm/min 일 때 t1.4 bead on plate는 350A에서 정상 비드가 만들어졌으나 lap joint에서는 390A에서 정상 비드를 형성하였으며, GMAW에서 Super-TIG와 동일한 3.8kg/hr의 용착속도를 가지도록 하여 같은 용착단면적의 bead on plate 실험을 진행한 결과 전류는 279A로 측정되었고 같은 100cm/min의 용접속도에서 용락이 발생했다.

2) 용접속도 100cm/min으로 lap joint에 용가재 송급속도 120cm/min에서 전진각이 커짐에 따라 하판용입은 작아지고 융합불량이 심해졌다. 이는 전진각이 커짐에 따라 용융풀 압입깊이 D_{DP} 의 감소보다 하판용입깊이 D_{MP} 가 더욱 감소하였기 때문에 발생한 것이라고 판단된다.

3) Lap joint gap bridging 실험에서 갭 0mm일 때 송급속도 100~200cm/min, 갭 1mm일 때 140~180cm/min, 갭 2mm일 때 120~160cm/min 구간에서 정상적인 비드를 형성하였고 이때 전류는 390A, 용접속도는 100cm/min이었다. 송급속도가 높으면 용가재 용융위치가 아크 중심부로 이동하여 용가재입열량 Q_{FM} 이 증가하고 하판입열량 Q_{BML} 이 감소하여 하판용입깊이 D_{MP} 가 감소하게 되고 융합불량이 발생한 것으로 판단되며, 반대로 송급속도가 낮으면 용가재 용융위치가 아크 전방으로 이동하고 하판입열량 Q_{BML} 이 증가하여 하판용입깊이 D_{MP} 가 커지지만 하판에 작용하는 최대아크압력이 증가하여 압입깊이 D_{DP} 가 하판용입깊이 D_{MP} 보다 커지게 되어 험핑비드가 발생한 것으로 판단된다.

4) Lap joint gap bridging 실험을 진행한 결과 전류 390A, 용접속도 100cm/min에서 gap 2mm까지 bridging이 가능하였다. Gap bridging 능력은 AC P-GMAW와 동등하였으며 스패터와 비드표면 슬래그가 없는 깨끗한 비드를 형성하여 청정하고 고생산성의 Super-TIG 용접 방법을 개발이 가능하였다.



참 고 문 헌

1. Jinwoo Lee, Myoung-Gyu Lee, Forming Technology in Advanced High Strength Steels, The Korean Society of Automotive Engineers, Auto Journal 2014. 03 33-38
2. Tohru YOSHIDA, Eiji ISOGAI, Koichi SATO, Koji HASHIMOTO, Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 103 MAY 2013
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. 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
6. Jong Moon Lee, General characteristic of springback about an automobile panel, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, August 2003
7. Patricio F. Mendez, Krista L. Niece, Thomas W. Eagar, Humping Formation in High Current GTA Welding, In proceedings of the International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials II, November 1999
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. Jung-Hyun Park, A study on Process Developement of high speed & high current Super_TIG welding, Department of Mechanical Engineering, The Graduate School, Pukyong National University, 2015

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

12. William Galvery, Welding Essentials, Paperback (2007) :p157

13. Hyoung Jin Park, Dong Cheol Kim, Mun Jin Kang, Sehun Rhee, The arc penomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, May 2013

14. W.J. So, M.J. Kang, D.C. Kim, Weldability of pulse GMAW joints of 780 MPa dual-phase steel, International Scientific Journal, January 2010

학위과정 중 주요 학술지 게재 및 발표논문과 특허

1. 학술발표대회 발표논문

- 1) 플라즈마 스트립 이론에 의한 C-형 스트립 TIG 클래딩에서 광폭 비드를 위한 공정 연구, 대한용접접합학회, 춘계학술발표대회, 21013.11
- 2) 초고장력 강판 GMAW 겹치기 이음 용접부 목두께가 강도에 미치는 영향, 대한용접접합학회, 춘계학술발표대회, 2014.5
- 3) 대전류 CS-TIG에 의한 후판 맞대기 용접의 생산성 향상, 대한용접접합학회, 춘계학술대회, 2014.5
- 4) Application on the Circular Seam Butt Welding in Thinck Pipe of the CS-TIG Welding, International Conference of the International Institute of Welding, Journal of Welding and Joining, 2014.6
- 5) 박판용접 겹 브리징 능력 향상을 위한 Super-TIG 용접 프로세스 개발, 대한용접접합학회 춘계학술발표대회, 2015.5

2. 특허

- 1) 티그 용접용 용가재 (10-2013-0098314)
- 2) TIG 용접용 용가재 성형송급장치 (10-2013-0098331)
- 3) 용접용 용가재 (10-2014-0052845)
- 4) 용접용 용가재 송급장치 (10-2014-0052785)
- 5) 용접용 용가재 예열장치 (10-2014-0052811)
- 6) 용접용 용가재 (10-2014-0052845)



감사의 글

제가 Welding Process Lab.에 2013년에 들어왔는데 지금이 2015년이니 순식간에 2년이나 지났습니다. 정말 눈 깜짝할 사이에 시간이 흘렀습니다.

저의 지도교수이시며 제가 실험실에 들어올 수 있도록 허락해주신 조상명 교수님께 가장 먼저 감사드립니다. 교수님께서 부족한 저를 받아주신 것, 하나라도 더 가르쳐주려고 노력하신 그 마음은 감사의 말로는 부족하고 또 부족하지만 그 이상의 표현은 찾지 못하겠습니다. 항상 교수님의 가르침 잊지 않도록 노력하며 생활하겠습니다.

제 주심이신 김성규 교수님. 교수님께서 논문 발표하는 날 제게 해주신 한마디에 자신감을 얻을 수 있었습니다. 그리고 항상 마주치면 먼저 웃어 주시는 부심이신 권한상 교수님 저도 나중에 마주치면 먼저 웃으며 인사드리겠습니다.

논문 실험을 함에 있어서 셋길로 빠지지 않도록 도와준 변재규, 전재호 두 사람에게 감사의 인사 전합니다. 너희들 나보다 나이는 어리지만 내 학교생활에 있어서 정신적 지주다. 같이 늙어가는 처지지만 세월이 비껴가는 것 같은 느낌이 드는 서기정 서른지났으니 나이는 잊어버려라. 예상 못한 타이밍에 부장님 개그를 구사하는 박성한군 신입사원의 마음으로 개그를 날리면 모두 웃을꺼다. 연구실의 중심이자 소년 감성을 간직한 박정현군 결혼 축하한다. 이제 프로젝트 팀장 맡은 성률이도 결혼 축하한다. 나도 못 해본 결혼을 하지만 나는 부럽지 않다. 둘 다 행복해라

항상 새로운 기술 개발의 선두에 서는 박송이, 파이팅. 프로젝트 같이한 김민우는 서핑하면서 겨울에도 함께 할 좋은 아가씨 찾아봐라. 충격적인 세미나 보여준 배민구 실험할 때 도와줘서 고맙다 민구야. 같이 실험하면서 내 생일 챙겨준 조문경 고맙다. 같이 수업 들으면서 책도 빌려준 방승현군 매우 고맙다. 덕분에 무사히 수업을 들을 수 있었다.

내 실험도 도와주고 이웃사촌인 영훈아 초반에 과한 농담에 당황했겠지만 요즘은 너도 나 물어뜯으니 미안하지 않다. 허물없이 대해줘서 고맙다. 그리고 갈수록 운전실력이 일취월장하고 나도 잊어버린 내가 한 얘기 기억하고 심지어 고등학교 교가까지 기억하는 상준아 고맙다. 무슨 얘기를 하든 웃을 준비가 되어있는 장경철. 웃어줘서 고맙다.

마지막으로 저의 진로를 바꿔보라 제의해주신 고모부, 응원해주신 부모님과 가족들께 감사의 인사 전합니다. 멈춰있지 않고 달려가겠습니다.