



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

GTAW에서 용가재 형상이 용적
이행 안정성에 미치는 영향



2021년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

류 형 창

공학석사 학위논문

GTAW에서 용가재 형상이 용적
이행 안정성에 미치는 영향

지도교수 박 영 환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2021년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

류 형 창

류형창의 공학석사 학위논문을 인준함

2021년 2월 19일

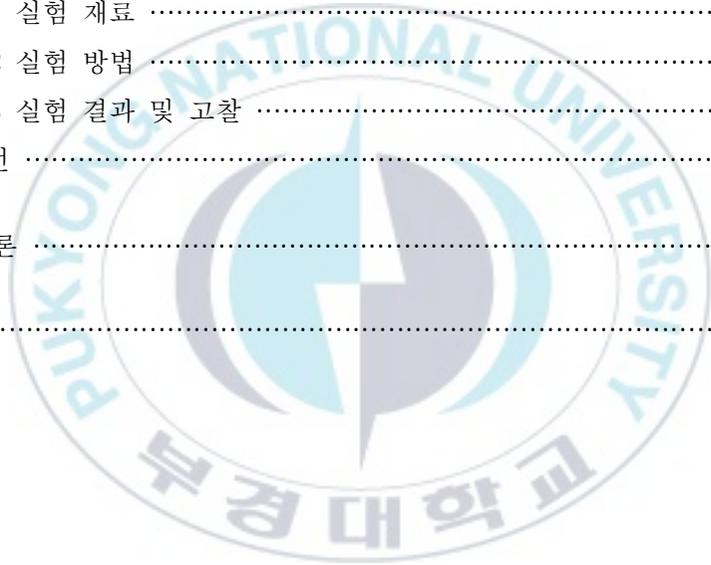


주	심	공학박사	김 태 완 (인)
위	원	공학박사	조 상 명 (인)
위	원	공학박사	박 영 환 (인)

목 차

Abstract	iii
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.....	3
2.1.2 GTAW의 원리.....	4
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
2.2.4 TIG용접에서의 일반적인 제어 인자.....	11
2.3 플라즈마 스트림 이론(Theory of Plasma stream).....	13
2.3.1 플라즈마 스트림 이론의 개념	13
2.3.2 플라즈마 스트림 이론의 관점에서 본 Super-TIG 용접.....	15
제 3장 GTAW에서 용가재 형상이 용적 이행 안정성에 미치는 영향에 관한 연구.....	18
3.1 서언	18
3.2 원형 와이어를 사용한 GTAW에서의 용접 전압 측정 실험.....	20
3.2.1 실험 재료	20
3.2.2 실험 방법	21
3.2.3 실험 결과 및 고찰	24
3.3 C형 용가재를 사용한 GTAW에서의 용접 전압 측정 실험.....	34
3.3.1 실험 재료	34

3.3.2 실험 방법	35
3.3.3 실험 결과 및 고찰	36
3.4 결론	46
제 4장 GTAW에서 안정적인 연속교락이행을 위한 용적 이행 모드 분류 알고리즘 개발에 관한 연구	48
4.1 서언	48
4.2 GTAW에서 용가재 조성에 따른 Filler height 변경 실험	49
4.2.1 실험 재료	49
4.2.2 실험 방법	50
4.2.3 실험 결과 및 고찰	52
4.3 결론	66
제 5장 결론	67
참고문헌	69



Effect of the Filler Metal Shape on the Stability of Metal Transfer on GTAW

Hyeong-Chang, Ryu

Dept. of Mechanical Engineering,

The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Unlike other welding methods that use consumable electrodes such as GMAW and FCAW, GTAW is a welding method that uses non-consumable tungsten electrodes and supplies a separate filler metal. The arc and filler metal are separately controlled while welding.

Depending on the shape of the filler metal used in GTAW, the area where the arc plasma enters the filler metal and the density of the current vary. In the case of a circular filler metal, the location of transmission to the arcs varies easily depending on the cast and helix, making it difficult to achieve stable transfer. In this case, sticking due to unmelting of the filler metal is likely to occur at a high current and fast filler metal feeding speed, and a high current density plasma stream directly enters the base metal, causing a humping bead. In addition, when the filler height is high, intermittent bridging in which the bridge of continuous bridging is broken or falling may occur, and sticking may occur when the filler height is low. Therefore, it is necessary to develop an algorithm that can maintain the proper arc length and filler height of filler metal by analyzing the welding phenomenon that occurs when the arc length and filler height change.

In this study, welding phenomena when the arc length and filler height are changed using GTAW circular filler metal and a wide C-type filler metal

were compared by waveform signal, and the effect of filler metal shape on the stability of metal transfer was modeled, and a metal transfer mode classification algorithm that can be applied to welding was developed.

Key Words : GTAW, Filler Metal Shape, Plasma Stream, Arc length, Filler height, Continuous Bridging Transfer, Intermittent Bridging Transfer



제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

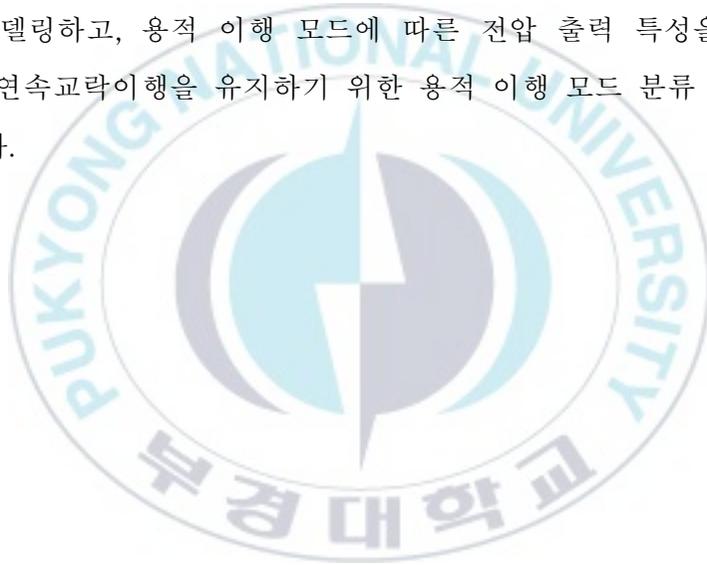
GTAW는 GMAW, FCAW 등 소모성 전극을 사용하는 타 용접 방법과는 다르게 비소모성 텅스텐 전극을 사용하고 별도의 용가재를 공급하는 용접 방법으로 아크와 용가재를 별도로 제어하면서 용접하게 된다.

GTAW에서 사용하는 용가재의 형상에 따라 아크 플라즈마가 용가재로 입사되는 면적과 전류의 밀도가 달라진다. 원형 용가재의 경우 Cast와 Helix에 따라 아크로 공급되는 위치가 쉽게 변하여 안정적인 이행이 어렵게 된다. 이 경우, 고전류의 빠른 용가재 공급 속도에서는 용가재 미용융으로 인한 스틱킹(Sticking)이 발생하기 쉽고, 높은 전류밀도의 Plasma stream이 모재로 곧바로 입사하여 험핑비드가 발생할 수 있다. 또한, 용가재의 공급 높이가 높은 경우 연속교락이행의 브릿지(Bridge)가 끊어지는 단속교락이행이 발생하거나 낙하이행이 발생할 수 있고, 공급 높이가 낮은 경우 스틱킹이 발생할 수 있다. 따라서, 아크 길이와 용가재 공급 높이가 변하는 경우 발생하는 용접 현상을 분석하여 적정 아크 길이 및 용가재의 공급 높이를 유지할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요한 시점이다.

1.2 연구 목적 및 개요

본 연구의 목적은 GTAW에서 용적 이행 모드가 용적 이행 안정성에 미치는 영향을 용가재 형상에 따라 비교하고, 안정적인 연속교락이행을 유지하기 위한 용적 이행 모드 분류 알고리즘을 개발하는 것이다.

2kg/h의 동일한 용착속도에서 동일 전류를 사용하여 원형 와이어와 C형 용가재를 각각 아크 길이와 Filler height를 변경하여 실험을 진행하였고, 모니터링 장비로 공정 변수를 계측하여 용가재 형상에 따른 용적 이행 안정성을 모델링하고, 용적 이행 모드에 따른 전압 출력 특성을 검토하여 안정적인 연속교락이행을 유지하기 위한 용적 이행 모드 분류 알고리즘을 개발하였다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)

비소모성 전극인 텅스텐 전극과 모재 사이에서 발생시킨 아크열로 모재를 용융시켜 접합하는 용접법을 말한다. 용도에 따라 별도의 용가재를 공급하여 모재와 함께 용융시켜 비드를 얻기도 한다. 실드가스로는 모재와 텅스텐 전극의 산화를 방지하기 위하여 불활성가스인 Ar, He 등을 사용하므로 TIG(Tungsten Inert Gas) 용접이라고도 한다.

2.1.1 GTAW의 정의

가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten Arc Welding)은 Ar, He 등과 같은 불활성가스를 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 GMAW(Gas Metal Arc Welding)에 비하여 용접속도가 느리므로 생산성은 낮다.¹⁾

2.1.2 GTAW의 원리

GTAW는 비소모성 텅스텐 용접봉과 모재 간의 아크열에 의해 모재를 용융시켜 접합하는 용융 용접으로서 Fig. 2.1과 같이 용접부 및 아크 주위에 불활성 가스(Ar, He)를 실드가스로 사용하여 모재와 텅스텐 전극의 오염을 방지하면서 용접이 이루어진다.²⁾

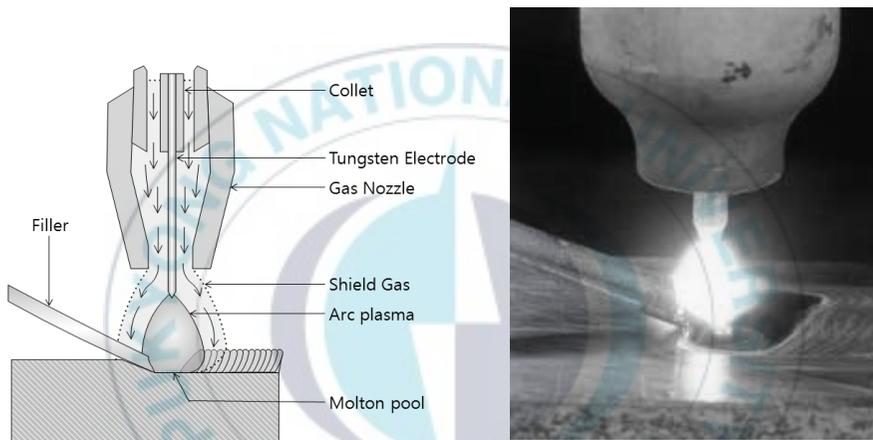


Fig. 2.1 Schematic of GTAW

2.1.3 GTAW의 장단점

1) 장점

GTAW는 용가재의 송급을 별도로 제어할 수 있고, 용가재의 송급과 관계없이 전류의 독립된 설정이 가능하여 용접 입열의 조정이 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 또

는 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.
- ⑦ Fume이 생기지 않는다.

2) 단점

GTAW는 일반적으로 SMAW, SAW, GMAW 등의 방법으로 쉽게 용접이 가능한 경우에 이들 용접 방법과는 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 텅스텐 전극, 실드 가스 공급을 조절하는 유량계로 이루어져 있다.

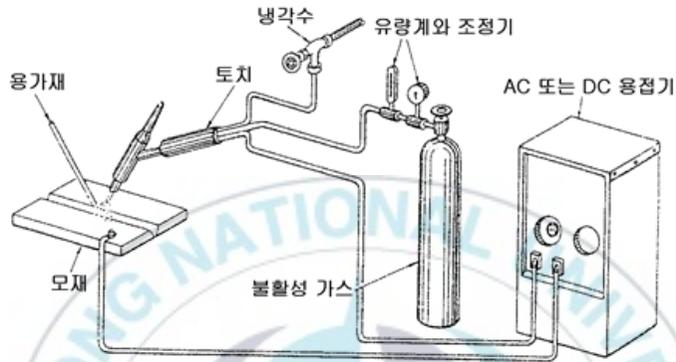


Fig. 2.2 Schematic diagram for GTAW power supply

2.2.1 용접기

현재 사용되고 있는 TIG 용접기 전원은 정전류 특성인 AC 또는 DC이다. 이때 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, 비드 폭이 좁아진다. 직류 정극성(DC Straight Polarity)이라고도 한다.

2) 직류 봉 플러스(DCEP)

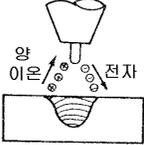
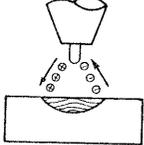
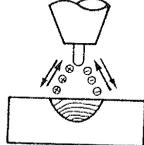
거의 사용하지 않고 특수한 경우 Al, Mg 등의 박판용접에 사용한다.

- ① 용접봉의 발열량이 크기 때문에 용접봉 끝이 녹아내릴 염려가 있어서 같은 전류에서 DCEN의 용접봉보다 4배 정도 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)

- ① 고주파 전원을 첨가하여 사용한다.
- ② 용입과 비드폭은 DCEN과 DCEP의 중간이다.
- ③ 청정작용은 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 금속의 용접	박판 용접	Al, Mg

2.2.2 용접토치

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

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

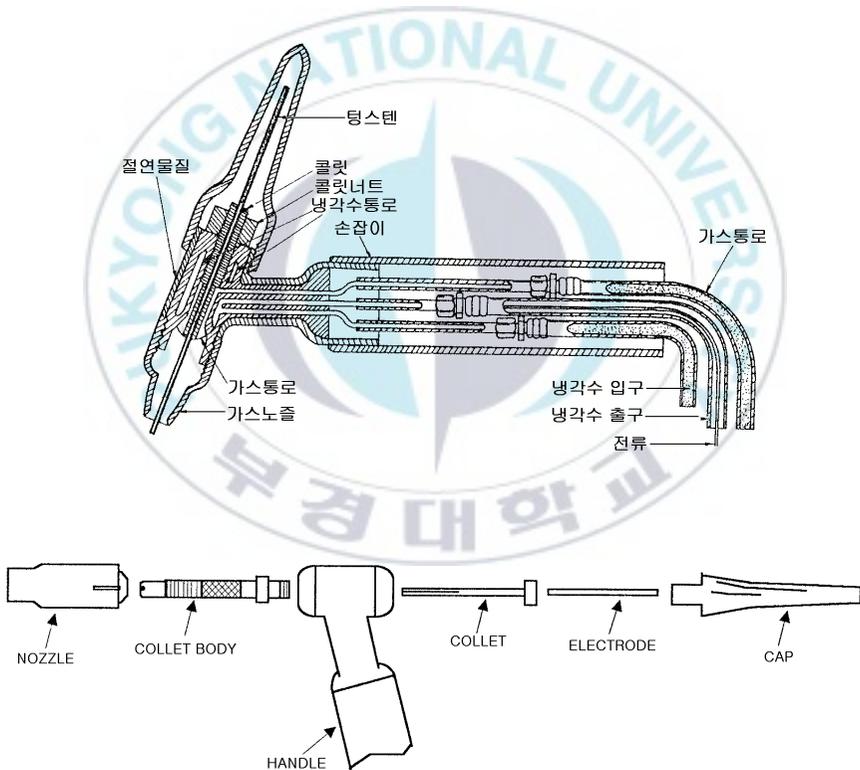


Fig. 2.3 Sectional view for TIG welding torch

2.2.3 용접재료

1) 전극봉

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

Table 2.2는 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) 실드 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 핀치력	낮다.	높다.
Arc 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.

2.2.4 TIG 용접에서의 일반적인 제어 인자

산업 현장과 연구실에서는 TIG용접에서 제어를 위해 여러 용접인자를 사용한다. 극성은 용접전원에서 나오는 양과 음의 단자가 전극과 모재 중 어디에 연결되는가에 의해 정해지며 정극성(DCEN), 역극성(DCEP), 교류(AC)의 3가지가 있다. 극성에 따라 아크 특성 및 용융지의 용융특성이 달라진다.³⁾ 일반적으로 DCEN에서 용접전류에 따른 용접 현상을 Fig. 2.4에 나타내었다. 전류가 증가할수록 입열이 증가하여 용융지의 폭과 용입은 증가한다.

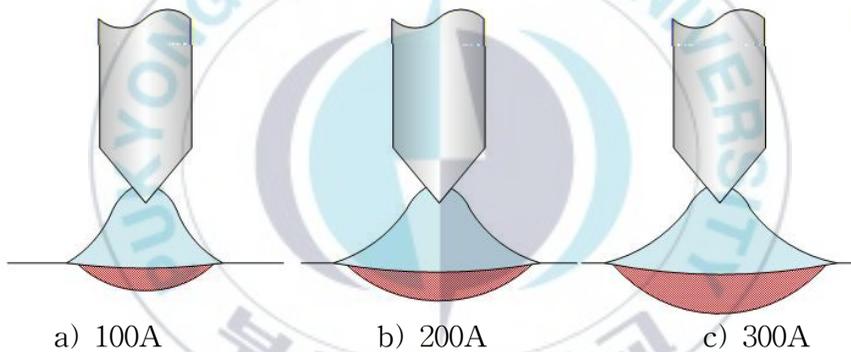


Fig. 2.4 Schematic of molten pool with arc current³⁾

Fig. 2.5는 아크 길이에 따른 용접 현상을 나타낸다. 아크 길이가 감소할수록 용융지 표면의 아크는 집중되어 전류밀도는 증가하기 때문에 용융지 폭은 감소하고 용입은 증가한다.

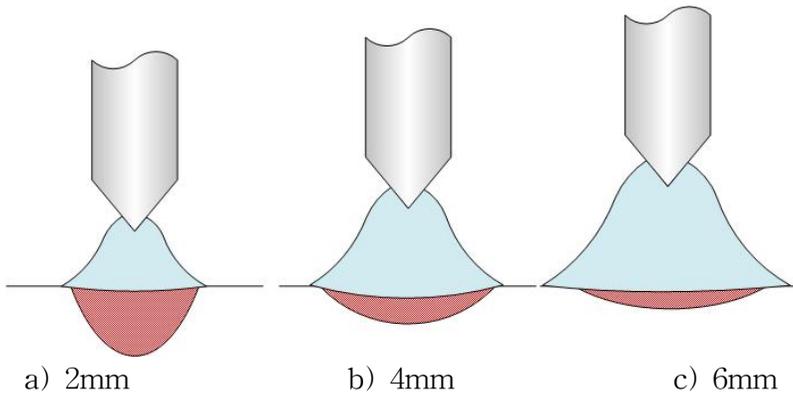


Fig. 2.5 Schematic of molten pool with arc length³⁾

Fig. 2.6은 텅스텐 전극 선단각에 따른 용접 현상을 나타낸다. 아크는 전극 표면의 직각 방향으로 형성된다. 전극선단각이 증가할수록 아크는 용융지 쪽으로 집중되고 전류밀도의 증가로 용입이 증가한다.

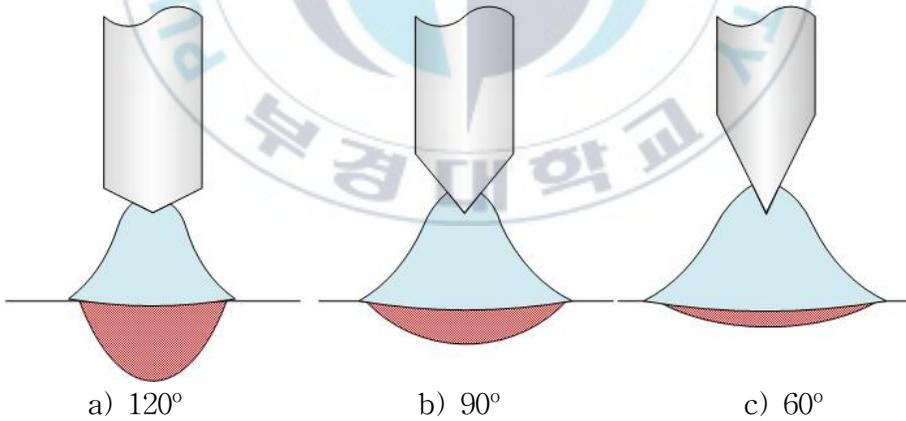


Fig. 2.6 Schematic of molten pool with electrode angle³⁾

2.3 플라즈마 스트림 이론(Theory of Plasma stream)

2.3.1 플라즈마 스트림 이론의 개념

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

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

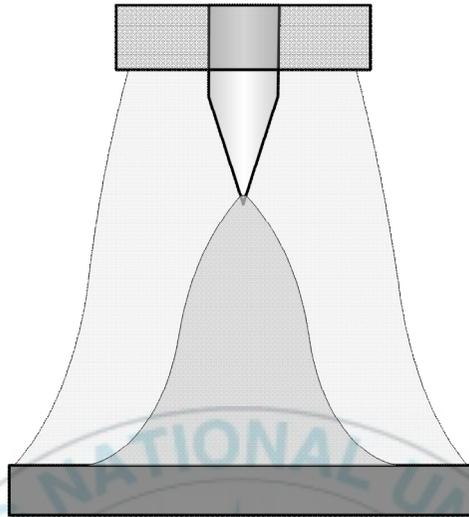


Fig. 2.7 Conventional TIG arc model

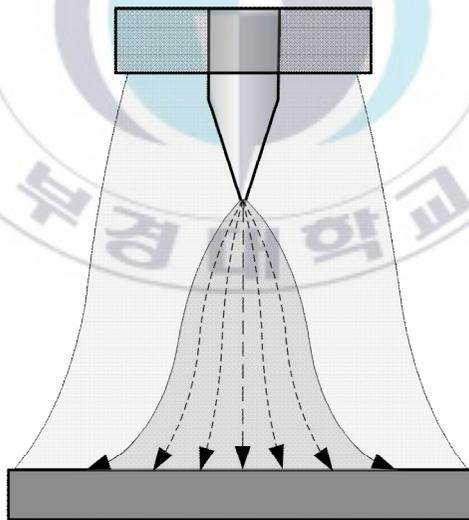


Fig. 2.8 TIG arc model by theory of plasma stream

2.3.2 플라즈마 스트림 이론의 관점에서 본 Super-TIG 용접

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 Oh⁴⁾ 등의 연구에 따르면 TIG 용접은 아크 중심에서 아크압력이 가장 높으므로 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. 2.9는 플라즈마 스트림 이론에 의해 1.2mm 와이어에 대한 플라즈마 스트림 입사면적을 나타내었고 Fig. 2.10은 플라즈마 스트림 이론에 의해 5.0mm C-Filler에 대한 플라즈마 스트림 입사면적을 나타내었다. Fig. 2.11은 C-Filler를 사용하는 Super-TIG 용접장비의 사진을 나타내었다.

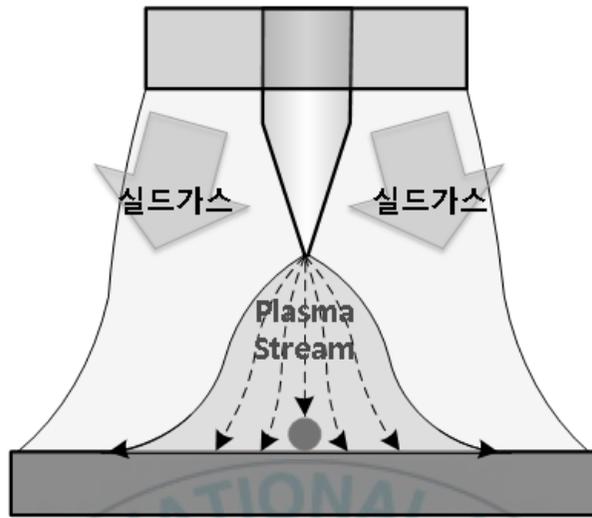


Fig. 2.9 Incident plasma stream on $\Phi 1.2$ wire by theory of plasma stream

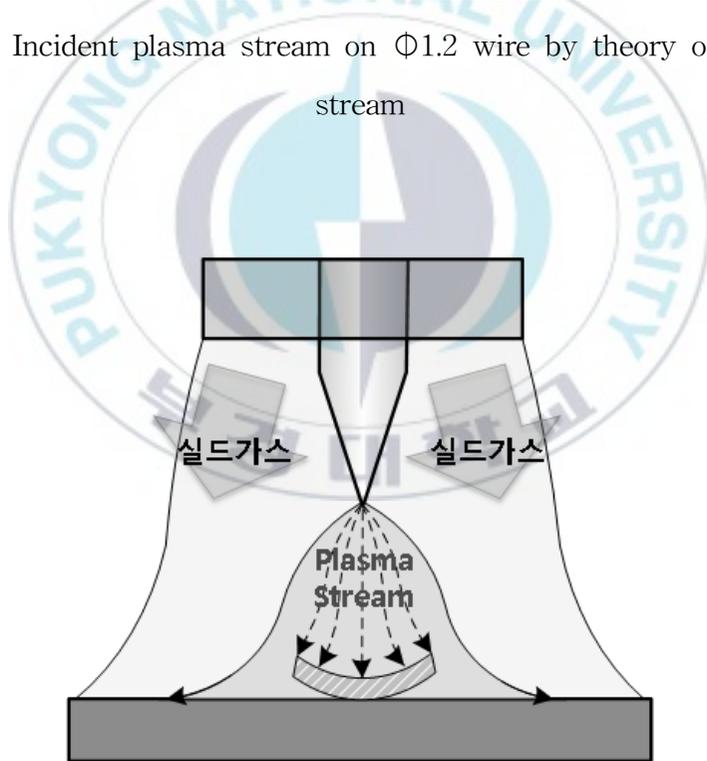


Fig. 2.10 Incident plasma stream on C-Filler by theory of plasma stream

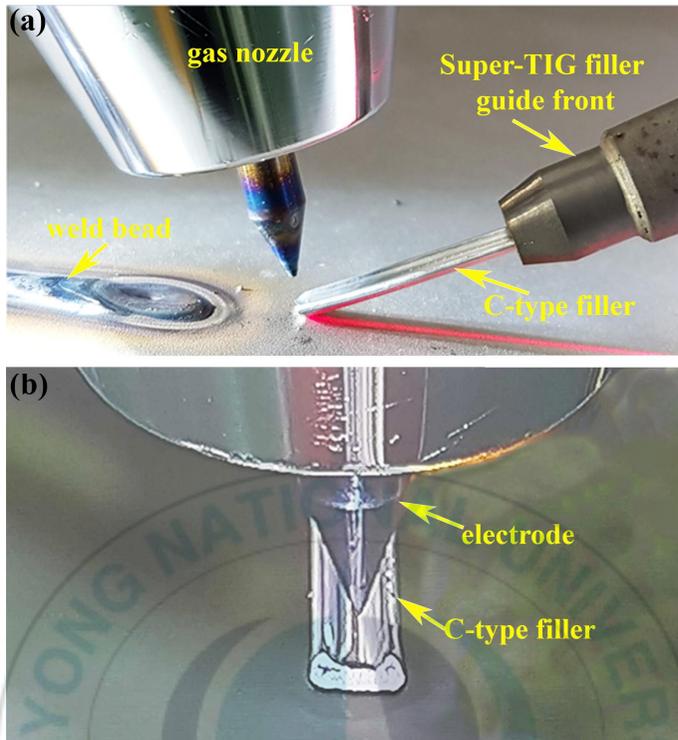


Fig. 2.11 Super-TIG welding equipments

제 3장 GTAW에서 용가재 형상이 용적 이행 안정성에 미치는 영향에 관한 연구

3.1 서언

자동 GTAW에서 동일한 용적 이행 모드를 유지하여 일정한 품질의 용접비드를 만드는 것은 중요하다. Jae-Ho Jun의 연구에서 용가재 송급 높이(Filler height)에 따른 이행 모드의 모델링을 위해 Arc 전압과 송급 전압을 나누어 측정하였다.⁵⁾ 이 경우 Filler height 변동에 의한 전압 변동 특성을 구분할 수 있으나, 아크 길이(Arc length) 변동에 따른 전압 변동 특성을 구분할 수 없어 일정한 Arc length와 Filler height를 유지하기 위해서는 더욱 세분화된 전압 측정이 필요하다.

금속 이행모드를 관찰하여 Filler height에 따른 이행 모드를 모델링하기 위해 원형 와이어와 폭 넓은 C-Filler를 사용하여 용접하는 동안 용접 파형 모니터링을 통해 금속 이행 모드에 따른 전압을 측정하여 용가재 형상에 따른 용접 전압을 분석하였다.

용접 전압은 Arc 전압(Arc voltage, E_A)과 용가재 전압(Filler voltage)을 측정하였으며, 용가재 전압을 상부 Filler 전압(Upper Filler voltage, E_{UF})과 하부 Filler 전압(Lower Filler voltage, E_{LF})으로 구분하여 총 3종류의 전압을 측정하였다. Fig. 3.1은 본 연구에서 세분화하여 측정한 3종류의 전압에 대한 모식도를 나타낸 것이다. Arc 전압은 전극과 모재 사이의 전압으로 정의하였고, 상부 Filler 전압은 전극과 용가재 사이의 전압으로 정의하였으며, 하부 Filler 전압은 용가재와 모재 사이의 전압으로 정의하였다.

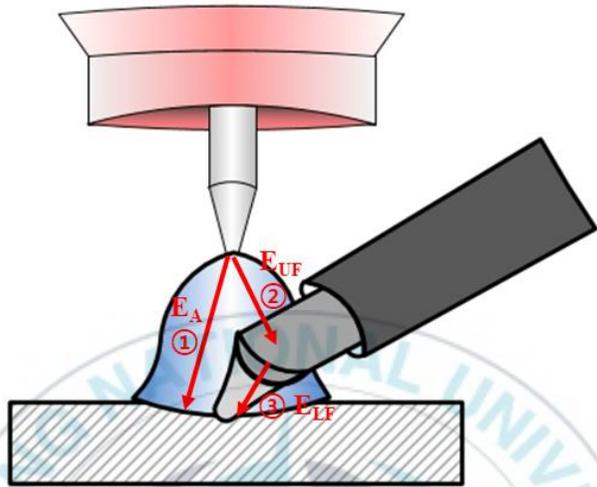


Fig. 3.1 Definitions of Arc voltage and Filler voltage

3.2 원형 와이어를 사용한 GTAW에서의 용접 전압 측정 실험

3.2.1 실험 재료

본 실험에서 모재는 두께 10mm, 길이 300mm, 폭 150mm인 SS400(ASTM A283)을 사용하였으며, 모재의 형상은 Fig. 3.2에 나타내었다. 용가재는 폭이 1.2mm인 Inconel 625(ERNiCrMo-3) 원형 와이어를 사용하였다. Table 3.1과 Table 3.2는 모재와 용가재의 화학성분을 나타낸 것이다. 용접용 실드가스는 Ar 93%에 H₂ 7%를 혼합한 가스를 사용하였으며, 유량은 20 ℓ/min으로 하였다.

Table 3.1 Chemical composition of SS400 base metal (wt. %)

Classification	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
SS400	0.155	0.163	0.455	0.007	0.009	0.019	0.0101

Table 3.2 Chemical composition of Inconel 625 filler metal (wt. %)

Classification	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe	Co
Inconel 625	0.10	0.50	0.50	23.0	58.0	10.0	5.0	1.0

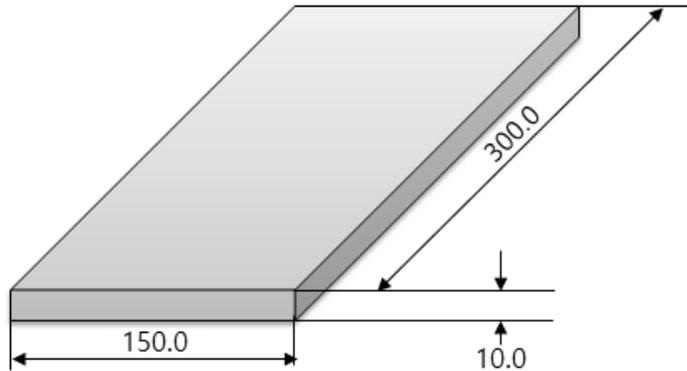


Fig. 3.2 Design of base metal

3.2.2 실험 방법

Fig. 3.3은 실험의 모식도를 나타낸 것으로 GTAW 용접 시 용접 전압의 측정 방법을 나타낸 것이다. 실험은 SS400 모재에 Inconel 625 용가재를 송급하며 Bead On Plate로 진행하였고, 원형 와이어를 사용하는 일반 GTAW와 폭 넓은 C-Filler를 사용하는 GTAW의 용접 전압과 용적 이행 현상을 비교하기 위해 용접 파형 모니터링 시스템을 통해 용접 전류, 전압을 측정하였다. Arc 전압을 측정하기 위해 전압 센서를 전극(-)과 모재(+)에 부착하였고, 상부 Filler 전압을 측정하기 위해 전압 센서를 전극(-)과 가이드프론트(+)에 부착하였으며, 하부 Filler 전압을 측정하기 위해 전압 센서를 가이드프론트(-)와 모재(+)에 부착하였다. 세부적인 용접 조건은 Table 3.3에 나타내었다. Arc length를 4mm로 설정하였고, 용적의 이행 모드에 따른 전압의 특성을 파악하기 위해 용가재와 모재 사이의 송급 높이(Filler Height)를 0mm에서 2mm로 증가시키며 실험을 진행하였다. Filler height를 증가함에 따라 Arc length가 함께 2mm 증가하는 실험과, Arc length는 일정한 상태에서 Filler height만 증가하는 실험을 각각 진

행하였다. Fig 3.4는 실험에 사용한 용접기를 나타낸 것으로 월드웰 사의 LONGRUN 1000PT2 용접기를 사용하여 실험을 진행하였다.

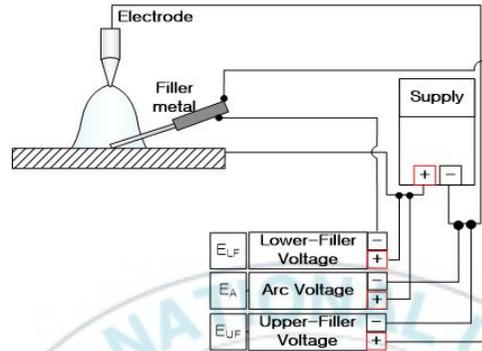


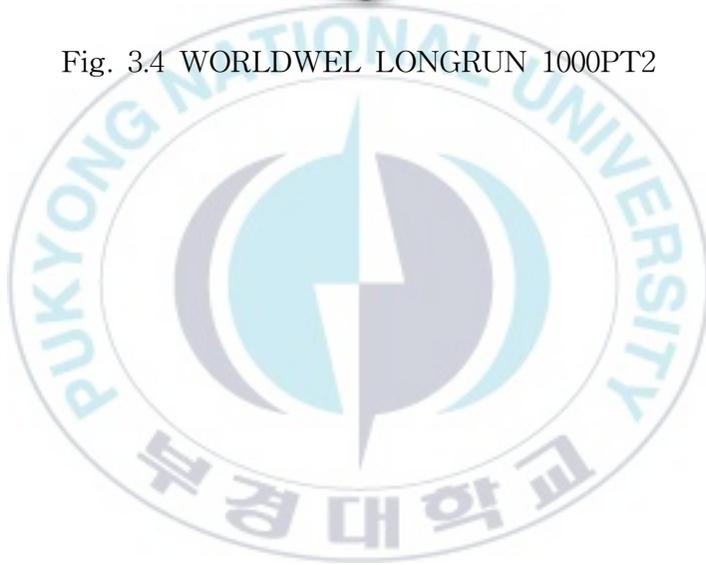
Fig. 3.3 Definitions of welding system

Table 3.3 Welding conditions used by Inconel 625 Φ 1.2mm wire

Fixed	Base metal	SS400, T 10
	Filler metal	Inconel 625 (Φ 1.2mm)
	Feed rate(cpm)	387.8
	Shield gas(L/min)	Ar + H 7%
	Current(A)	300
	Welding speed(cpm)	20
	Deposition rate(kg/h)	2.0
Varied	Deposition area(mm ²)	21
	Arc length(mm)	4→6
	Filler height(mm)	0→2



Fig. 3.4 WORLDWEL LONGRUN 1000PT2



3.2.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 3.5는 원형 와이어를 사용한 실험에서의 Arc length가 4mm, Filler height가 0mm로 일정할 때의 실험 결과이다. Fig 3.5 (a)는 이 때의 비드 외관을 나타낸 것이고, (b)는 모니터링 장비를 사용하여 측정한 전류와 Arc 전압의 전체 파형을 나타낸 것이며, (c)는 상부 Filler 전압과 하부 Filler 전압의 전체 파형을 나타낸 것이다. 정전류특성을 가지는 TIG 용접의 일정한 전류 출력특성을 확인할 수 있고, Arc length와 Filler height의 변동이 없어 일정한 전압 출력파형을 확인할 수 있다.



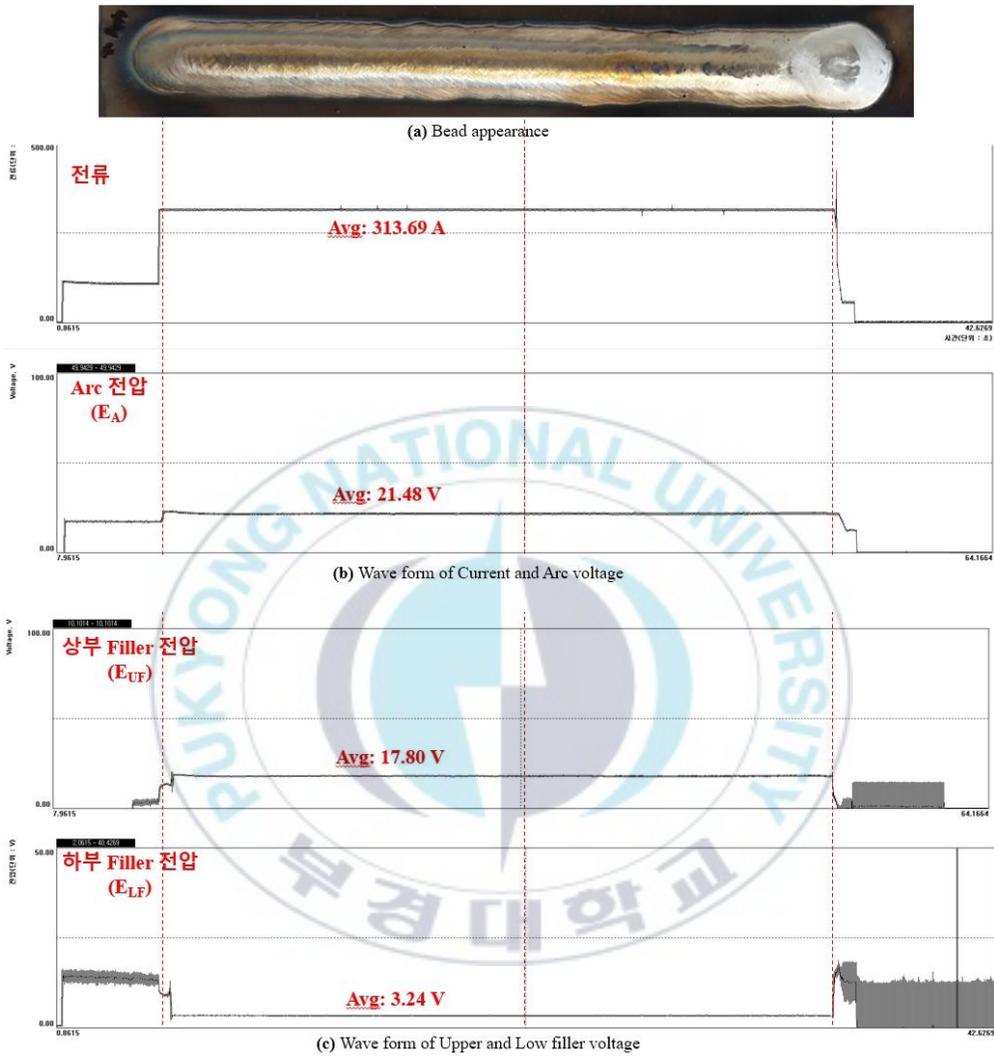


Fig. 3.5 Bead appearance and Wave forms for normal welding with circular wire (Inconel 625)

Fig. 3.6은 원형 와이어를 사용한 실험에서의 Arc length가 4mm, Filler height가 0mm에서 2mm씩 함께 증가하는 실험에서의 실험 결과이다. Fig 3.6 (a)는 이 때의 비드외관을 나타낸 것이고, (b)는 모니터링 장비를 사용하여 계측한 전류와 Arc 전압의 전체 파형을 나타낸 것이며, (c)는 상부 Filler 전압과 하부 Filler 전압의 전체 파형을 나타낸 것이다. 정전류특성을 가지는 TIG 용접의 일정한 전류 출력특성을 확인할 수 있고, Arc length와 Filler height의 변동에 따라 용적의 이행모드가 연속교락이행에서 단속교락이행으로 전환된 용접부 중심에서부터 end부까지 비드의 직진성이 나빠지고, 전압 파형이 불안정해진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3.7은 Arc length와 Filler height가 변동하였을 때 이행모드가 3사이클 변할 때의 확대 파형을 나타낸 것이다. (a)는 전극과 모재 사이의 Arc 전압, (b)는 전극과 용가재 사이의 상부 Filler 전압, (c)는 용가재와 모재 사이의 하부 Filler 전압의 확대 파형이다. Arc length가 4mm에서 6mm로 증가하고, Filler height가 0mm에서 2mm로 증가함에 따라 용적의 이행모드가 연속교락이행에서 용적이 성장하는 Separation 단계와 용적이 이행하는 Bridging 단계로 나뉘어 나타나는 단속교락이행으로 변하게 된다. (a)에서 Arc 전압이 22.02 V에서 단속교락이행의 Bridging 시 23.46 V, Separation 시 25.76 V로 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 Arc length가 증가함에 따라 Arc 전압 또한 이에 비례하여 증가하는 TIG 용접의 특성을 확인할 수 있다. 또한, 쇠파를 타고 전류가 모재로 흐르지 못하고 아크 Plasma를 타고 모재로 흘러가기 때문에 더욱 높은 전압강하가 발생하는 것을 알 수 있다. 이 경우 높은 아크력으로 인한 험평비드의 발생 우려가 높아지고, 불안정한 이행으로 인한 용접비드 품질이 낮아지게 된다. 상부 Filler 전압의 경우 Bridging 시 19.20 V에서 Separation 시 13.81 V로 감소함을 확인할 수 있는데, Separation 발생 시 고유저항이

낮은 용융 와이어의 bridge를 타고 전류가 흐르지 못하기 때문에 용가재로의 bypass 전류가 감소하여 상부 Filler 전압이 감소한다. 하부 Filler 전압의 경우 Bridging 시 3.42 V에서 Separation 시 10.92 V로 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 낮은 고유저항을 가지는 Bridge를 타고 전류가 흐를 때와는 달리 Separation 시 고유저항이 상대적으로 높은 아크 Plasma 공간을 타고 전류가 흐르기 때문에 전압강하가 크게 나타난다.

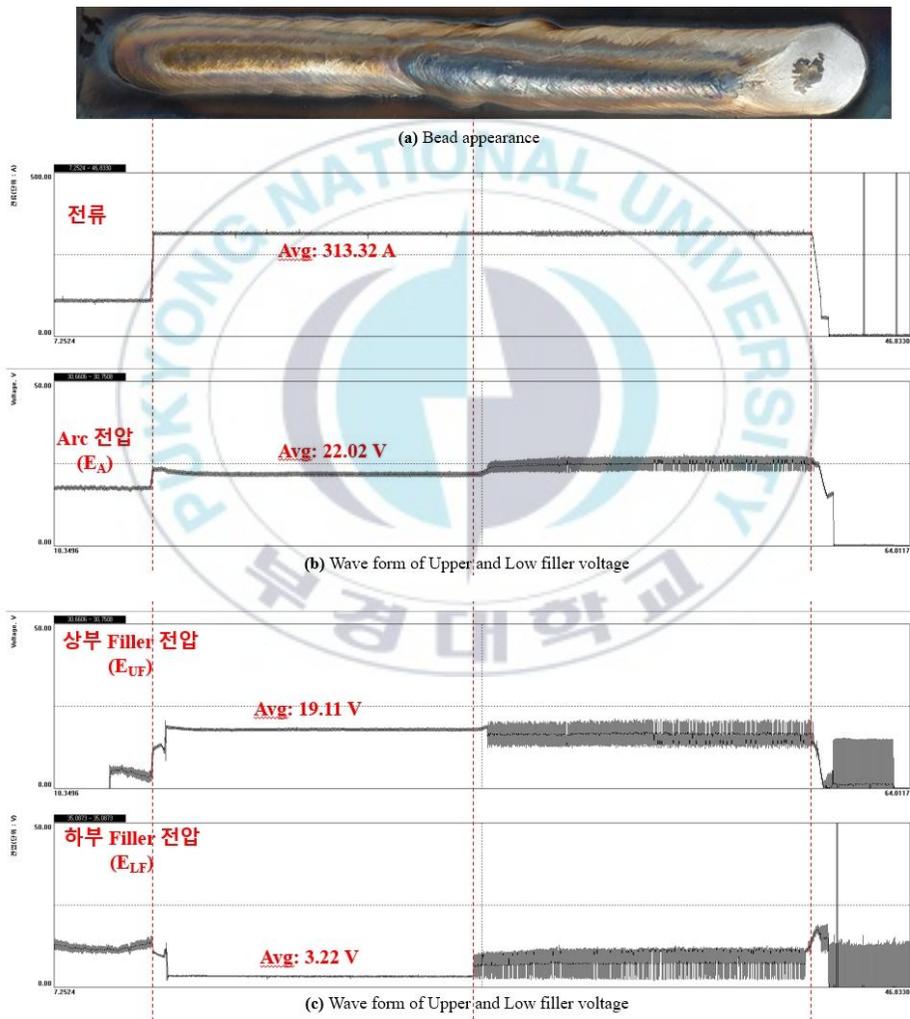


Fig. 3.6 Bead appearance and Wave forms for changing arc length

with circular wire (Inconel 625)

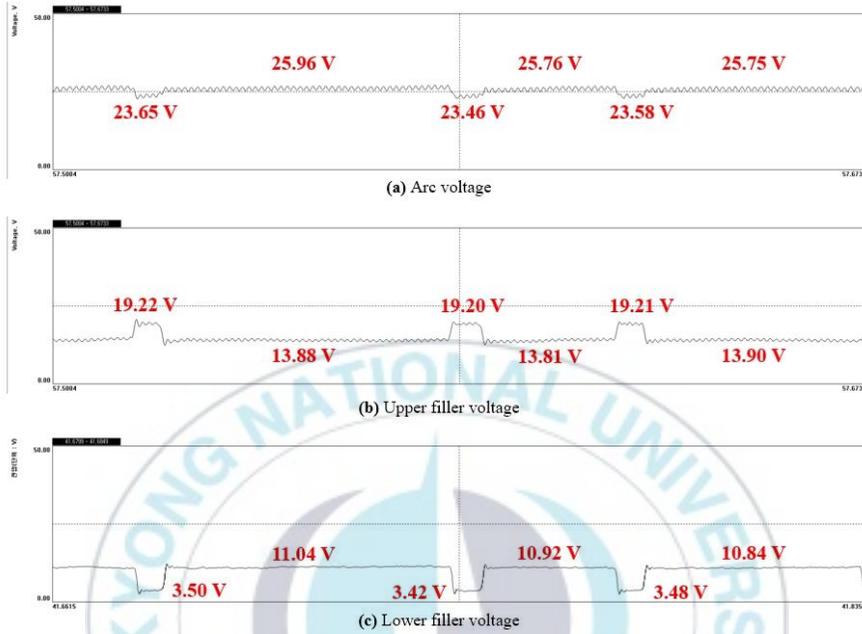


Fig. 3.7 Wave forms during about 3 cycles of metal transfer for changing arc length with circular wire (Inconel 625)

Fig. 3.8은 원형 와이어를 사용한 실험에서의 Arc length가 6mm로 일정하고, Filler height가 0mm에서 2mm로 증가하는 실험에서의 실험 결과이다. 이 실험에서 Arc length가 4mm로 실험을 진행할 경우 Filler height가 2mm 증가하게 되면 전극과 와이어가 접촉할 위험이 높아져 Arc length를 6mm로 진행하였다. Fig 3.8 (a)는 이 때의 비드외관을 나타낸 것이고, (b)는 모니터링 장비를 사용하여 측정한 전류와 Arc 전압의 전체 파형을 나타낸 것이며, (c)는 상부 Filler 전압과 하부 Filler 전압의 전체 파형을 나타낸 것이다. 앞선 실험과 동일하게 정전류특성을 가지는 TIG 용접의 일정한 전류 출력특성을 확인할 수 있고, Filler height의 변동에 따라 용적의 이행모드가 연속교락이행에서 단속교락이행으로 전환된 용접부 중심에서부터 end부까지 비드의 직진성이 나빠지고, 전압 파형이 불안정해진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3.9는 Filler height가 변동하였을 때 이행모드가 3사이클 변할 때의 확대 파형을 나타낸 것이다. (a)는 전극과 모재 사이의 Arc 전압, (b)는 전극과 용가재 사이의 상부 Filler 전압, (c)는 용가재와 모재 사이의 하부 Filler 전압의 확대 파형이다. Fig. 3.7과 동일하게 Filler height가 증가하여 단속교락이행이 발생한 경우 Separation시 E_A 와 E_{LF} 는 증가하고, E_{UF} 는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Arc length의 증가 유무와 관계없이 Filler height에 따른 용적의 이행모드 변화에 따라 전압의 특성이 달라짐을 의미한다.

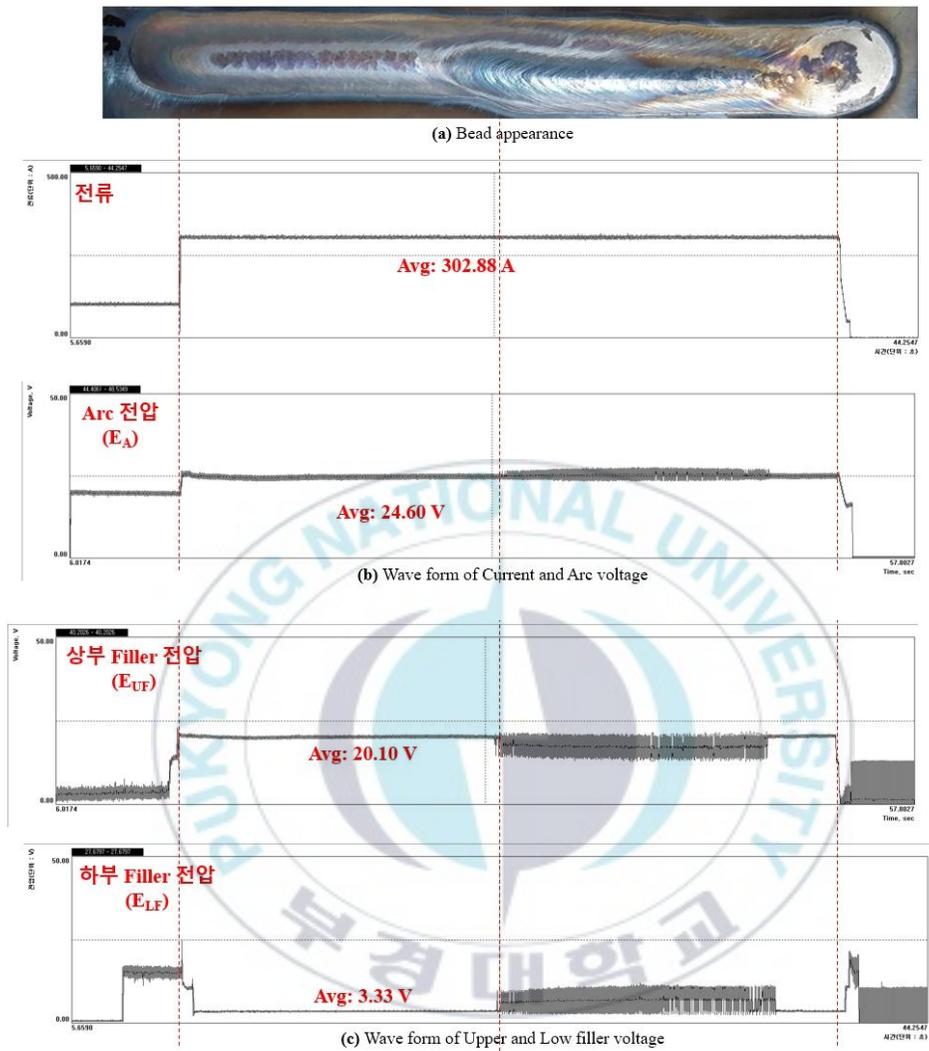


Fig. 3.8 Bead appearance and Wave forms for changing filler height with circular wire (Inconel 625)

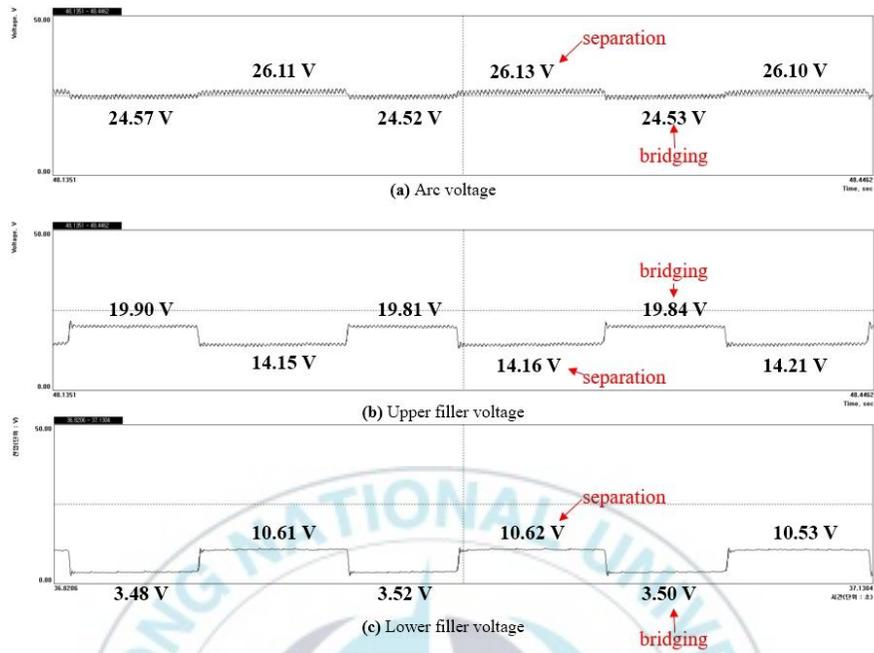
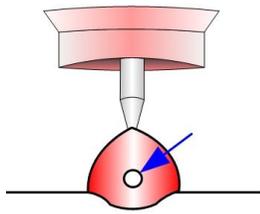
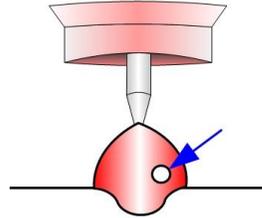


Fig. 3.9 Wave forms during about 3 cycles of metal transfer for changing filler height with circular wire (Inconel 625)

Fig. 3.6 (b), (c)와 Fig. 3.8 (b), (c)에서 Separation이 발생하는 영역을 살펴보면 Separation과 Bridge가 발생하는 주기가 일정하지 않은 것을 확인할 수 있는데, 이는 폭이 좁고 단면적이 작은 원형 와이어의 특성 상 높은 용착속도로 용접하는 경우 높은 송급속도로 용가재를 송급하게 되고, 이 때 용가재의 횡방향, 상하방향으로의 이동이 커서 아크 플라즈마의 중앙으로 송급을 일정하게 유지하는 것이 어렵게 되고, 일정한 Separation time을 가지기 어렵다. 또한, 높은 전류밀도의 아크 플라즈마 중심을 벗어난 위치에 송급된 빠른 송급속도의 원형 와이어는 아크 직하에서 용융되지 못하고 아크 후방까지 송급되어 sticking을 유발할 수 있고, 용가재가 받아주지 못한 높은 전류밀도의 아크 플라즈마가 모재의 molten pool로 바로 입사되어 험핑비드가 발생할 수 있다. Fig. 3.10은 아크 플라즈마 내부로 원형 와이어가 입사되는 것을 모식화하였으며, Fig. 3.11은 아크의 중심을 벗어난 상태로 원형 와이어가 입사되었을 때 아크의 높은 전류밀도가 molten pool로 곧바로 입사하여 용입이 깊어지고, sticking이 발생하는 것을 모델링한 것이다.



(a) Right feeding position



(b) Wrong feeding position

Fig. 3.10 Filler metal feeding position (Front view)



Fig. 3.11 Sticking due to Wrong feeding position (Side view)

3.3 C형 용가재를 사용한 GTAW에서의 용접 전압 측정 실험

3.3.1 실험 재료

본 실험에서 모재는 두께 10mm, 길이 300mm, 폭 150mm인 SS400(ASTM A283)을 사용하였으며, 모재의 형상은 원형 와이어를 사용한 실험의 Fig. 3.2과 동일하다. 용가재는 폭이 5.0mm인 C형 용가재를 사용하였고, 재질은 원형 와이어와 동일한 Alloy 625를 사용하였고, 사용한 C형 용가재의 macro section을 Fig. 3.12에 나타내었다. 모재와 용가재의 화학성분 또한 원형 와이어를 사용한 Table 3.1과 Table 3.2와 동일하다. 용접용 실드가스는 원형 와이어에서와 동일하게 Ar 93%에 H₂ 7%를 혼합한 가스를 사용하였으며, 유량은 20 l/min으로 하였다. 용접기 또한 원형 와이어를 사용한 실험과 동일한 월드웰 사의 LONGRUN 1000PT2를 사용하여 실험을 진행하였다.

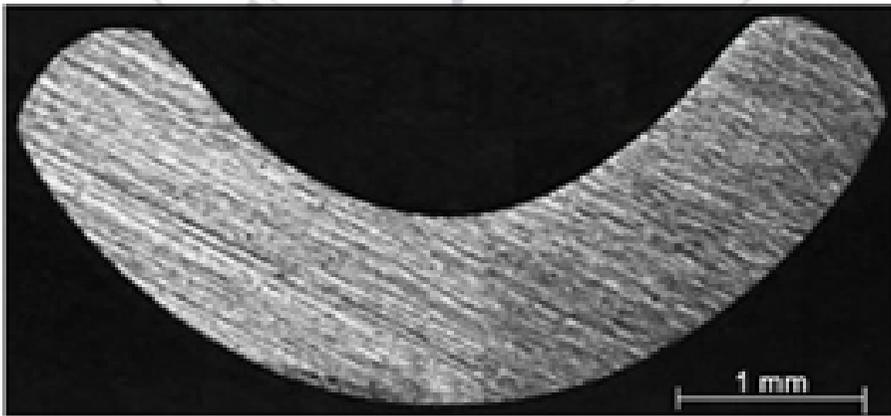


Fig. 3.12 Cross section of C-Filler

3.3.2 실험 방법

실험은 SS400 모재에 Inconel 625 용가재를 송급하며 Bead On Plate로 진행하였고, 원형 와이어를 사용하는 일반 GTAW와 폭 넓은 C-Filler를 사용하는 GTAW의 용접 전압과 용적 이행 현상을 비교하기 위해 용접과 형 모니터링 시스템을 통해 용접 전류, 전압을 계측하였다. Arc 전압을 측정하기 위해 전압센서를 전극(-)과 모재(+)에 부착하였고, 상부 Filler 전압을 측정하기 위해 전압센서를 전극(-)과 가이드프론트(+)에 부착하였으며, 하부 Filler 전압을 측정하기 위해 전압센서를 가이드프론트(-)와 모재(+)에 부착하였다. 세부적인 용접 조건은 Table 3.4에 나타내었다.

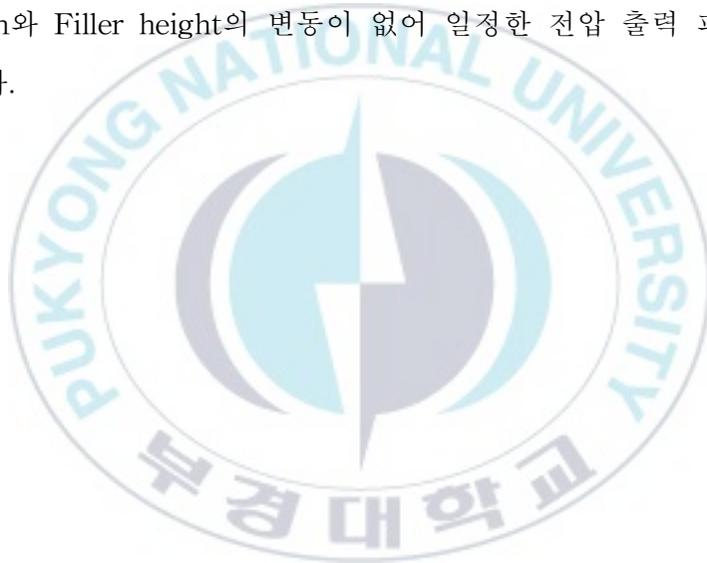
용가재 형상에 따라 아크의 입사면적이 달라짐을 고려하여 아크 길이(Arc length)를 6mm로 설정하였고, 용적의 이행모드에 따른 전압의 특성을 파악하기 위해 용가재와 모재 사이의 송급 높이(Filler Height)를 0mm에서 2mm로 증가시키며 실험을 진행하였다. 송급 높이를 증가함에 따라 Arc length가 함께 2mm 증가하는 실험과, Arc length는 일정한 상태에서 Filler height만 증가하는 실험을 각각 진행하였다.

Table 3.4 Welding conditions used by Inconel 625 C-Filler

Fixed	Base metal	SS400, T 10
	Filler metal	Inconel 625 C-Filler (5mm ²)
	Feed rate(cpm)	84
	Shield gas(L/min)	Ar + H 7%
	Current(A)	300
	Welding speed(cpm)	20
	Deposition rate(kg/h)	2.0
	Deposition area(mm ²)	21
Varied	Arc length(mm)	6→8
	Filler height(mm)	0→2

3.3.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 3.13은 C형 용가재를 사용한 실험에서의 Arc length가 6mm, Filler height가 0mm로 일정할 때의 실험 결과이다. Fig 3.13 (a)는 이 때의 비드외관을 나타낸 것이고, (b)는 모니터링 장비를 사용하여 측정한 전류와 Arc 전압의 전체 파형을 나타낸 것이며, (c)는 상부 Filler 전압과 하부 Filler 전압의 전체 파형을 나타낸 것이다. 원형 와이어와 동일하게 정전류특성을 가지는 TIG 용접의 일정한 전류 출력특성을 확인할 수 있고, Arc length와 Filler height의 변동이 없어 일정한 전압 출력 파형을 확인할 수 있다.



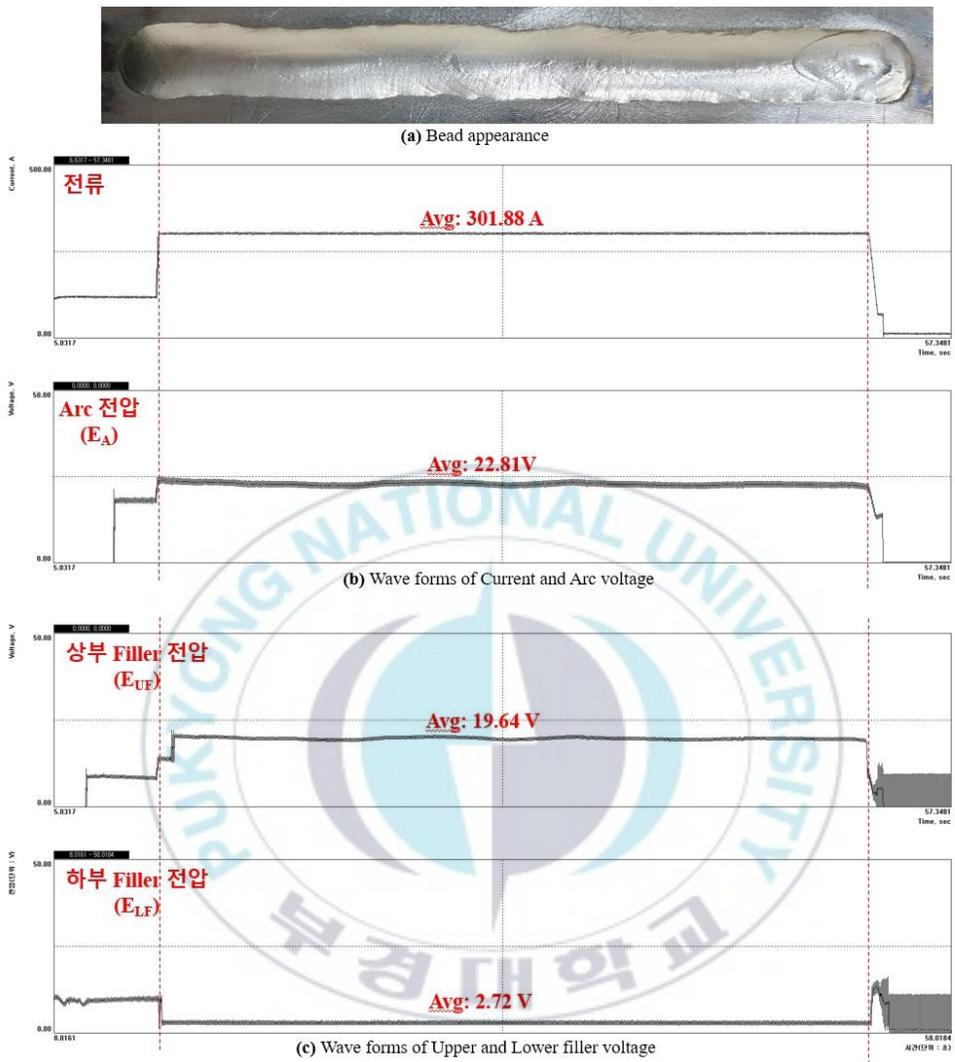


Fig. 3.13 Bead appearance and Wave forms for normal welding with C-Filler (Inconel 625)

Fig. 3.14는 C형 용가재를 사용한 실험에서의 Arc length가 6mm, Filler height가 0mm에서 2mm씩 함께 증가하는 실험에서의 실험 결과이다. Fig 3.14 (a)는 이 때의 비드 외관을 나타낸 것이고, (b)는 모니터링 장비를 사용하여 측정한 전류와 Arc 전압의 전체 파형을 나타낸 것이며, (c)는 상부 Filler 전압과 하부 Filler 전압의 전체 파형을 나타낸 것이다. 원형 와이어를 사용한 실험에서와 동일하게 정전류특성을 가지는 TIG 용접의 일정한 전류 출력특성을 확인할 수 있고, 단속교락이행이 생겼을 때 전압 파형의 변동특성이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3.15는 Arc length와 Filler height가 변동하였을 때 이행 모드가 3 사이클 변하는 동안의 확대 파형을 나타낸 것이다. (a)는 전극과 모재 사이의 Arc 전압, (b)는 전극과 용가재 사이의 상부 Filler 전압, (c)는 용가재와 모재 사이의 하부 Filler 전압의 확대 파형이다. Arc length가 6mm에서 8mm로 증가하고, Filler height가 0mm에서 2mm로 증가함에 따라 용적의 이행 모드가 연속교락이행에서 용적이 단속교락이행으로 변하게 된다. (a)에서 Arc 전압이 22.64 V에서 단속교락이행의 Bridging 시 23.48V, Separation 시 26.18 V로 증가한 것을 확인할 수 있고, 상부 Filler 전압의 경우 Bridging 시 20.22 V에서 Separation 시 13.63 V로 감소함을 확인할 수 있으며, 하부 Filler 전압의 경우 Bridging 시 2.86 V에서 Separation 시 12.03 V로 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 원형 와이어를 사용한 Arc length 증가 실험과 동일한 전압 출력 특성을 확인할 수 있다.

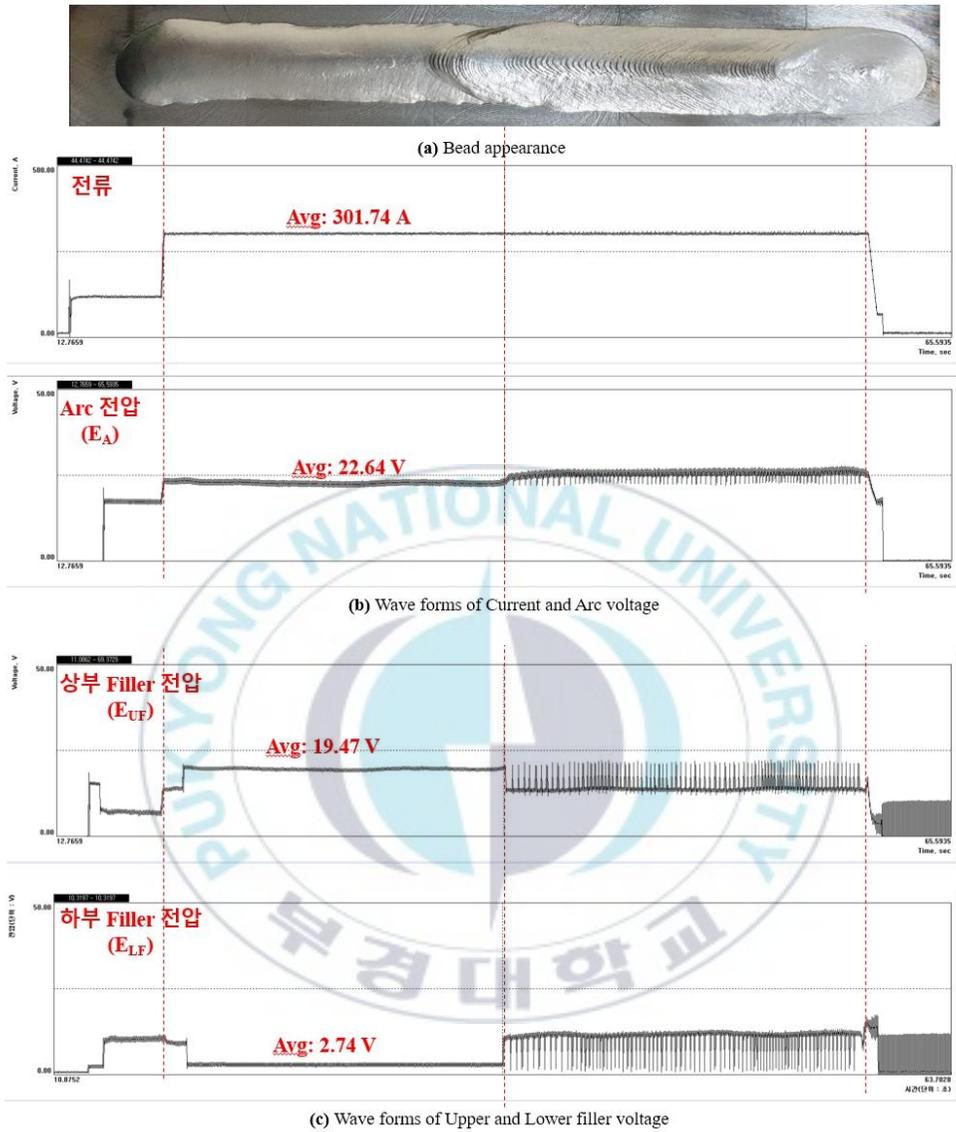


Fig. 3.14 Bead appearance and Wave forms for changing arc length with C-Filler (Inconel 625)

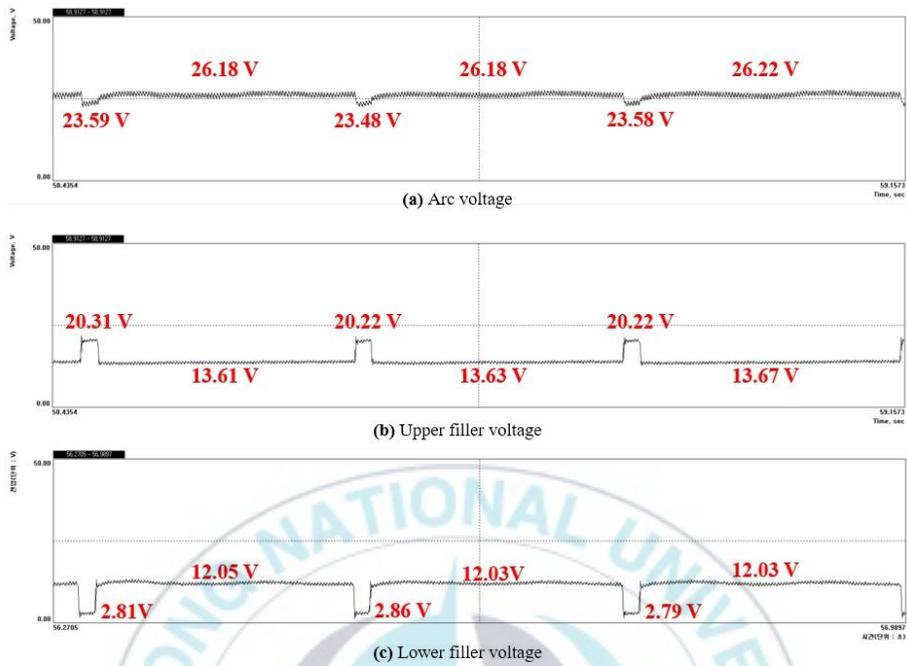


Fig. 3.15 Wave forms during about 3 cycles of metal transfer changing arc length with C-Filler (Inconel 625)

Fig. 3.16은 C형 용가재를 사용하여 Arc length 6mm를 유지하며 Filler height를 0mm에서 2mm로 증가시키는 실험의 결과이다. Fig 3.16 (a)는 비드 외관, (b)는 전류와 Arc 전압의 전체 파형을 나타낸 것이고, (c)는 상부 Filler 전압과 하부 Filler 전압의 전체 파형을 나타낸 것이다. 앞선 실험들과 동일하게 일정한 전류 출력을 확인할 수 있었고, Filler height가 변하여 용적 이행 모드가 단속교락이행으로 변경된 비드의 중심부에서 End부까지 비드의 외관이 불량하고 전압파형 또한 변동특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

Fig. 3.17은 Filler height가 변동하였을 때 이행 모드가 3사이클 변할 때의 확대 파형을 나타낸 것이다. (a)는 전극과 모재 사이의 Arc 전압, (b)는 전극과 용가재 사이의 상부 Filler 전압, (c)는 용가재와 모재 사이의 하부 Filler 전압의 확대 파형이다. Bridging과 Separation이 반복적으로 나타남에 따라 일정한 전압 변동 특성을 띄는 것을 확인할 수 있다.

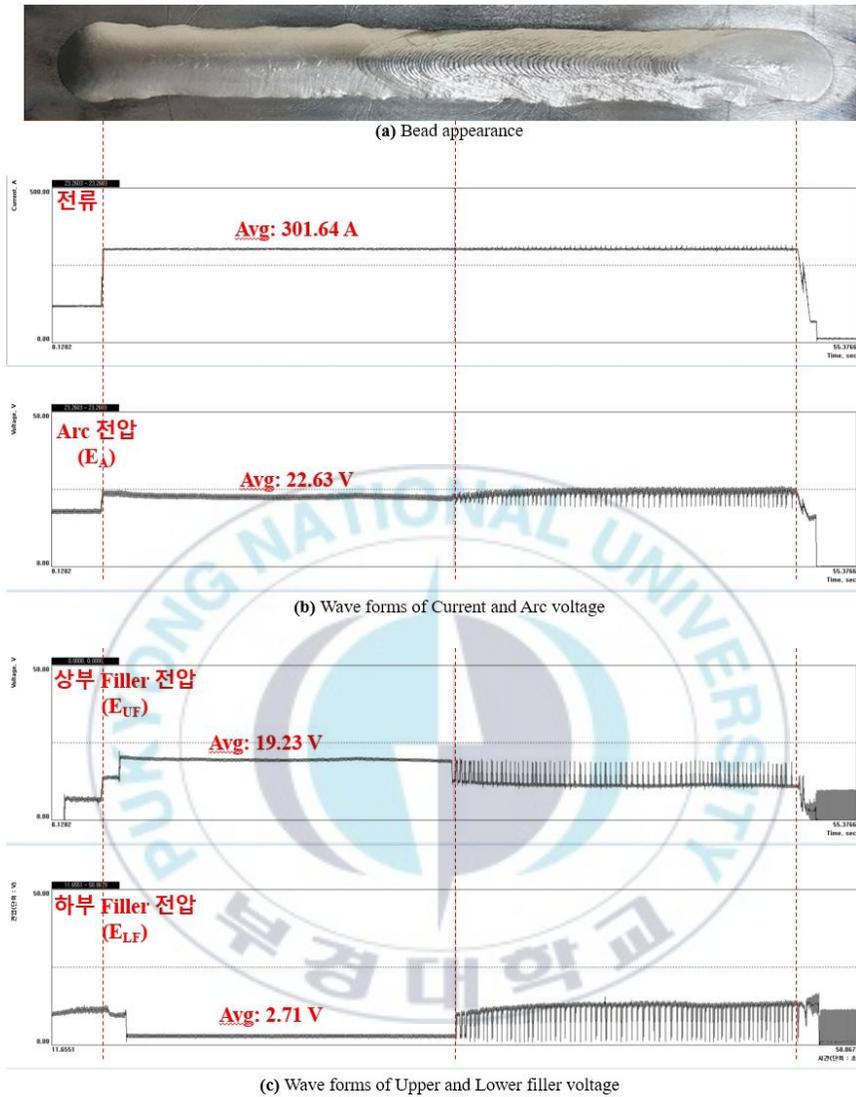


Fig. 3.16 Bead appearance and Wave forms for changing filler height with C-Filler (Inconel 625)

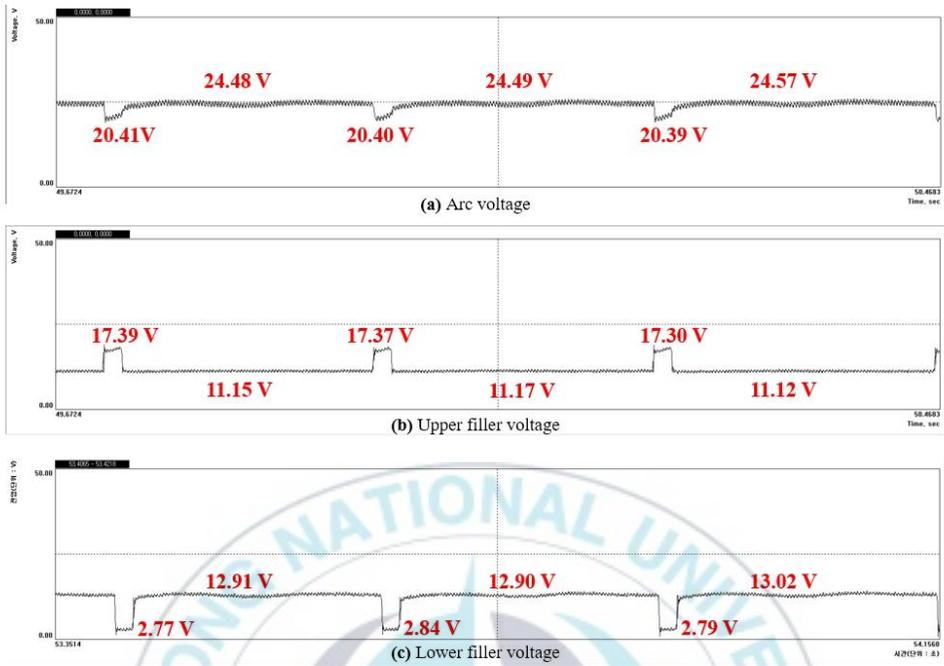


Fig. 3.17 Wave forms during about 3 cycles of metal transfer changing filler height with C-Filler (Inconel 625)

Fig. 3.14 (b), (c)와 Fig. 3.16 (b), (c)에서 Separation이 발생하는 영역을 살펴보면 Separation과 Bridge가 발생하는 주기가 원형 와이어와는 다르게 일정한 것을 확인할 수 있다. C형 용가재는 5mm의 넓은 폭과 C curve 형상을 가지고 있어 용가재의 횡방향과 상하방향 이동이 적어 아크 플라즈마 내부에 일정한 위치로 공급될 수 있다. 또한, C형 용가재는 전극 끝단과 거리가 가까운 양쪽 날개부분에서 먼저 용융이 일어나, Molten metal이 용가재의 표면을 타고 가장 위치가 낮은 용가재 Center로 흘러 모재의 Molten pool로 Bridge를 타고 이행하기 때문에 굵은 Bridge가 형성되어 이행이 안정적이다.⁶⁾ 따라서, 고전류를 사용한 높은 용착속도에서도 아크 중심의 높은 전류밀도를 용가재가 받아 모재로 향하는 전류밀도가 낮기 때문에 험핑비드를 예방할 수 있다. Fig. 3.18은 Plasma Stream 내에서 C형 용가재가 용융되어 Bridge가 발생하는 모식도를 나타낸 것이다. 아크 전방에서 C형 용가재의 양쪽 날개부분이 먼저 용융되고, 용가재의 중심부분은 전극 직하까지 공급되어 높은 전류밀도를 받아주는 것을 확인할 수 있다. 원형 와이어와 C형 용가재를 같은 아크 길이에서 각각 실험한 것을 비교해보면 Fig. 3.9 (a)에서 Bridging 시 Arc 전압은 24.52 V인 반면 Fig 3.17 (a)에서 Bridging 시 Arc 전압은 20.40 V인 것을 확인할 수 있다. 용가재 형상에 따라 모재로 입사되는 전류밀도가 달라지는 것을 알 수 있고, C형 용가재가 고전류, 고용착속도의 자동용접 조건에서 더욱 안정적인 용접이 가능한 것으로 판단된다.

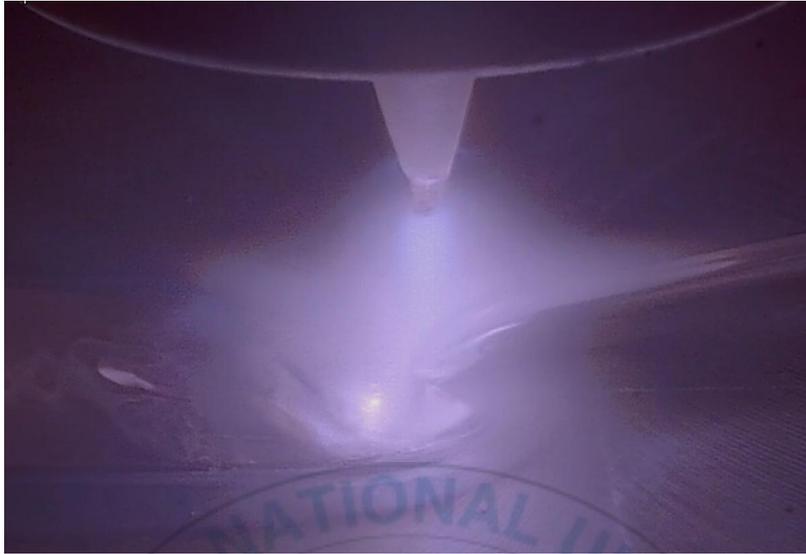
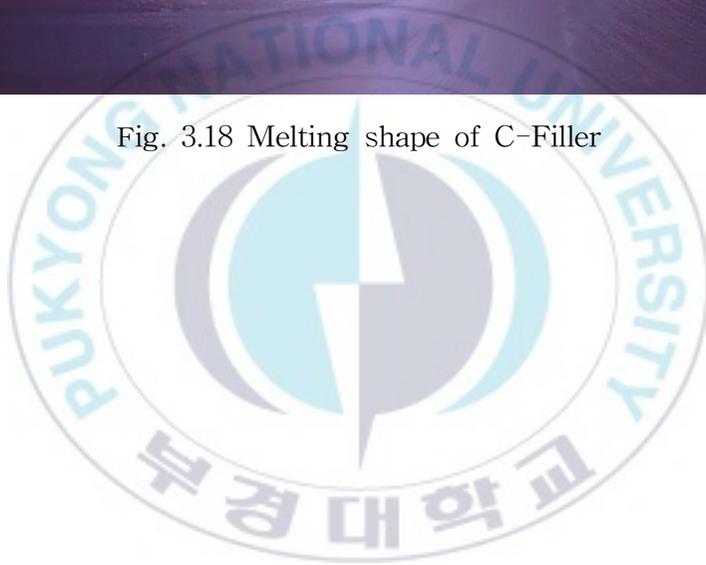


Fig. 3.18 Melting shape of C-Filler



3.4 결론

기존 원형 와이어를 사용하는 GTAW와 C형 용가재를 사용하는 GTAW에서 용가재 형상에 따른 용적 이행 안정성을 비교하기 위하여 동일 용착속도로 용접을 진행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 원형 와이어를 사용하는 GTAW에서 Filler height가 변하는 경우 용적의 이행 모드가 연속교락이행에서 단속교락이행으로 변하게 되고, 이행모드가 전환된 용접부 중심에서부터 end부까지 비드의 직진성이 나빠지고, Separation과 Bridging이 교차하여 발생하는 동안 E_A , E_{UF} , E_{LF} 전압파형이 불안정해진 것을 확인할 수 있었다.

2) C형 용가재를 사용하는 GTAW의 경우 원형 와이어를 사용한 경우와 동일하게 Separation과 Bridging이 교차하여 발생하는 동안 전압 파형이 불안정하게 나타났으며, 동일한 현상을 나타냄을 확인할 수 있었다. 용가재 형상이 변하더라도 용적의 이행모드에 따른 E_A , E_{LF} , E_{UF} 의 변동특성은 동일함을 알 수 있었다.

3) 같은 용착속도에서 용가재 형상에 따라 이행모드의 안정성에 차이가 있음을 확인하였다.

① 원형 와이어를 사용하는 GTAW의 경우 높은 용착속도를 위해 높은 용가재 송급속도를 사용할 경우 용가재의 횡방향 이동으로 인해 높은 아크 밀도 영역을 벗어난 위치로 송급되어 Melting rate의 편차가 커지게 되고, 상하방향 이동으로 인해 Filler height가 자주 변할 수 있어 연속교락이행의 Bridge가 분리될 위험이 큰 것으로 판단된다.

② C형 와이어를 사용하는 GTAW의 경우 폭 넓은 용가재를 사용함에 따라 용가재의 Cast와 Helix가 적어 횡방향 및 상하방향의 이동이 적고, 전극에 가까운 용가재의 양쪽 날개부분이 먼저 용융하여 형성된 용융금속

이 낮은 위치의 중앙부로 이동하여 molten pool로 이동함에 따라 아크 플라즈마 중심의 높은 아크 밀도의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다. 따라서, C형 용가재를 사용하면 높은 용착속도에서도 안정적인 연속교락이행 유지가 가능할 것으로 판단된다.



제 4장 GTAW에서 안정적인 연속교락이행을 위한 용적 이행 모드 분류 알고리즘 개발에 관한 연구

4.1 서언

소모성 전극을 사용하여 와이어 끝단이 녹아 이행하는 GMAW, FCAW 등 타 용접법과는 달리 자동 GTAW에서는 비소모성 전극에 별도의 용가재를 송급시켜 용접을 진행하기 때문에 Filler height를 자유롭게 제어할 수 있으며, 용가재의 Plasma stream 내 Melting position에 따라 적절한 Filler height로 용접하여 안정적인 연속교락이행을 유지하는 것이 중요하다. Filler height가 낮으면 연속교락이행이 발생하며, Filler height가 높으면 molten pool과 Filler metal 사이의 Separation이 발생하여 연속교락이행이 안정적으로 유지되기 어렵다. 따라서 자동 GTAW에서 안정적인 연속교락이행이 유지될 수 있도록 Filler height를 조절하여 Separation이 해소될 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다.

본 장의 연구에서는 Hastelloy C-276 C형 용가재를 사용하여 3장의 Inconel 625와 동일한 용접 조건 하에서 Arc length 및 Filler height 변경 실험을 진행하여 용가재 조성에 따른 전압 출력 특성을 비교하였고, 전압 파형을 분석하여 Separation 시 E_A , E_{UF} , E_{LF} 의 출력 특성과, Arc length 변경 유무에 따른 Separation 시의 E_A , E_{UF} , E_{LF} 의 출력 특성을 통해 자동 GTAW에 적용 가능한 안정적인 연속교락이행을 위한 용적 이행 모드 분류 알고리즘을 개발하였다.

4.2 GTAW에서 용가재 조성에 따른 Filler height 변경 실험

4.2.1 실험 재료

본 실험에서 모재는 두께 10mm, 길이 300mm, 폭 150mm인 SS400(ASTM A283)을 사용하였으며, 모재의 형상은 3장에 사용된 모재와 동일하다. 용가재는 폭이 5mm인 Hastelloy C-276 재질의 C형 용가재를 사용하였다. Table 4.1은 사용한 C-276 C형 용가재의 화학성분을 나타낸 것이다. 용접용 실드가스는 Ar 93%에 H₂ 7%를 혼합한 가스를 사용하였으며, 유량은 20 l/min으로 하였다.

Table 4.1 Chemical composition of C-276 filler metal (wt. %)

Classification	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe	S
Hastelloy C-276	0.01	0.08	1.0	16.0	57.0	16.0	5.0	0.03

4.2.2 실험 방법

3장의 실험과 동일하게 GTAW 용접시스템을 사용하였고, 추가적으로 용접카메라를 사용하여 용접부를 촬영하며 실험을 진행하였다. 실험은 SS400 모재에 Hastelloy C-276 C형 용가재를 송급하며 Bead On Plate로 진행하였고, 용가재의 재질에 따라 용적 이행모드에 따른 용접 전압 출력 특성을 비교하기 위해 용접과형 모니터링 시스템을 통해 용접 전류, 전압을 계측하였다. Arc 전압을 측정하기 위해 전압 센서를 전극(-)과 모재(+)에 부착하였고, 상부 Filler 전압을 측정하기 위해 전압 센서를 전극(-)과 가이드프론트(+)에 부착하였으며, 하부 Filler 전압을 측정하기 위해 전압 센서를 가이드프론트(-)와 모재(+)에 부착하였다. 세부적인 용접 조건은 Table 4.2에 나타내었다. 또한, 용융된 C형 용가재의 이행 현상을 관찰하기 위해 용접용 카메라를 사용하여 용접 진행 방향의 측면에서 용접부를 촬영하여 관찰하였다. 용접용 카메라는 Weldvis 사의 140dB+ HDR Welding vision camera인 WL2-H7ML-M35 모델을 사용하였다. Fig. 4.1는 사용한 카메라를 나타낸 것이다.

용가재 구성에 따른 용적 이행의 차이를 분석하기 위해 3장의 C형 용가재 사용 실험과 동일한 환경에서 실험을 진행하였다. 2kg/h의 동일한 용착속도, 동일 전류를 사용하였고, Arc length를 6mm로 설정하였으며, 용적의 이행 모드에 따른 전압의 특성을 파악하기 위해 용가재와 모재 사이의 Filler Height를 0mm에서 2mm로 증가시키며 실험을 진행하였다. 송급 높이를 증가함에 따라 Arc length가 함께 2mm 증가하는 실험과, Arc length는 일정한 상태에서 Filler height만 증가하는 실험을 각각 진행하였다.

Table 4.2 Welding conditions used by C-276 C-Filler

Fixed	Base metal	SS400, T 10
	Filler metal	Hastelloy C-276 C-Filler (5mm ²)
	Feed rate(cpm)	84
	Shield gas(L/min)	Ar + H 7%
	Current(A)	300
	Welding speed(cpm)	20
	Deposition rate(kg/h)	2.0
Varied	Deposition area(mm ²)	21
	Arc length(mm)	6~8
	Filler height(mm)	0~2



Fig. 4.1 Weldvis WL2-H7ML-M35

4.2.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 4.2는 Hastelloy C-276 C형 용가재를 사용하여 Arc length 6mm, Filler height 0mm를 유지하는 실험을 촬영한 동영상의 Snap shot이고, Fig. 4.3은 실험 결과이다. Inconel 625 C형 용가재를 사용한 실험 결과와 동일하게 일정한 전류, 전압의 출력 특성을 파형을 통해 확인할 수 있으며, 전압 값 또한 E_A , E_{UF} , E_{LF} 각각 1 V 이내의 유사한 수치를 나타냄을 나타냄을 알 수 있다. Filler height의 변동이 없는 실험 조건이기 때문에 안정적인 연속교락이행이 유지되어 비드 외관이 일정하게 나타남을 확인할 수 있다.



Fig. 4.2 Snap shot of Arc length 6mm, Filler height 0mm

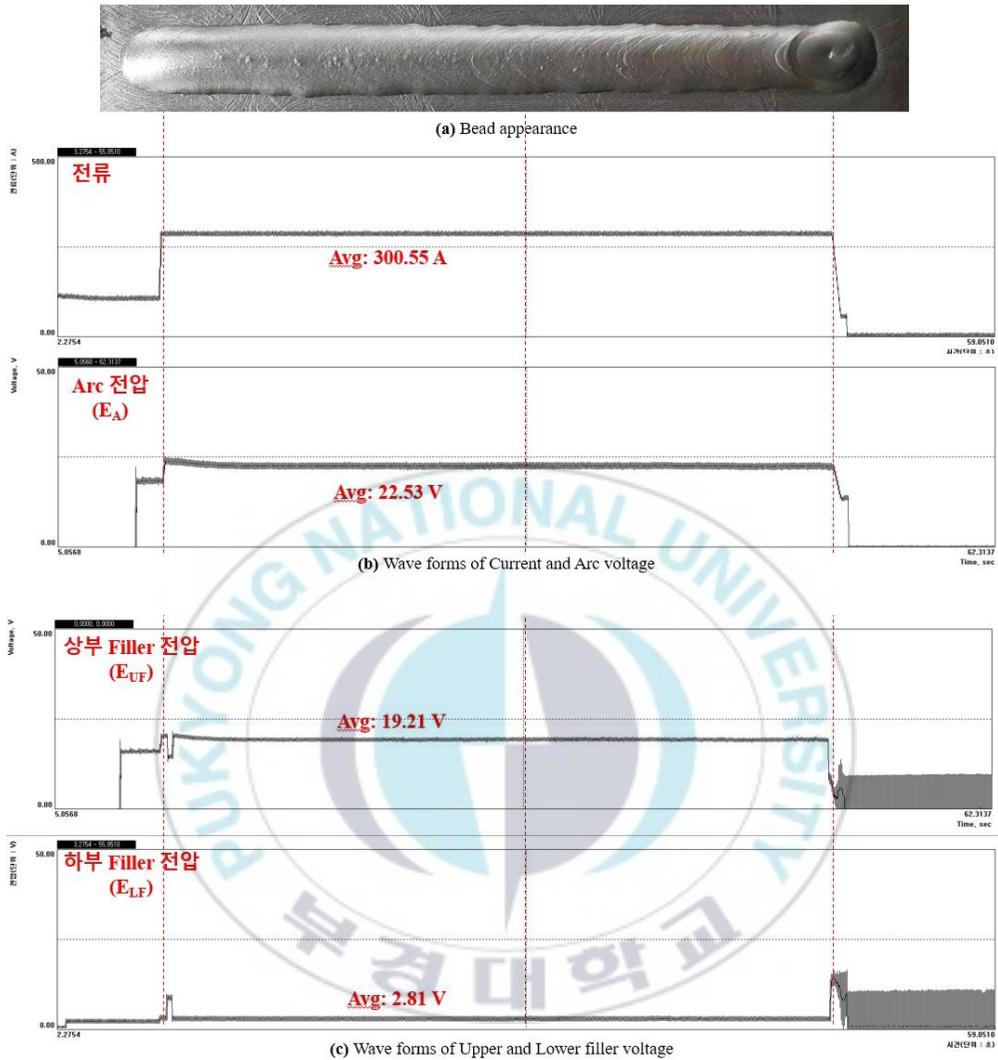


Fig. 4.3 Bead appearance and Wave forms for normal welding with C-Filler (C-276)

Fig. 4.4는 Hastelloy C-276 C형 용가재를 사용하여 Arc length 6mm, Filler height 0mm에서 각각 2mm씩 증가시키는 실험을 촬영한 영상의 snap shot이고, Fig. 4.5는 실험 결과이며, Fig. 4.6은 Filler height가 증가하여 Separation이 발생하였을 때 이행 모드가 3cycle 반복되는 동안의 확대 과형이다. Inconel 625 C형 용가재를 사용한 실험과 동일하게 E_A , E_{UF} , E_{LF} 의 출력 특성이 나타남을 확인할 수 있었다.

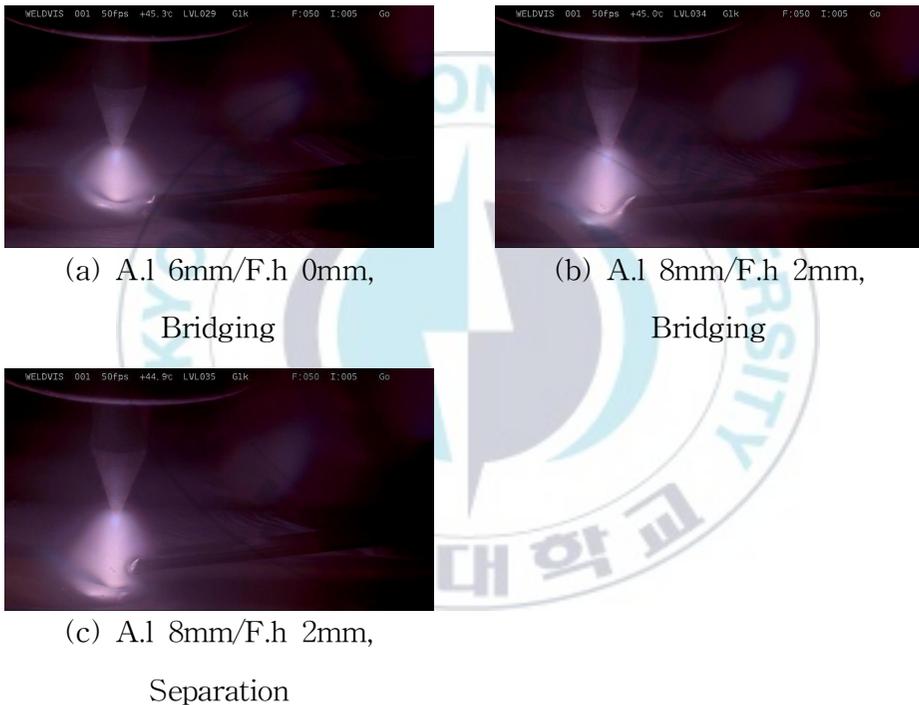


Fig. 4.4 Snap shots of Arc length 6~8mm, Filler height 0~2mm

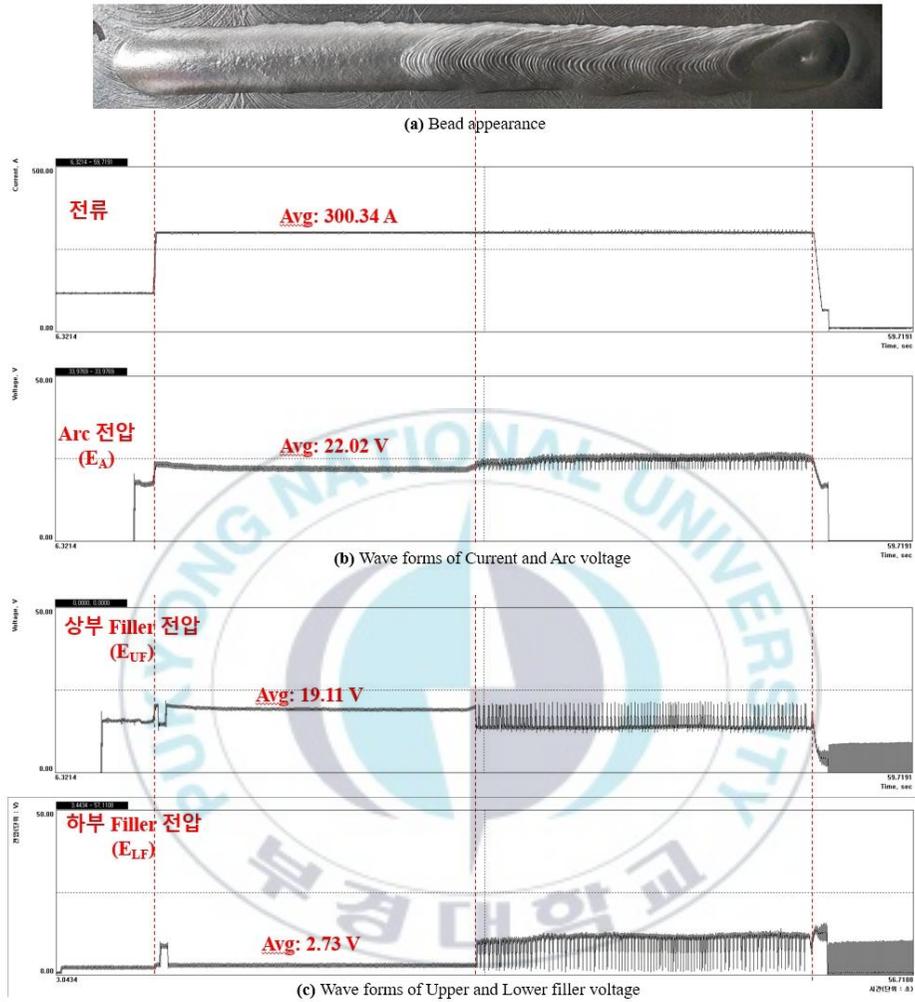


Fig. 4.5 Bead appearance and Wave forms for changing arc length with C-Filler (C-276)

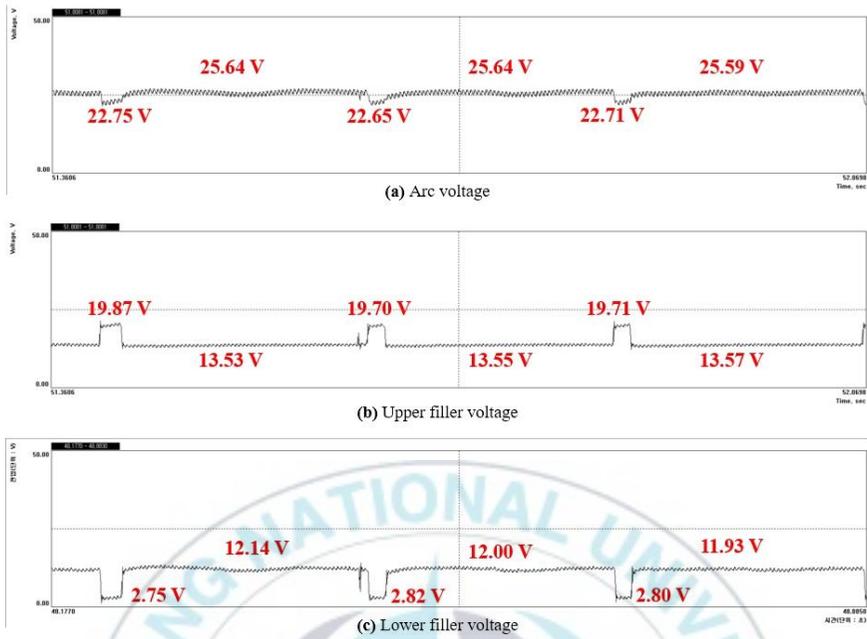


Fig. 4.6 Wave forms during about 3 cycles of metal transfer for changing arc length with C-Filler (C-276)

Fig. 4.7은 Hastelloy C-276 C형 용가재를 사용하여 Arc length 6mm를 유지하며 Filler height를 0mm에서 2mm로 증가시키는 실험을 촬영한 영상의 Snap shot이다. 폭 넓은 C형 용가재를 용융시키기 위해서 사용되는 입열이 높고, Bridge가 높은 전류밀도의 Arc plasma를 받아 낮은 용입을 유지할 수 있다. (a)와 (c)를 비교하면 Filler height 증가로 인해 Separation이 발생하는 경우 E_{UF} 의 감소로 인한 Filler current가 감소하여 용가재의 Melting edge는 아크 후방으로 이동하게 된 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.8은 실험 결과이다. Inconel 625 C형 용가재를 사용한 실험과 동일하게 Separation 발생 시 E_A , E_{UF} , E_{LF} 가 변동함을 확인할 수 있다.

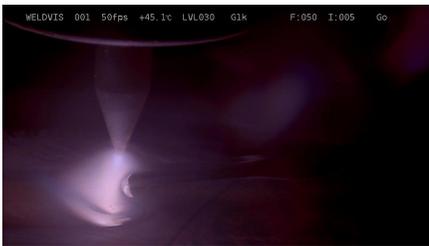
Fig. 4.9는 Filler height 증가로 인한 Separation 발생 시 Bridging과 Separation이 3차례 반복되는 동안의 확대 파형이다. 원형 와이어를 사용한 경우, Inconel 625 C형 용가재를 사용한 경우와 동일하게 Separation 발생 시 E_A 가 증가하고, E_{UF} 는 감소하며, E_{LF} 는 증가하는 경향을 나타내었다.



(a) A.l 6mm/F.h 0mm,
Bridging



(b) A.l 6mm/F.h 2mm,
Bridging



(c) A.l 6mm/F.h 2mm,
Separation

Fig. 4.7 Snap shots of Arc length 6mm, Filler height 0~2mm

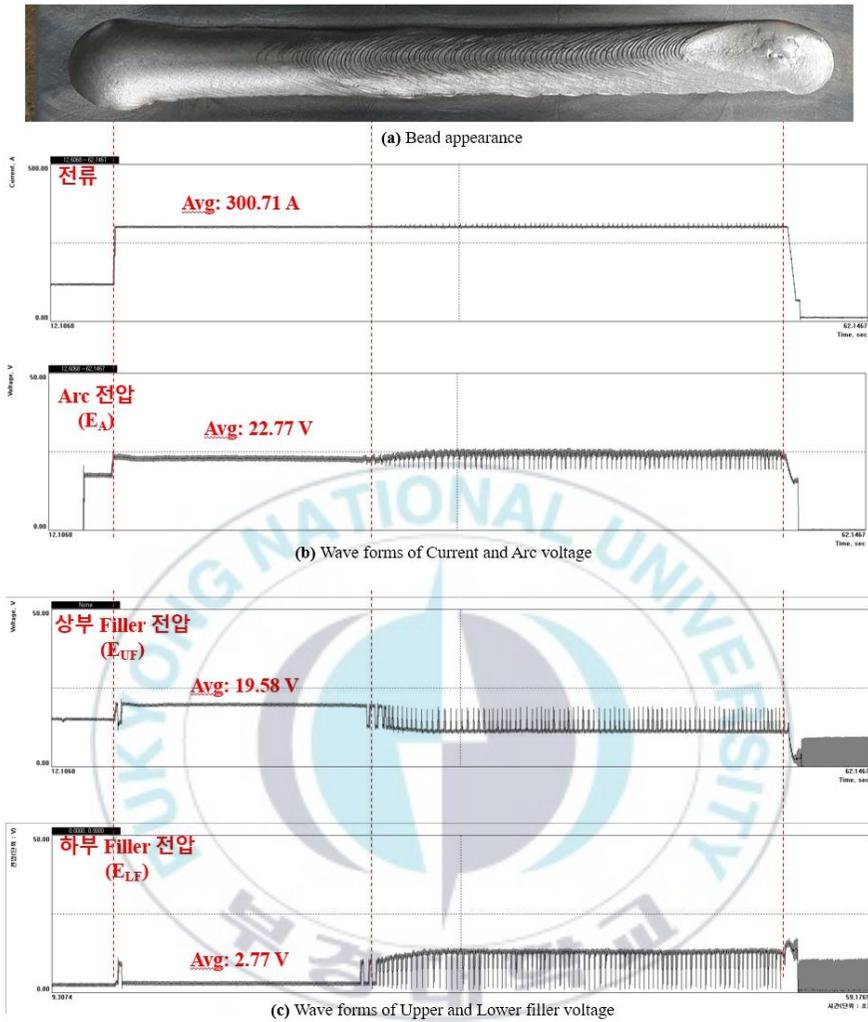


Fig. 4.8 Bead appearance and Wave forms for changing filler height with C-Filler (C-276)

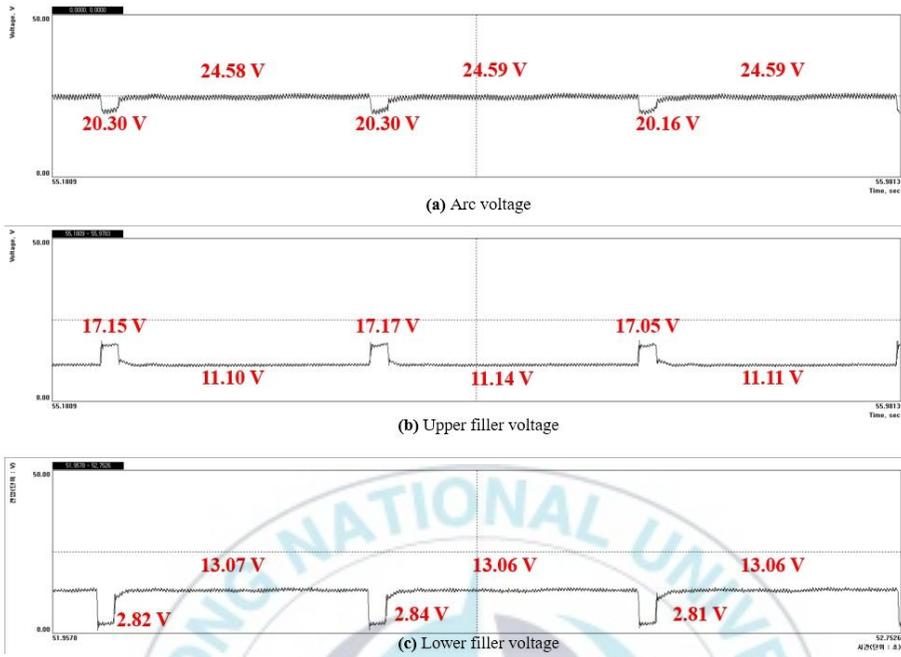


Fig. 4.9 Wave forms during about 3 cycles of metal transfer for changing filler height with C-Filler (C-276)

Sang-Eun Song 등의 연구에서 아크길이에 따라 용접 전압이 변하는 TIG용접의 특성을 이용하여 자동전압제어장치를 적용 했을 때와 적용하지 않았을 때 용접 시간에 따른 이동 평균 필터링을 적용한 전압 값에 대한 그래프를 통해 개발한 자동 전압 제어 장치에서 일정한 전압을 출력시키는 것을 확인하였다.⁷⁾ Yizhang Liu 등의 연구에서는 Current, Arc length, Arc voltage의 관계에 따라 Automatic Voltage Control(AVC)을 사용하여 GTAW에서 Arc length를 일정하게 유지할 수 있다고 하였다.⁸⁾ 해당 연구들은 Filler height를 사용하지 않는 Autogenous welding으로, 용가재를 별도로 공급하는 With filler GTAW에서는 Arc voltage만으로 안정적인 Arc length와 Filler height의 제어를 통한 연속교락이행의 유지가 불가능하다. 따라서, Arc length와 Filler height를 함께 제어하여 연속교락이행을 유지하기 위한 알고리즘의 개발이 필요하다. Fig. 4.10은 Yizhang Liu 등의 연구에서 인용한 Current, Arc length, Arc voltage의 관계에 대한 그래프이다.⁸⁾

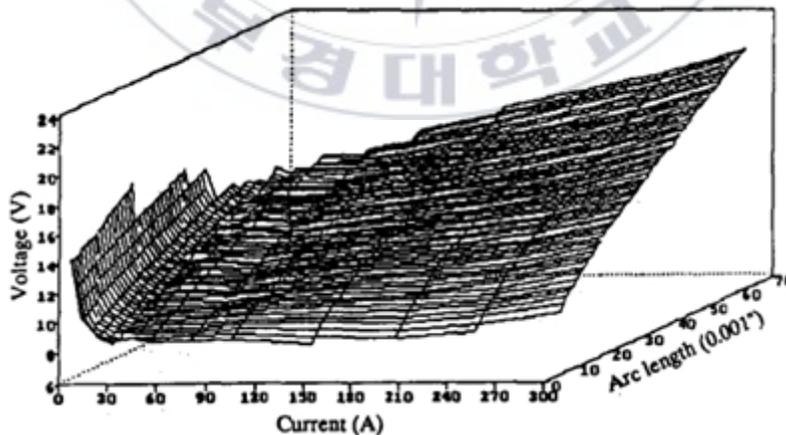


Fig. 4.10 Arc voltage changes with current and arc length⁸⁾

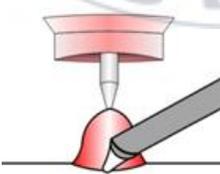
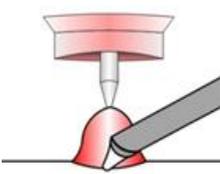
Table 4.3은 Inconel 625, Hastelloy C-276 C형 용가재를 사용한 실험에서 Arc length와 Filler height 변경 유무에 따라 나타난 용적 이행 모드에 따라 E_A , E_{UF} , E_{LF} 의 값을 정리한 것이다. Filler height가 증가하여 용융된 용가재가 모재로 흘러들어가는 Bridge가 끊어지고 Separation이 발생하는 경우 E_{LF} 는 2.8 V 내외에서 12~13 V로 증가하는 것을 확인할 수 있다. Bridging 시 고유저항이 낮은 액체 용융금속을 타고 전류가 흐르기 때문에 낮은 전압강하가 걸리는 반면 Separation 시 저항이 상대적으로 높은 Plasma stream 공간을 타고 전류가 흐르기 때문에 전압강하가 높게 나타나는 것으로 판단된다. 또한, Arc length가 증가하는 경우 Separation 시 E_{UF} 가 E_{LF} 보다 높게 나타나는 반면, Arc length가 일정한 경우 Separation 시 E_{UF} 가 E_{LF} 보다 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2.12에서 Arc length가 증가함에 따라 용입이 얇아지기 때문에 같은 2mm의 Filler height라도 Arc length가 증가한 경우 molten pool에서 전극 직하의 depression이 얇아 C-Filler의 끝단에서 molten pool 표면까지의 거리가 짧은 것으로 판단되고, 이에 따라 Arc length가 증가하였을 때 Separation 시 E_{LF} 가 Arc length가 일정한 경우에서보다 더 작게 나타난 것으로 판단된다. 또한, E_{UF} 는 Arc length와 Filler height가 함께 증가한 경우 전극에서 용가재까지의 거리가 일정하지만, Arc length가 일정한 경우는 전극에서 용가재까지의 거리가 감소하기 때문에 이 때의 E_{UF} 가 더 작은 것으로 판단된다. Table 4.4는 Arc length와 Filler height의 변동에 따른 용적 이행 모드의 모식도와 E_{UF}/E_{LF} 를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 4.3 Comparison E_A , E_{UF} , E_{LF} according to changed by Arc length and Filler height

[Unit: V]

C-Filler		Inconel 625			Hastelloy C-276		
		E_A	E_{UF}	E_{LF}	E_A	E_{UF}	E_{LF}
Normal	Bridging	22.81	19.64	2.72	22.53	19.21	2.81
Arc length Filler height Increasing	Separation	26.18	13.63	12.03	25.64	13.55	12.00
	Bridging	23.48	20.22	2.86	22.65	19.70	2.82
Only Filler height Increasing	Separation	24.49	11.17	12.90	24.59	11.14	13.06
	Bridging	20.40	17.37	2.84	20.30	17.17	2.84

Table 4.4 Schematics of metal transfer mode and Comparison E_{UF}/E_{LF} according to changed by Arc length and Filler height

C-Filler	Before changing	After changing	E_{UF}/E_{LF}
Normal welding			>5
Arc length, Filler height Increasing			>1
Only Filler height Increasing			<1

이행 모드의 차이에 따른 E_{LF} 의 차이와, Arc length의 변동 유무에 따른 E_{UF}/E_{LF} 의 차이를 이용하여 일정한 Arc length와 안정적인 연속교락이행을 유지하기 위한 용적 이행 모드 분류 알고리즘을 개발할 수 있다. Fig. 4.11은 C형 용가재를 사용한 자동용접에 적용할 수 있는 용적 이행 모드 분류 알고리즘이다. 용접개시 신호가 들어간 후 용접이 진행되는 동안 모재의 fit up 상태, 용가재의 cast 등으로 인한 Filler height 증가로 Separation 발생 시 E_{LF} 는 5 V 이상의 값이 발생하게 된다. 이 때 Separation이 발생한 것으로 제어장치가 인식하게 되면 용접토치와 모재 사이의 거리가 증가하여 Arc length와 Filler height가 함께 증가하였는지, 용가재의 송급위치가 변하여 Filler height만 증가하였는지를 구분하여 판단할 필요성이 생기게 된다. 이 때, E_{UF}/E_{LF} 의 값을 고려하여 두 Filler 전압의 비가 1보다 큰 경우 Arc length가 증가한 경우로 판단하여 토치의 높이를 감소시킴으로서 Separation을 해소하게 된다. 반면 두 Filler 전압의 비가 1보다 작은 경우 Filler height만 증가한 것으로 판단하여 용가재의 위치를 더욱 아래로 내려 송급함으로서 Separation을 해소하게 된다. 전압 파형이 안정화되고 정상적인 용접이 진행되는 경우 다시 E_{LF} 값을 고려하여 Separation이 발생 유무를 파악하는 단계를 반복하고, 아크 종료 신호로 인해 용접이 종료되면 용적 이행 모드 분류 알고리즘 또한 종료하여 안정적인 연속교락이행을 유지하는 자동용접을 진행할 수 있게 될 것으로 판단된다.

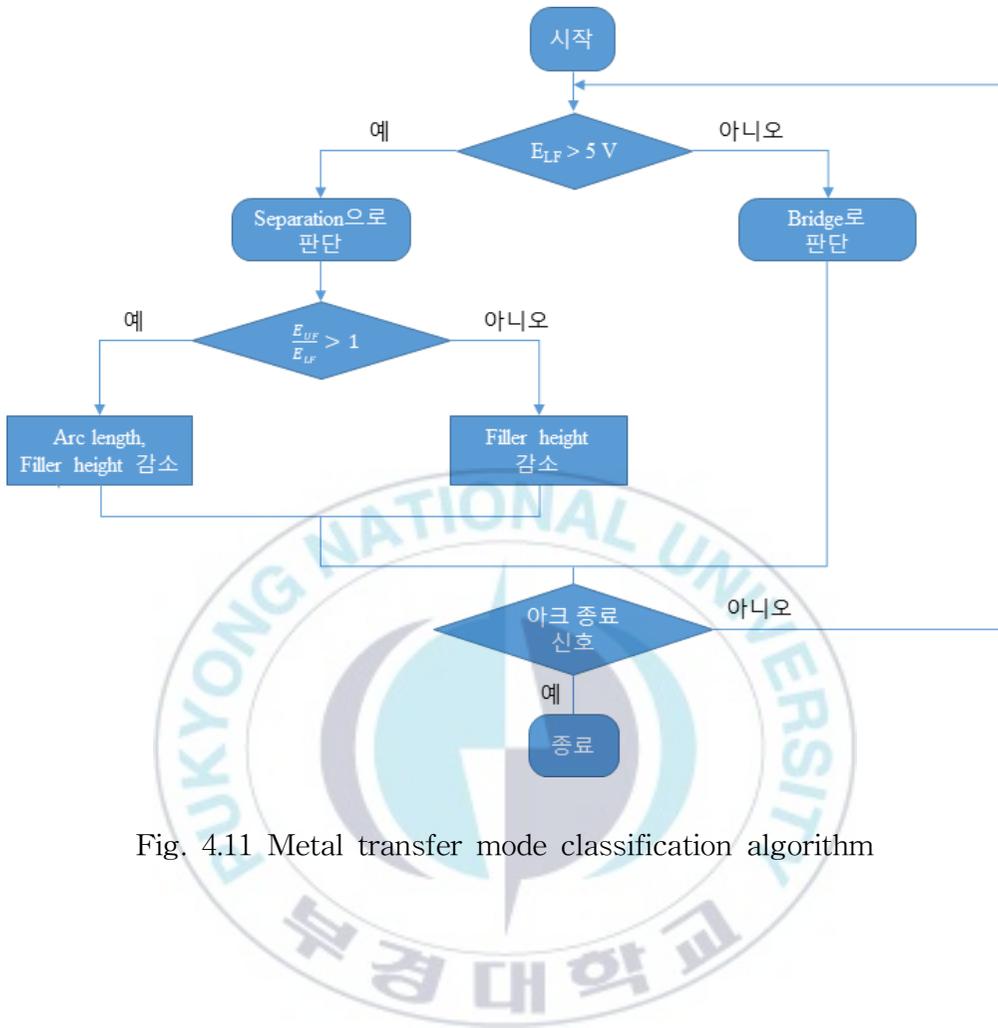


Fig. 4.11 Metal transfer mode classification algorithm

4.3 결론

GTAW에서 용가재 조성에 따른 용적 이행 특성을 비교하고, C형 용가재를 사용한 자동 GTAW에 사용할 수 있는 알고리즘을 개발하는 연구를 진행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) Inconel 625와 Hastelloy C-276 C-Filler를 사용하여 용착속도 2kg/h, 전류 300A의 동일한 용접조건에서 각각 용접을 진행하여 전압 파형을 비교한 결과, E_A , E_{UF} , E_{LF} 의 차이가 각각 1 V 이내로 나타나고, 같은 출력 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

2) 두 조성의 C형 용가재에서 단속교락이행 발생 시 Arc length 변동 유무에 따른 E_A , E_{UF} , E_{LF} 의 출력 특성이 동일하게 나타남을 알 수 있었고, 이를 E_{UF}/E_{LF} 의 차이로 구분할 수 있음을 확인하였다. E_{LF} 는 Bridging 시 2V 수준에서 Separation시 12 V수준으로 뚜렷한 차이를 나타내어 이행모드를 분류할 수 있었으며, Separation시 Arc length가 함께 증가한 경우 $E_{UF}/E_{LF}>1$ 이며, Arc length는 동일한 경우 $E_{UF}/E_{LF}<1$ 로 나타났다.

3) 용적 이행모드에 따른 E_{LF} 의 차이와, Separation 시 Arc length 변동 유무에 따른 E_{UF}/E_{LF} 차이가 발생하는 것을 바탕으로 용적 이행 모드 분류 알고리즘을 개발하였다.

제 5장 결론

본 연구는 용가재 형상에 따른 용적 이행 안정성을 비교하고, GTAW 자동 용접에서 안정적인 연속교락이행을 유지하기 위한 용적 이행 모드 분류 알고리즘을 개발하기 위한 것으로, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용가재 형상에 관계 없이 Filler height가 변하는 경우 Separation이 발생하여 비드 외관이 불량해지고, E_A , E_{UF} , E_{LF} 전압 파형이 불안정해지며, 전압 변동 특성은 동일하게 나타남을 확인할 수 있었다.

2) 높은 용착속도에서 원형 와이어를 사용하는 경우 용가재의 횡방향 이동으로 인해 높은 아크 밀도 영역을 벗어나 송급되거나, 상하방향 이동으로 인해 연속교락이행의 Bridge가 분리될 위험이 큰 반면, C형 와이어를 사용하는 경우 폭 넓은 용가재를 사용함에 따라 횡방향 및 상하방향의 이동이 적어 아크 플라즈마 중심의 일정한 위치로 송급이 가능하고, 높은 용착속도에서 안정적인 연속교락이행 유지가 가능할 것으로 판단되었다.

3) 용가재 구성에 따른 Separation 발생 시 전압 파형을 비교하여 E_A , E_{UF} , E_{LF} 가 같은 출력 특성을 나타냄을 확인하였고, 두 구성의 C형 용가재에서 단속교락이행 발생 시 Arc length 변동 유무에 따른 출력 특성을 E_{UF}/E_{LF} 의 차이로 구분할 수 있음을 확인하였다. E_{LF} 는 Bridging시 2 V 수준에서 Separation시 12 V수준으로 뚜렷한 차이를 나타내어 이행모드를 분류할 수 있었으며, Separation시 Arc length가 함께 증가한 경우 $E_{UF}/E_{LF}>1$ 이며, Arc length는 동일한 경우 $E_{UF}/E_{LF}<1$ 로 나타났다.

4) 용적 이행모드에 따른 E_{LF} 의 차이와, Separation 시 Arc length 변동 유무에 따른 E_{UF}/E_{LF} 차이가 발생하는 것을 바탕으로 용적 이행 모드 분류 알고리즘을 개발하였고, GTAW 자동용접에 사용할 수 있을 것으로 판단되었다.



참 고 문 헌

- 1) Fox, Jason, and Jack Beuth. "Process mapping of transient melt pool response in wire feed e-beam additive manufacturing of Ti-6Al-4V." Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX. (2013).
- 2) Sang-Myung Cho, Introducing Welding process, PP.16, (2002).
- 3) Hyo-Sik Ham, A Study on the Control Method of Molten Pool for High Efficiency TIG Welding, PhD thesis, Pukyong National University, (2011)
- 4) 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).
- 5) Jae-Ho Jun, A Study on the Transfer Phenomenon of C-type Cross Section Filler Metal in High Productivity TIG Welding, Department of Material System Engineering, The Graduate School, Pukyong National University, (2017).
- 6) Gi-Jeong Seo, A Study on the Metal Transfer Phenomenon and Mechanical Properties in Metal Additive Manufacturing by TIG

Welding, Department of Material System Engineering, The Graduate School, Pukyong National University, (2019).

7) Sang-Eun Song, Development of Automatic Voltage Control Equipment using LabVIEW Software, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 1, (2017).

8) Yizhang Liu, PC-Based Arc Ignition and Arc Length Control System for Gas Tungsten Arc Welding, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 5, September/October (1992).



학위과정 중 주요 학술지 게재 및 발표논문과 특허

1. 주요 학술지 게재 논문

- 1) FCAW 용접훈련생 숙련도 평가를 위한 작업변수 측정방법에 관한 연구,
대한용접접합학회, 대한용접접합학회지, 2020. 06
- 2) 아크용접과형의 구간통계처리법에 의한 결함 검출 알고리즘 연구,
대한용접접합학회, 대한용접접합학회지, 2021. 02 (예정)

2. 학술발표대회 발표 논문

- 1) Super-TIG에 의한 탄소강 램조인트 필릿 고속용접에서 송급각의 유효성에
관한 검토, 대한용접접합학회, 춘계학술발표대회, 2019. 05
- 2) Super-TIG 용접에서 안정적인 연속교락이행을 위한 C형 용가재 높이 제어
알고리즘 개발, 대한용접접합학회, 추계학술발표대회, 2019. 11
(구두발표 우수논문상 수상)
- 3) 용접 작업변수의 변동에 따른 공정변수의 출력 과형을 통한 결함 평가
알고리즘, 대한용접접합학회, 추계학술발표대회, 2019. 11
- 4) 용접 훈련 VR을 위한 작업변수 측정 데이터의 통계처리에 의한 용접기능 수준
분류, 대한용접접합학회, 춘계학술발표대회, 2019. 11
- 5) 고속련 용접사의 공정데이터 수집을 통한 T-필릿 AR용접솔루션 제시,
대한용접접합학회, 춘추계통합학술발표대회, 2020. 11
- 6) 아크용접과형의 구간통계 처리법에 의한 결함검출 알고리즘 연구,
대한용접접합학회, 춘추계통합학술발표대회, 2020. 11
- 7) GTAW에서 용가재 형상이 용적 이행 안정성에 미치는 영향,
대한용접접합학회, 춘추계통합학술발표대회, 2020. 11

3. 특허 출원

- 1) 산화피막 클리닝 장치 및 방법
10-2019-0115021 (2019. 09. 18)
- 2) FCAW 용접훈련생 숙련도 평가 방법 및 장치
10-2019-0177960 (2019. 12. 30)
- 3) 소모전극식 아크용접에서 공정신호에 의한 용접결함 평가 방법 및 그 장치
10-2020-0163735 (2020. 11. 30)



감사의 글

2017년 9월 조상명 교수님의 용접 프로세스 및 실험 수업을 들으며 용접을 학문으로 접하게 되었습니다. 학교에 입학하여 처음으로 '더 알고 싶다.'라는 관심을 가지게 되었고, Welding Process Lab.에 들어와 용접에 대한 배움을 시작하였습니다. 지난 3년의 연구실 생활을 되돌아보면 힘든 시간도 많았지만, 항상 긍정적인 마음으로 이겨낸 결과 이렇게 학위를 마칠 수 있었습니다. 다양한 연구과제와 산업체 방문, 국내외 전시회 참여 등 값진 경험을 할 수 있어 하루하루가 너무나도 귀중한 시간이었습니다. 연구실의 마지막 졸업생으로서 유종의 미를 잘 거두고 졸업을 하게 되어 뿌듯합니다. 앞으로도 더 많이 배우고 성장하여 훌륭한 엔지니어가 되기 위해 노력하겠습니다.

학위를 받기까지 많은 도움을 주신 감사한 분이 너무나도 많습니다. 그 중에서도 연구생으로 받아주시고 퇴임하시고도 저를 놓지 않고 엔지니어로서의 역량 뿐 아니라 인격적인 성장도 할 수 있도록 지도를 해주신 조상명 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님 덕분에 연구자로서 가져야 할 책임감과 호기심, 끈기, 노력 등 정말 많은 부분에서 성장을 할 수 있었습니다. 또한, 부족한 저를 너무나도 높게 평가해 주신 덕분에 자존감 또한 높아질 수 있었습니다. 연구 프로젝트와 논문 연구, 특히 업무를 병행하며 교수님께 받은 지도 덕분에 다양한 사고를 할 수 있게 되었고, 흔히 접하지 못할 업무까지도 경험할 수 있어 행복한 시간이었습니다. 저를 믿고 맡겨주시고 아낌없는 격려로 저를 이끌어 주셔서 다시 한 번 고개 숙여 감사드립니다.

기계공학과에 전과할 수 있도록 저희를 받아주시고 좋은 논문을 완성할 수 있도록 세심하게 지도해주신 박영환 교수님께도 감사드립니다. 지도교수 변경으로 정말 많은 스트레스를 받고 있을 당시 교수님께서 저희를 흔쾌히 받아주신 덕분에 다시 연구에 몰두할 수 있었고, 항상 관심 가져 주신 덕분에 소속감과 안정감을 느낄 수 있었습니다.

바쁘신 중에도 본 논문의 심사에 많은 격려와 조언을 해주시고 이끌어주신 심사위원장 김태완 교수님과 항상 아낌없는 조언을 해주신 정병호 교수님께도 감사드립니다. 또한, 학과 선배님으로서, 그리고 교수님으로서 저희의 힘듦을 공감해주시고 마음으로 품어주신 권한상 교수님께도 감사드립니다. 그 외에도 학부 때부터 대학원까지 용접에 대한 많은 가르침을 주신 방국수 교수님, 기계공학과로 전과하여 수업에 잘 적응할 수 있도록 배려해주신 한규택 교수님께도 감사드립니다.

그리고 함께 연구실 생활을 했던 많은 연구실 선배님들과 동기들도 평생 잊지 못할 것 같습니다. 함께 연구실 생활은 하지 못 했지만 선배라는 표현보다 교수님이라는 표현이 아직도 익숙한 재규형님, 가끔 학교에 오실 때마다 고생 많다고 다독여주신 재호형님, 연구실 최고참이어서인지 더욱 어려웠고 무서웠던 기정형님, 용접뿐 아니라 사람을 대하는 방법까지도 알려주시고 항상 저희가 잘 되길 진심으로 빌어주시는 늘 감사한 정현형님, 시스템에 놀러갈 때 마다 바쁘실 때도 반갑게 맞아주시고 항상 격려해주신 문경형님, 항상 웃으며 여유롭게 연구실 생활하는 모습을 본받고 싶었던 기범형님, 실험할 때마다 함께 머리를 맞대고 고민해주시고 올바른 실험 방향을 설계할 수 있도록 가르쳐주셨던 연구실 멘토 상열형님, 힘들 때마다 퇴근하고 치맥 뜯으며 다독여주신 창민형님, 인턴십 멘토로 처음 용접에 대해 가르쳐주신 고마운 두산 팀장 효진형님, 첫 연구를 같이 했던 행복한 곧 신랑 창익형님, 항상 논문과 함께하던 아는 것 많은 성현이, 가장 고생 많이 한 동기같은 선배 우현이, 연구실 생활 내내 묵묵히 꼬장 다 들어준 고마운 왓슨 박사 경섭이, 올 한 해 티타늄 과제하느라 밤낮으로 정말 고생한 제일형님 모두에게 이 글을 빌어 감사를 전합니다.

끝으로 저에게 세상을 선물해주시고, 지금까지 사랑으로 키워주신, 항상 늦게 집에 들어가는 자식 걱정에 편히 못 주무셨을, 그럼에도 자식이 선택한 길을 존중하고 믿어주신 감사한 부모님, 어릴 때부터 존경의 대상이었던 삼성맨 형님 모두 사랑합니다.

2021. 01. 부경대학교 용접프로세스 연구실에서
류형창 드림