



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](#)

2024년 2월  
석사학위 논문

알루미늄 합금과 티타늄 합금의  
AC 펄스 MIG 브레이징 시  
EN 극성비 변화가  
용접성에 미치는 영향

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

강민승

알루미늄 합금과 티타늄 합금의  
AC 펄스 MIG 브레이징 시  
EN 극성비 변화가  
용접성에 미치는 영향

Influence of EN Ratio Variation on Weldability  
in AC Pulse MIG Brazing  
of Aluminum Alloy and Titanium Alloy Sheets

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

강 민 승

알루미늄 합금과 티타늄 합금의  
AC 펄스 MIG 브레이징 시  
EN 극성비 변화가  
용접성에 미치는 영향

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

강 민 승

## 강민승의 석사학위논문을 인준함

위원장 박철호 (인)

위 원 방희선 (인)

위 원 손윤철 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

## 목차

List of Figures .....	III
List of Tables .....	V
Abstract .....	VI
1장. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.1.1 연구 배경 .....	1
1.1.2 연구 목적 .....	5
1.2 국내·외 연구 동향 .....	7
1.3 소재의 특성 .....	9
1.3.1 알루미늄 특성 .....	9
1.3.2 티타늄 특성 .....	11
1.4 가스 메탈 아크 용접(GMAW) .....	13
1.4.1 가스 메탈 아크 용접(GMAW) 특성 .....	13
1.4.2 가스 메탈 아크 용접(GMAW) 극성 .....	15
1.4.3 가스 메탈 아크 용접(GMAW) 용융 금속 이행 .....	17
1.5 AC 펄스 MIG 용접 .....	20
1.5.1 AC 펄스 MIG 용접 특성 .....	20
1.5.2 EN 극성비에 따른 용접 특성 .....	22

2장 . 연구 방법 .....	23
2.1 실험방법 및 용접조건 .....	23
2.1.1 사용 소재 및 용접법 .....	23
2.1.2 실험장비 및 용접조건 .....	25
2.2 용접부 특성 평가 .....	28
2.2.1 비드 외관 및 단면 특성 평가 .....	28
2.2.2 기계적 특성 평가 .....	29
3장 . 연구 결과 및 고찰 .....	30
3.1 용접 공정변수에 따른 용접부 특성 .....	30
3.1.1 전극 와이어 위치 변화 .....	30
3.1.2 용접전류별 EN 극성비 변화 .....	35
3.2 금속학적 특성 평가 .....	40
3.2.1 금속간화합물 두께 분석 .....	40
3.2.2 EDS 분석 .....	45
3.3 기계적 특성 평가 .....	53
3.3.1 인장-전단 하중 시험 .....	53
3.3.2 경도 시험 .....	56
4장 . 결론 .....	57
참고문헌 .....	58

## List of Figures

Fig. 1.1 Global temperature projections based on IEA scenario .....	3
Fig. 1.2 Automobile CO <sub>2</sub> reduction plans in major countries .....	3
Fig. 1.3 The battery protection; (1) Hollow aluminum deflector bar, (2) Titanium plate, (3) Solid aluminum extrusion .....	4
Fig. 1.4 Schematics of GMAW; (a) GMAW welding Process (b) GMAW welding hardware block diagram .....	14
Fig. 1.5 Schematic of GMAW metal transfer modes .....	19
Fig. 1.6 Schematic of pulse transfer mode works .....	19
Fig. 1.7 Schematics of AC pulse MIG welding current waveform .....	21
Fig. 2.1 Schematic of AA5052-H32 and Ti-6Al-4V welded joints specimen .....	24
Fig. 2.2 AC pulse MIG welding machine and 6 axis welding robot .....	26
Fig. 2.3 Schematic of electrode wire positions in specimen .....	26
Fig. 2.4 Schematics of wetting distance, wetting angle, and bead height .....	28
Fig. 2.5 Schematics of tensile-shear load test specimen .....	29
Fig. 2.6 Schematics of vickers hardness measurement location .....	29
Fig. 3.1 Tensile-shear load of welded joints with different electrode wire positions .....	33
Fig. 3.2 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 80A, EN ratio 0%, (b) 80A, EN ratio 10%, (c) 80A, EN ratio 20% .....	42
Fig. 3.3 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 90A, EN ratio 0%, (b) 90A, EN ratio 10%, (c) 90A, EN ratio 20% .....	42
Fig. 3.4 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 100A, EN ratio 0%, (b) 100A, EN ratio 10%, (c) 100A, EN ratio 20% .....	42
Fig. 3.5 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 110A, EN ratio 0%, (b) 110A, EN ratio 10%, (c) 110A, EN ratio 20% .....	43
Fig. 3.6 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 120A, EN ratio 0%, (b) 120A, EN ratio 10%, (c) 120A, EN ratio 20% .....	44



Fig. 3.7 Ti-Al binary phase diagram ..... 45

Fig. 3.8 EDS analysis images at various points of AC pulse MIG welded joint  
with current 110A and EN ratio 0% ..... 47

Fig. 3.9 SEM-EDS spectrum at denoted points of AC pulse MIG welded joint  
with current 110A and EN ratio 0%; (a) Point A, (b) Point B, (c)  
Point C ..... 48

Fig. 3.10 EDS analysis images at various points of AC pulse MIG welded joint  
with current 110A and EN ratio 10% ..... 49

Fig. 3.11 SEM-EDS spectrum at denoted points of AC pulse MIG welded joint  
with current 110A and EN ratio 10%; (a) Point A, (b) Point B, (c)  
Point C ..... 50

Fig. 3.12 EDS analysis images at various points of AC pulse MIG welded joint  
with current 110A and EN ratio 20% ..... 51

Fig. 3.13 SEM-EDS spectrum at denoted points of AC pulse MIG welded joint  
with current 110A and EN ratio 20%; (a) Point A, (b) Point B, (c)  
Point C ..... 52

Fig. 3.14 Tensile-shear load of AC pulse MIG welded joints ..... 55

Fig. 3.15 Comparison of hardness values with EN ratio in 110A condition of  
AC pulse MIG welded joints ..... 56

## List of Table

Table. 1.1 Effects of polarity in GMAW .....	16
Table. 2.1 Chemical compositions of base materials .....	23
Table. 2.2 Mechanical properties of base materials .....	24
Table. 2.3 Chemical compositions of electrode wire .....	24
Table. 2.4 Welding conditions of AC pulse MIG .....	27
Table. 3.1 Bead surface appearance of welded joints with different electrode wire positions .....	31
Table. 3.2 Tensile–shear load of welded joints with different electrode wire positions .....	33
Table. 3.3 Bead cross section view of welded joints with different electrode wire positions .....	34
Table. 3.4 Bead surface appearance of welded joints with EN ratios in different currents .....	36
Table. 3.5 Bead cross section view of welded joints with EN ratios in different currents .....	38
Table. 3.6 Bead dimension of welded joints with EN ratios in different currents .....	39
Table. 3.7 IMCs layer thickness dimension of welded joints with EN ratios in different currents .....	41
Table. 3.8 Chemical compositions and possible phases at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 0% .....	47
Table. 3.9 Chemical compositions and possible phases at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 10% .....	49
Table. 3.10 Chemical compositions and possible phases at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 20% .....	51
Table. 3.11 Tensile–shear load of AC pulse MIG welded joints .....	55

## ABSTRACT

# Influence of EN Ratio Variation on Weldability in AC Pulse MIG Brazing of Aluminum Alloy and Titanium Alloy Sheets

Kang Min Seung

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science  
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, to achieve global carbon neutrality, reducing greenhouse gas emissions has become a crucial objective. Accordingly, the automotive industry is focusing on improving fuel efficiency in line with environmental regulations. Reducing the weight of vehicles is recognized as a strategy to simultaneously achieve both improved fuel efficiency and reduced emissions.

Aluminum alloy and titanium alloy, differing significantly in melting points by over 1000 degrees Celsius and sensitive to high heat due to their distinct physical properties, present challenges in traditional welding methods. Additionally, the formation of brittle intermetallic compounds (IMCs) at the joint interface leads to reduced joint strength. To overcome this, a process

involving relatively low heat input is considered.

In this study, AC pulse MIG welding was applied to dissimilar materials with a thickness of 2.5mm for aluminum alloy (AA5052-H32) and thickness of 3mm for titanium alloy (Ti-6Al-4V). The focus of the research is to analyze the impact of the EN ratio on the weld joint. The influence of electrode wire position, welding current, and EN ratio on the mechanical and metallurgical characteristics of the dissimilar joint was examined. Tensile-shear load tests and vickres hardness tests were conducted for mechanical property evaluation, and energy dispersive spectroscopy(EDS) via scanning electron microscopy (SEM) was performed to investigate the microstructural characteristics of the formed IMC layer at the joint interface.

As a result of the experiment, it was revealed that an increase in the EN ratio at a constant welding current led to reduced heat input, resulting in increased tensile-shear load and suppression of IMC layer formation. Under the condition of 110A welding current and 20% EN ratio, the tensile-shear load reached 17.6 kN, and the growth of the IMC layer was restrained to 0.86  $\mu\text{m}$ .

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

### 1.1.1 연구 배경

최근까지 이어져 오고 있는 탄소중립을 향한 글로벌 노력은 다양한 산업 분야에서 온실가스 배출 저감을 필요로 한다. 2021년 국제에너지기구(IEA)는 세계에너지전망 보고서에서 2100년에 지구 온도 상승을 1.5도 이하로 억제하려면 2050년까지 전 세계가 CO<sub>2</sub> 넷제로(Net Zero)를 달성해야 한다는 시나리오를 Fig. 1.1에 나타내었다.

이 중에서도 자동차 산업은 특히 중요한 부문으로 간주된다. 온실가스의 주요 배출원은 산업, 건물, 수송 등에서 발생하며, 이 중 산업 부문이 가장 큰 비중을 차지한다. 그러나 수송 부문, 특히 자동차에서의 배출은 다른 부문에 비해 관리가 용이하다는 특징을 가지고 있어 이에 따라, 주요 국가들은 수송 부문 내에서 자동차에 대한 배출 규제를 우선적으로 추진하고 있다.[1] Fig. 1.2에 주요국의 자동차 부문 탄소중립 대응안을 나타내었다.

이처럼 글로벌 환경규제 추세를 따라, 자동차 업계에서도 사회적 요구에 부응하고자 연비 효율성을 증가시키는 데 주력하고 있다. 이러한 맥락에서 자동차 경량화에 관한 연구도 중요성을 더해가고 있다. 자동차 연료 소비의 약 23%가 차량의 중량과 직접적인 연관이 있으며, 이는 자동차의 무게를 줄이는 것이 연비향상과 이산화탄소 배출가스 감소라는 두 가지 주요 목표를 동시에 달성하는 효과적인 방법임을 시사한다.

차량 경량화는 연비향상뿐만 아니라 다양한 성능 개선의 이점을 제공한다. 1,500kg의 승용차 무게를 대략 10% 감소시키면 연비는 3.8% 개선되고, 가속 성능은 8% 증가하며, 제동 거리는 5% 단축된다. 더욱이, 배기가스 배출량은 2.5%에서 8.8% 사이 감소하며, 차체의 내구 수명도 1.7배로 늘어나는 효과가 있다.[2]

이처럼 차량의 경량화가 중요성이 있고 효과적임으로 두드러지면서, 차체 제작에 있어 기존의 철강 재료 대신 알루미늄 합금과 같은 비철금속 및 다양한 신소재들이 복합적으로 사용되고 있다. 특히 전기자동차 제작 분야에서는 100% 비철금속을 사용한 차체 개발이 진행되고 있다. 또한, 자동차 차체에 사용되는 소재도 철강에서 알루미늄, 마그네슘 같은 강도가 뛰어난 비철 재료로, 그리고 플라스틱과 같은 신소재로의 전환 가능성이 커지고 있다.

더불어 전기자동차 하부에 배치된 배터리를 사고 시 충격으로 인한 화재 발생 가능성으로부터 보호를 위해 Fig. 1.3에 나타낸 것처럼 알루미늄과 티타늄 소재를 추가적으로 적용하여 부족한 안정성을 확보하여 사고를 방지하고 있다.[3]

그러므로 비중이 2.7로 철강재 35%에 불과하여 적용 시 40% 정도의 경량화가 가능한 알루미늄 합금(Aluminium alloy)과 우수한 고비강도, 내식성의 티타늄 합금(Titanium alloy) 이종재에 대한 용접연구가 필요하다.[4][5]

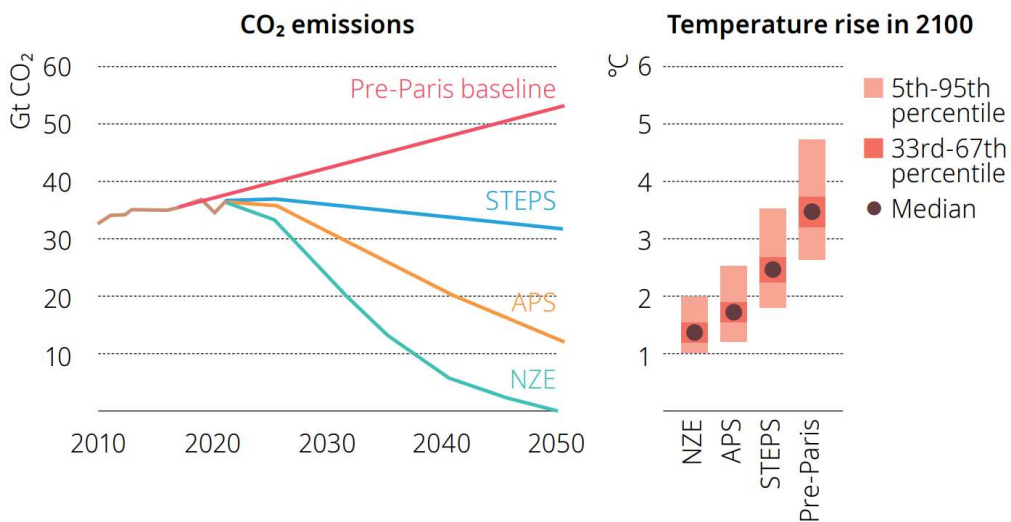


Fig. 1.1 Global temperature projections based on IEA scenario

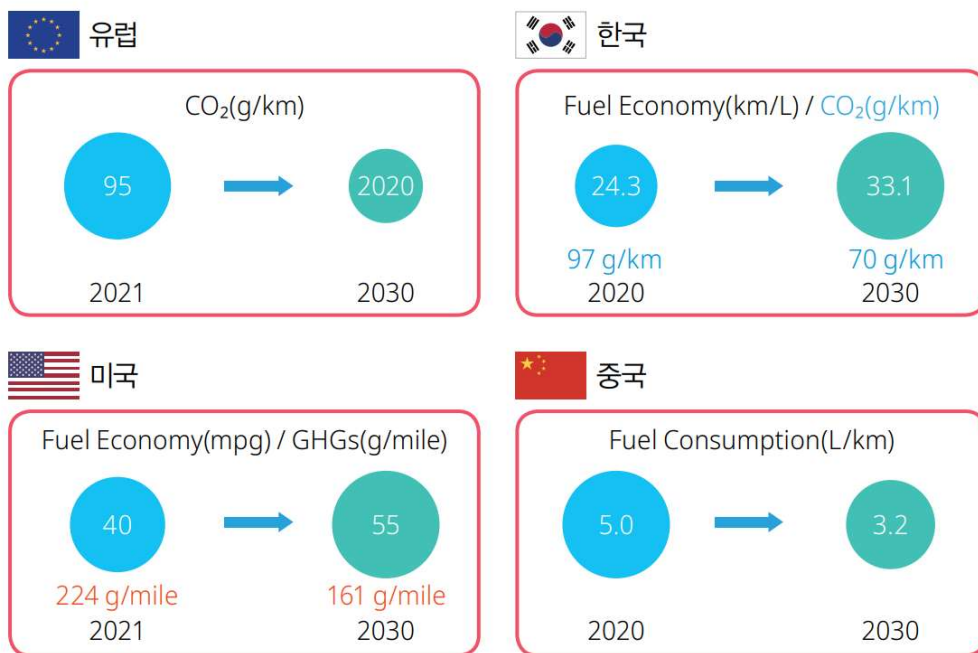


Fig. 1.2 Automobile CO<sub>2</sub> reduction plans in major countries

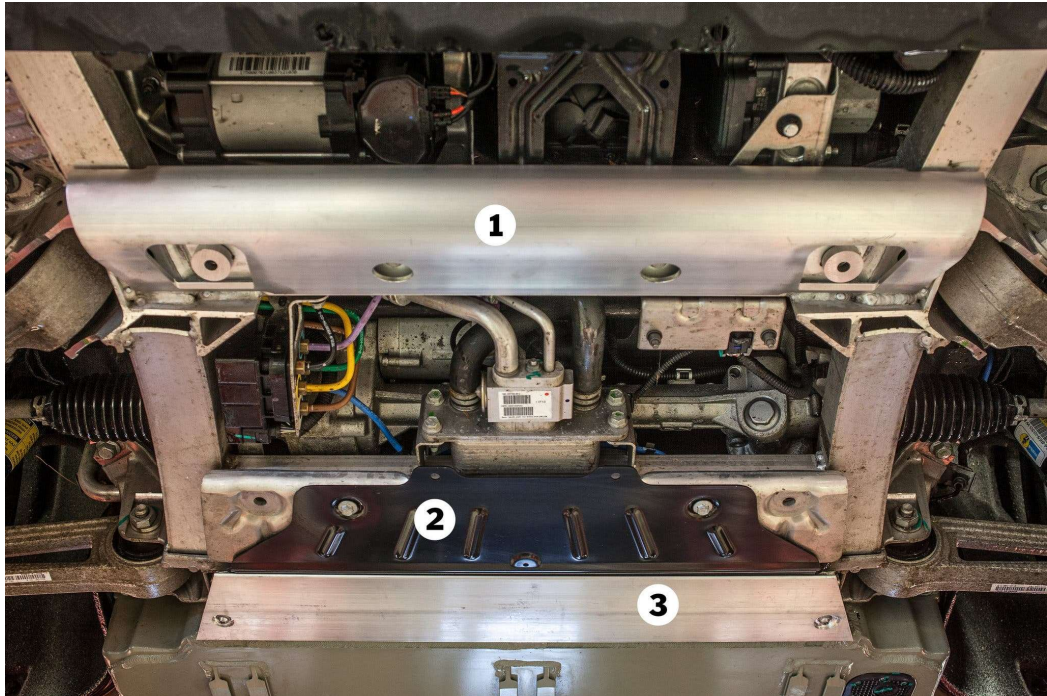


Fig. 1.3 The battery protection; (1) Hollow aluminum deflector bar, (2) Titanium plate, (3) Solid aluminum extrusion



## 1.1.2 연구 목적

현대 산업계에서는 자동차, 항공우주, 해양과 같은 다양한 분야에서 이종재의 용접을 통한 접합이 점점 더 중요해지고 있다.[6][7] 특히, 경량화가 필수적인 산업 분야에서 알루미늄 합금은 가벼움과 부식 저항성으로 인해 널리 사용되고 있다.[8][9] 또한, 높은 중량 대비 강도와 우수한 고온 저항성으로 잘 알려진 티타늄 합금도 다양한 분야에서 중요한 소재로 활용되고 있다.[10][11] 이 두 소재의 용접은 성능과 내구성 향상에 중대한 역할을 하고 있다.[12][13]

그러나 알루미늄 합금과 티타늄 합금의 용접은 물리적 및 화학적 특성의 큰 차이로 인해 복잡하고 어려운 과정에 직면해 있다. 용융점이 약  $660^{\circ}\text{C}$ 인 알루미늄 합금은 용융점이 약  $1,668^{\circ}\text{C}$ 인 티타늄 합금을 용융시키는 데 필요한 고온에 노출되면 변형되기 쉽다. 또한 이러한 이종 금속의 열팽창 계수는 상이하어 냉각 시 높은 잔류 응력과 뒤틀림을 초래하여 용접부에 부정적인 영향을 미친다.[14][15]

더욱이, 알루미늄 합금과 티타늄 합금 용접 시 용접부 계면에서  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ,  $\text{TiAl}$ ,  $\text{TiAl}_2$  및  $\text{TiAl}_3$ 와 같은 금속간화합물이 쉽게 형성된다. 특히  $\text{TiAl}_3$ 와 같은 취성이 높은 금속간화합물은 용접부의 기계적 특성을 크게 저하시키며, 응력이 가해질 때 균열이나 파손이 발생하기 쉬운 상태를 초래한다.[16][17][18] 따라서 이러한 금속간화합물의 형성을 최소화하는 것은 용접공정의 효율성과 구조적 안정성을 높이기 위해 매우 중요하다.[19][20][21]

이러한 문제를 극복하기 위해 마찰 교반 용접[22], 레이저 용접[23], 폭발 용접[24], 확산 접합[25], 저항 점 용접[26] 및 천이 액상 접합[27]과 같은 용접 기술이 연구되었다. 그러나 이러한 방법들은 생산성이 낮고 높은 비용으로 인해 실제 적용 범위에는 제한이 있다.

따라서, 기존의 방법으로 알루미늄 합금과 티타늄 합금을 용접하는 과정은 야금학적, 열적, 기계적 문제들이 복잡한 상호작용을 나타낸다. 이러한 문제들을 효과적으로 해결하고, 신뢰할 수 있는 고품질 용접부를 만들기 위해서는 새로운 접근 방식이 필요하다.

AC(Alternating Current) 펄스 MIG 용접은 EN 극성비를 활용하여 직류 역극성(Direct Current electrode Positive : DCEP)과 직류 정극성(Direct Current Electrode Negative : DCEN)의 구간을 설정하고, 이 두 극성이 주기적으로 반복하는 용접방법이다. 이 방식은 직류 역극성과 직류 정극성 각각의 이점을 동시에 활용할 수 있다.[28][29][30][31]

그러나 알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V) 이종재에 대해 AC 펄스 MIG 용접을 적용할 때, 용접 공정변수에 따른 용접부의 특성과 금속간화합물 형성에 관한 연구는 아직 부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V) 이종재를 대상으로 AC 펄스 MIG 용접을 실시하였을 때, EN 극성비가 용접부에 미치는 영향을 고찰하였다. 특히, 알루미늄 합금과 티타늄 합금 용접 시 형성되는 금속간화합물은 용접부의 기계적 특성, 특히 강도 저하의 주요 요인이므로 견고하고 고품질의 용접부를 형성하기 위해 입열량과 금속간화합물 사이의 관계를 주안점으로 두고 연구를 진행하였다.

## 1.2 국내·외 연구 동향

앞서 언급했듯 알루미늄 합금과 티타늄 합금의 이종재 용접에는 마찰 교반 용접 [27], 레이저 용접[28], 폭발 용접[29], 확산 접합[30], 저항 점 용접[31], 천이 액상 접합[32] 등을 적용한 다양한 연구가 진행되었다. 알루미늄 합금과 티타늄 합금에 대한 용접은 소재의 상이한 물성으로 인해 기존의 용접법으로는 양호한 용접부를 형성하기에 어려움이 따르고 있다. 따라서 용접 시 형성되는 취성의 금속간화합물을 억제하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Francisco Dias 등은 알루미늄 합금(AA7075-T651)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 사용하여 새로운 마찰 교반 용접 기반의 공정을 통해 금속간화합물의 형성을 방지하였다. 하판의 티타늄 합금 시험편에 3mm 또는 4mm 직경의 구멍을 드릴링하였고, 구멍에 추가로 모따기 작업을 수행하여 이종재 간의 접합부 모양을 향상시켜 기존 마찰 교반 용접과의 차별점을 두었다. 인장-전단강도 시험을 통해 드릴링한 접합부 1개와 2개인 경우 각각 최대 5,586N과 8,151N 값에 도달하여 상당한 기계적 성능 수준을 달성하였다.[32]

Haodong Wang 등은 1mm 두께의 알루미늄 합금(AA5052)과 1mm 두께의 티타늄 합금(Ti-6Al-4V) 사이에 아연 포일을 첨가하여 TIG 용접 시 전극 와이어의 젖음성을 향상시켰다. 용착금속부의 경도는 열영향부 및 알루미늄 모재보다 높았으며, 용접전류 80A에서 인장 전단강도 값은 180MPa로 모재의 인장 전단강도의 80%에 해당한다. 또한, 높은 용접전류에서는 톱니 모양의  $TiAl_3$  층이, 낮은 용접전류 하에서는  $TiZn_{16} + TiAl_3$  이중 하위층으로 대체되는 현상이 용접부 계면에서 관찰되었다.[33]

R. Cao 등은 1mm 두께의 알루미늄 합금(A6061-T6)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)에 대해 CMT(Cold Metal Transfer) 용접을 ER4043 전극 와이어를 사용하여 수행하였다. 전극 와이어의 우수한 젖음성 및 퍼짐성을 통해 양호한 용접부를 얻을 수 있었다. 계면의 금속간화합물은 주로 두 개의 층으로 구성되었는데, 티타늄 합금에 가까운  $Ti_3Al$  및  $TiAl$ 로 구성된 연속 층과 용착금속부 옆에 있는 불연속 튼튼 모양의  $TiAl_3$  층이 형성되었다. 인장강도는 최대 194N/mm를 달성했고, 파단은 주로 열영향부에서 발생하였다.[34]

그럼에도 알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)에 대한 이종재 용접 시 동시에 기계적 성능 확보와 금속간화합물 형성의 억제는 한계가 있다. 따라서 AC 펄스 MIG 용접을 적용하여 용접성을 향상시키는 연구가 진행되고 있는 추세이다.

Hyoung Jin Park 등은 직경 1.2mm의 ER 4043 전극 와이어를 사용하여 1.4mm 두께의 SPRC440 강판과 1.6mm의 6K21 알루미늄 합금을 겹치기 이음으로 AC 펄스 MIG 용접을 채용하였다. 연구 결과 EN 극성비가 증가함에 따라 전극 와이어의 용융속도가 증가하여 증착속도가 증가하고 모재에 가해지는 열량이 감소하여 얇은 금속간화합물을 확보하였다. 또한 EN 극성비 증가에 따른 갭 브리징 분석 결과, 인장강도 값이 향상되고 갭 브리징 효과가 향상된다고 하였다.[35]

Adeel Ikram 등은 5mm 두께의 SS400 강판에 사각 홈 맞대기 이음으로 AC-GMAW 공정 적용 시 미세 구조 및 기계적 특성에 대한 용접전류 및 EN 극성비의 영향을 고찰하였다. EN 극성비를 통하여 용입 깊이를 제어할 수 있고, 용접전류가 증가할수록 인장강도가 향상되었으며, EN 극성비가 증가함에 따라 연신율이 증가하였다. 또한, 미세 경도 분포는 EN 극성비가 변화해도 크게 영향을 받지 않는다고 설명하였다.[36]

따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al4V)의 AC 펄스 MIG 용접부에 대해 EN 극성비가 미치는 영향에 대해 고찰하고자 한다.

## 1.3 소재의 특성

### 1.3.1 알루미늄 특성

알루미늄은 유리한 물성으로 다양한 용도로 널리 사용되고 있다. 알루미늄의 밀도는 강의 약 1/3로 상대적으로 낮아 다양한 산업의 경량 응용 분야에 활용되고 있으며, 이 특성은 중량 감소가 필수적인 항공우주 및 자동차와 같은 산업에서 특히 중요하다. 또한, 알루미늄은 산소와 쉽게 반응하기 때문에 공기 중에 노출되면 표면에 산화물층을 형성한다. 이 산화물층은 표면의 부식을 방지해주어 내식성이 우수하며 다양한 실외환경 및 해양 분야에 활용된다. 더불어, 전 세계적으로 환경 문제가 대두되고 있는 시점에서 알루미늄의 재활용성은 큰 장점 중 하나이다. 알루미늄은 재활용 가능성이 크며 재활용 과정은 여러 가지 환경적, 경제적 이점을 제공한다.

알루미늄 합금은 크게 선, 봉, 형재, 판, 관, 단조품 등의 전신재 합금(wrought alloy)과 주물, 다이캐스트 등의 주조재 합금(cast alloy)로 구분된다. 각 종류마다 열처리에 의한 경화 여부에 따라 열처리, 비열처리 알루미늄 합금으로 나뉜다.

비열처리 알루미늄 합금은 석출물에 의해 경화하는 구조적 특성을 가지고 있어, 열처리를 통한 경화 대신 가공 경화 방법을 사용한다. 이에는 1xxx(Pure Al), 3xxx (Al-Mn-Mg), 4xxx(Al-Si), 5xxx(Al-Mg-Mn/Cr) 계열의 합금이 포함된다. 반면, 열처리가 가능한 알루미늄 합금은 온도가 상승함에 따라 고용도가 높아지며, 열처리를 통해 석출 및 고용화에 의한 경화가 가능하며, 이러한 계열에는 2xxx(Al-Cu-Mg), 6xxx(Al-Mg-Si), 7xxx(Al-Zn-Mg) 합금이 속한다.

알루미늄 합금의 강도 향상을 위해서는 Mn, Cu, Mg, Zn, Si 등의 원소가 함유된다. Mn과 Mg는 고용 강화 효과를 통해 강도를 증가시키며 가공 경화를 향상시키며, Cu는 석출 경화를 일으켜 강도를 증가시키지만, 내식성과 용접성은 감소된다. Si는 연성과 강도를 증가시키며, Mg와 결합할 경우 석출 경화를 유발한다. Zn은 석출 경화를 일으키지만 응력 부식을 야기할 수 있다. 이러한 원소들의 첨가는 알루미늄의 특성을 개선하고 특정 응용 분야에 적합하게 만드는 데 중요한 역할을 한다.[37]

본 연구에서 사용된 알루미늄 합금(AA5052-H32) 소재는 마그네슘을 함유하고 있는 5xxxx 계열 비열처리 알루미늄 합금으로 열처리 대신 소성 변형인 냉간 가공 경화 후 안정화 처리하였다. 우수한 용접성과 내식성으로 자동차, 해양, 항공기 구조, 건축 자재, 압력 용기 등 다양한 분야에서 사용된다.

### 1.3.2 티타늄 특성

티타늄은 강도가 탄소강과 유사함에도 불구하고, 철 대비 약 2배, 알루미늄 대비 약 6배에 달하는 높은 비강도를 가지고 있다. 티타늄의 비중은 약 4.51로, 철강과 스테인리스 스틸의 약 60% 수준으로 가벼움을 나타낸다. 이에 따라 티타늄을 구조용 재료로 활용할 경우, 다른 금속 대비 무게를 절반가량으로 감소시킬 수 있다. 티타늄 표면에 형성되는 산화티타늄 피막은 매우 견고하여 내부 부식을 효과적으로 억제하는 역할을 한다. 그뿐만 아니라, 이 부동태 피막이 파괴되더라도 빠르게 재생되는 특성을 가지고 있어, 티타늄은 강한 내식성을 지니고 있다. 특히 염소이온에 대한 내성이 뛰어나, 화학 장치산업, 해양 구조물, 그리고 생체 의료 분야에서 중요한 소재로 사용된다.

티타늄의 융점은 약 1,668℃로, 철의 융점인 1,536℃보다 높고, 열팽창률과 열전도율(약 17W/mK)이 낮아, 400℃ 이하의 온도 범위에서 강도 변화가 상대적으로 적다. 이러한 특성은 고온 환경에서의 응용에 매우 적합하며, 인장강도 대비 높은 내응력을 가지고 있다. 특히 티타늄 합금은 90% 이상의 높은 내응력 값을 가지고 있으며, 특수강의 강도를 넘어선다. 이는 티타늄이 경량화와 동시에 높은 강도를 요구하는 다양한 응용 분야에 적합하다는 것을 의미한다.

순수 티타늄은 다른 원소가 첨가되지 않은 상태이며, 티타늄 원소만으로 구성되어 있다. 반면, 티타늄 합금은 티타늄에 다른 원소들이 소량 첨가된 형태이며, 주로 세 가지 주요 유형으로 분류된다. 이는  $\alpha$  합금,  $\beta$  합금, 및  $\alpha+\beta$  합금이다.

$\alpha$  합금은 알루미늄(Al), 산소(O), 주석(Sn), 지르코늄(Zr)과 같은 알파 안정화 원소 또는 중성 원소를 포함하고 있다. 이 합금은 HCP(Hexagonal Close-Packed) 결정 구조를 가지며, 단상 구조로만 존재하기 때문에 변형에 대한 저항이 크다. 따라서 시효 처리와 같은 열처리 방식 대신, 가공 경화를 통해 강도를 향상시킨다. 열처리 성능이 비교적 낮은 대신, 마르텐사이트의 형성이 적어 용접성이 우수하다. 또한, 크리프(creep) 성질이 뛰어나고 저온에서의 기계적 특성이 우수하다. 대표적으로 Ti-5Al-2.5Sn과 Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si 등이 있다.

$\beta$  합금은 냉각 시 마르텐사이트의 생성을 피하기 위해 몰리브덴(Mo), 바나듐(V), 철(Fe)과 같은 베타 안정화 원소를 포함한 합금이며, 이는 BCC(Body Centered Cubic) 결정 구조로 형성되어 있다. 이러한 베타 합금은 열처리를 통해 강도를 증가시킬 수 있으며, 일반적으로 알파 합금에 비해 더 높은 연성을 가진다. 비록 알파 합금에 비해 용접성은 다소 낮을 수 있으나, 중량 대비 높은 강도와 우수한 피로 저항성을 특징으로 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 대표적인 베타 합금으로는 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al과 Ti-10V-2Fe-3Al 등이 포함된다.

$\alpha+\beta$  합금은 티타늄 합금 중 가장 일반적인 유형으로, 알파 및 베타 안정화 원소가 혼합된 형태이다. 이 합금은 HCP와 BCC 결정 구조의 결합을 통해 우수한 강도와 연성, 그리고 인성을 이점으로 한다. 다양한 목적에 적합하여 여러 응용 분야에 사용된다. 가장 널리 쓰이는 Ti-6Al-4V가 대표적인  $\alpha+\beta$  합금이며, Ti-6Al-4V보다 베타 상이 많은 합금으로는 Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-7Al-4Mo 등이 있다.

본 연구에서 사용된 티타늄 합금은 Ti-6Al-4V로, 이는 전체 티타늄 재료의 50% 이상을 차지하고 있는 대표적인 티타늄 합금이다. Ti-6Al-4V는 약 90%의 티타늄과 6%의 알루미늄, 4%의 바나듐으로 구성되어 있으며, 이에 따라 순수 티타늄에 비해 강도가 크게 향상되었다. 항공우주, 자동차 및 해양 환경에서 널리 사용되며, 광범위한 부식성 환경과 다양한 온도 범위에서 견고한 기계적 특성을 유지한다. 열처리를 통한 강도 향상이 가능하며, 우수한 용접성과 결합하여 내구성과 경량 성능이 요구되는 응용 분야에 선호되는 소재이다.



## 1.4 가스 메탈 아크 용접(GMAW)

### 1.4.1 가스 메탈 아크 용접(GMAW) 특성

가스 메탈 아크 용접(Gas Metal Arc Welding)은 연속적으로 송급되는 전극 와이어(electrode wire)를 가스 노즐을 통해 공급되는 보호가스(shielding gas) 영역 내에서 아크를 생성하여 전극 와이어와 모재가 용융되어 용접이 이루어진다. 보호가스의 흐름으로 용접 영역을 외부 환경으로부터 보호하며, 이를 통해 용접부의 품질을 향상시키고 용접 중에 발생할 수 있는 오염을 최소화한다. Fig. 1.4에 가스 메탈 아크 용접의 모식도를 나타내었다.[38]

가스 메탈 아크 용접은 사용하는 보호가스의 종류에 따라 구분된다. 아르곤(Ar), 헬륨(He)과 같은 물리적, 화학적으로 안정한 불활성 가스(inert gas)를 사용하는 경우는 MIG(Metal Inert Gas) 용접이라고 한다. 또한, 다양한 혼합가스 또는 CO<sub>2</sub>와 같은 활성 가스(active gas)를 사용하는 경우에는 MAG(Metal Active Gas) 용접으로 불린다. 특히, 알루미늄 합금과 같은 비철금속의 경우, 용접 시 산화반응에 민감하기 때문에 불활성 가스를 사용하는 것이 필수적이다. 그러므로 알루미늄 합금의 용접에는 MIG 용접이 적용된다.

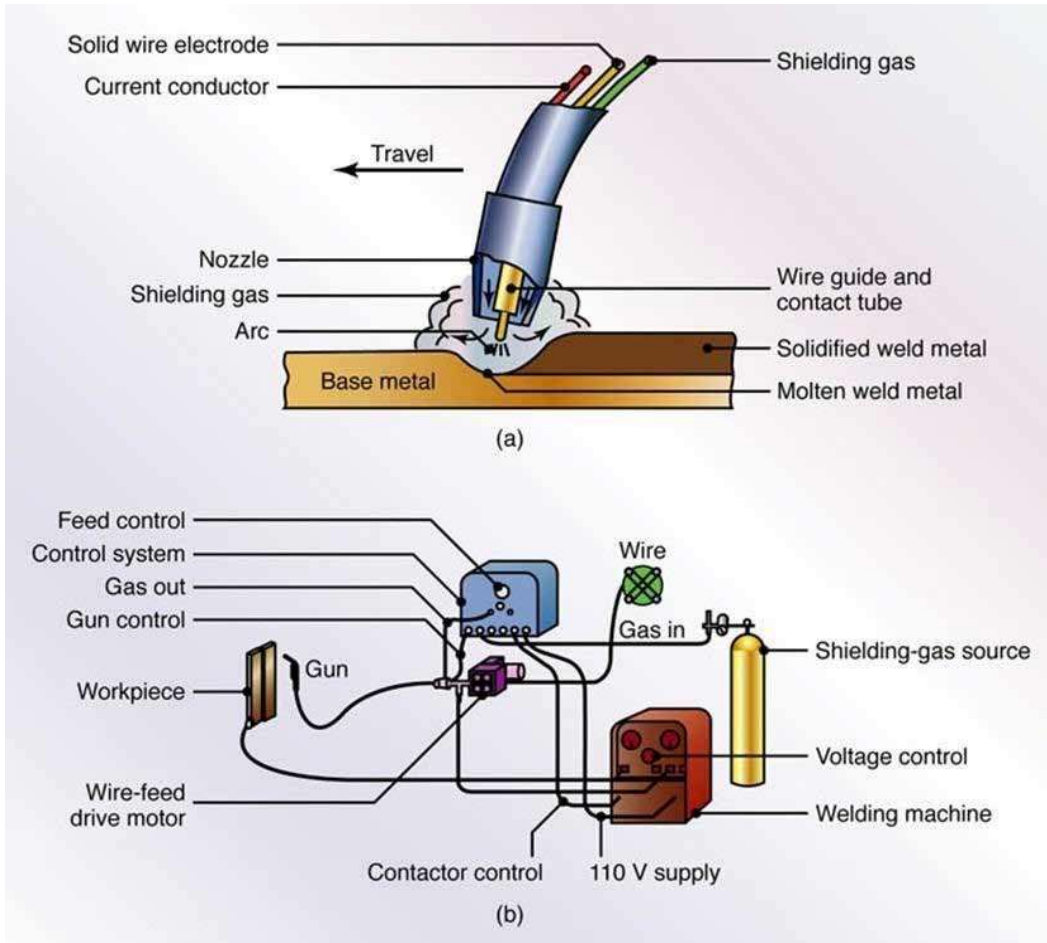


Fig. 1.4 Schematics of GMAW; (a) GMAW welding Process (b) GMAW welding hardware block diagram

## 1.4.2 가스 메탈 아크 용접(GMAW) 극성

가스 메탈 아크 용접 과정에서 전극 와이어와 모재 사이에 발생하는 아크로 인해 용융되어 용접이 된다. 전극 와이어와 모재를 양극 또는 음극에 연결함에 따라 특성이 달라지며, 이를 극성(Polarity)이라고 부른다.

극성은 직류 역극성(Direct Current Electrode Positive : DCEP), 직류 정극성(Direct Current Electrode Negative : DCEN), 교류(Alternating Current : AC)로 구분하며 이러한 극성에 따라 전극 와이어의 용융량과 모재의 입열량 그리고 아크 안정성 등의 차이점이 있다. 이를 Table. 1.1에 나타내었다.

직류 역극성(DCEP)에서는 전극 와이어를 전원의 양극(+) 단자에 연결하고, 모재에는 음극(-) 단자를 연결한다. 직류 역극성에서는 모재에 더 많은 열을 집중시켜 용입 깊이를 증가시키는 효과를 가진다. 따라서, 가스 메탈 아크 용접에서는 보다 깊은 용입과 더욱 안정적인 아크 형성을 위해 직류 역극성을 주로 사용한다. 특히, 알루미늄과 같은 비철금속을 용접할 때, 아르곤(Ar)과 같은 보호가스를 사용하면 음극인 모재 표면에 존재하는 산화막을 사이에 두고 전자가 산화막을 통과하는 터널링현상이 발생한다. 이에 따라, 아크열에 의해 산화막이 파괴되며, 이 과정에서 발생하는 청정효과는 산화막을 제거하는 데 매우 효과적이다.

직류 정극성(DCEN)은 전극 와이어를 전원의 음극(-) 단자에 연결하고 모재를 양극(+) 단자에 연결하는 극성이다. 용접전류는 무게가 가벼운 전자에 의해 흐르고, 아크의 전자가 양극에 충돌하면 전자가 보유한 열 및 운동에너지를 양극으로 방출하기 때문에, 양극에서 발생하는 열량은 음극에 비해 증가한다. 그러므로 직류 정극성으로 용접하면 모재의 용입이 감소하고, 전극 와이어의 용융량이 많아진다. 직류 정극성은 용적표면에 발생하는 음극 점이 산화막을 따라 이동하거나 음극 제트가 발생하여 직류 역극성에 비해 용융 금속 이행과 아크가 약간 불안하게 된다.

교류(AC)는 직류 역극성과 직류 정극성이 반복함으로 두 가지 극성의 효과를 동시에 얻을 수 있다.

**Table. 1.1 Effects of polarity in GMAW**

	DCEP DCRP or Reverse Polarity	DCEN DCSP or Straight Polarity	AC
<b>Appx. Heat Distribution</b>	66% heat at plate 33% heat at electrode wire	33% heat at plate 66% heat at electrode wire	50% heat at plate 50% heat at electrode wire
<b>Oxide Cleaning</b>	Strong cathodic cleaning action	No cathodic cleaning action	Half cathodic cleaning action
<b>Bead Penetration</b>	Deep	Shallow	Moderate
<b>Bead Width</b>	Narrow	Wide	Moderate
<b>HAZ</b>	Wide	Narrow	Moderate
<b>Fusion</b>	Proper Melting	insufficient Melting	Moderate Melting
<b>Main Application</b>	All consumable welding processes use this polarity by default	Surfacing/over laying application where penetration is undesirable	Materials where oxide cleaning is necessary I.e. Aluminum welding

### 1.4.3 가스 메탈 아크 용접(GMAW) 용융 금속 이행

가스 메탈 아크 용접에서의 용융 금속 이행은 전극 와이어에서 아크열에 의해 용융된 금속이 아크를 통해 모재로 이행하는 현상이다. 이를 용적 이행(Droplet transfer), 금속 이행(Metal transfer)이라고도 한다. 용융 금속 이행은 용접 소재, 전극 와이어, 보호가스, 용접조건 등에 따라 다양하게 나타난다. 가스 메탈 아크 용접에서 용융 금속 이행의 다양한 형태를 Fig. 1.5에 나타내었다.

단락 이행(Short circuit transfer)은 보호가스 종류와 관계없이 아크 길이가 짧은 상태에서 발생하는 특정한 이행 형태이다. 와이어 끝의 용적이 용융지에 순간적으로 접촉하며, 즉 단락되면서 용융지로 이행한다. 이 이행 과정에서 주요 역할을 하는 힘은 표면장력이며, 전자기력이 보조적인 역할을 한다. 단락 이행은 초당 70회의 빈도로 발생하며, 주로 저전류 및 저전압(20V 내외)에서 나타난다. 이러한 특성으로 인해 단락 이행은 입열량이 적어 박판 용접에 적합하다. 그러나 단락 이행 모드를 사용할 때는 스파터가 많이 발생하는 단점이 있다. 스파터는 용접 공작물의 표면에 부착되어 균열의 원인이 될 수 있으며, 용접 토치 내부에도 부착되어 보호가스의 흐름을 방해할 수 있다.

입상 이행(Globular transfer)은 주로 고전류 영역에서 CO<sub>2</sub>가 30% 이상 포함된 혼합가스나 헬륨(He)을 사용할 때 발생하는 이행 형태이다. 용적의 직경이 전극 와이어의 직경보다 커지며, 주로 중력에 의해 용융지로 이행한다. 이 이행 과정에서 중력이 가장 큰 영향을 주는 힘으로 작용하며, 표면장력과 전자기력이 이를 보조한다. 입상 이행은 초당 몇 회에서 수십 회 정도의 빈도로 용적이 이행되며, 불규칙적인 단락 현상을 동반한다.

스프레이 이행(Spray transfer)은 고전류 범위에서 아르곤(Ar) 또는 헬륨(He) 함량이 80% 이상인 보호가스를 사용하고 천이전류 이상 증가할 때 나타나는 이행 형태이다. 전극 와이어 직경보다 작은 크기의 용적이 이행되며, 이 과정에서 단락 현상이 발생하지 않는다. 스프레이 이행에서는 전자기력이 가장 큰 영향을 주는 힘으로 작용하며, 중력이 보조적인 역할을 한다. 이 이행 방식은 초당 약 100에서 300회의 높은 빈도로 용적이 이행되며, 주로 후판 용접, 철강, 알루미늄 및 구리 합금 용접에 적용된다.

펄스 이행(Pulse transfer)은 펄스형 전원을 사용하는 가스 메탈 아크 용접에서 나타나는 특수한 이행 형태이며, 스프레이 이행의 단점을 최소화하면서 장점을 극대화하는 것이 주요 목적이다. 용적이 전극 와이어의 직경과 유사하며, 단락 없이 이행된다. 펄스 이행 과정에서는 베이스 전류가 흐를 때 아크 유지가 주요 목적이며, 이때 용융될 전극 와이어 끝부분이 예열된다. 그 후, 피크 전류가 흐르는 동안 전극 와이어가 급격히 용융되고, 강한 전자기력에 의해 용적이 전극 와이어에서 분리되어 용융지로 이행된다. 이행 횟수는 펄스의 주파수에 의해 결정된다. 펄스 이행은 OPD(One Pulse One Drop)이행, 즉 하나의 펄스 주기당 하나의 용적이 모재로 이행되는 것이 가장 이상적이다. OPD 상태에서는 아크가 가장 안정이며, 각 이행 사이에 용융지가 안정화되어 고품질의 용접부를 형성할 수 있다. Fig. 1.6에 펄스 이행의 모식도를 나타내었다.

이러한 용융 금속 이행 중 펄스 이행은 스프레이 이행 및 입상 이행에서 발생하는 위치 제한을 완화함으로써 모든 용접 위치에서의 사용을 가능하게 하여 다용도성이 높은 이송 모드로 평가받는다. 또한, 이 방식은 높은 용착률과 우수한 용접 비드 외관을 형성하며, 스패터 발생을 최소화하는 특징을 가지고 있다. 특히, 펄스 이행은 박판이나 높은 열에 민감한 소재의 용접에 매우 유용하며, AC 펄스 MIG 용접은 이에 포함된다.

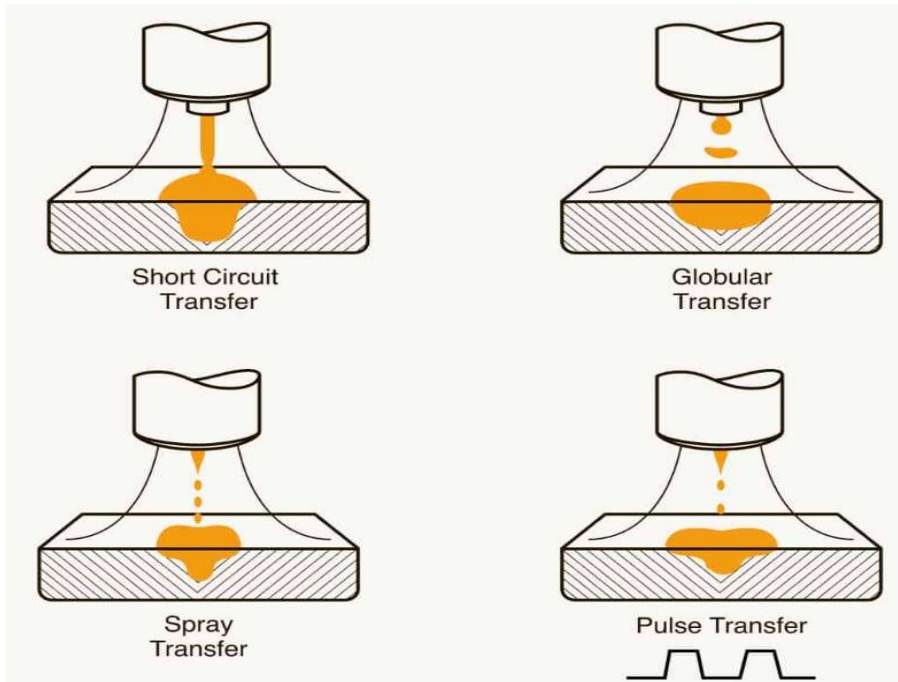


Fig. 1.5 Schematic of GMAW metal transfer modes

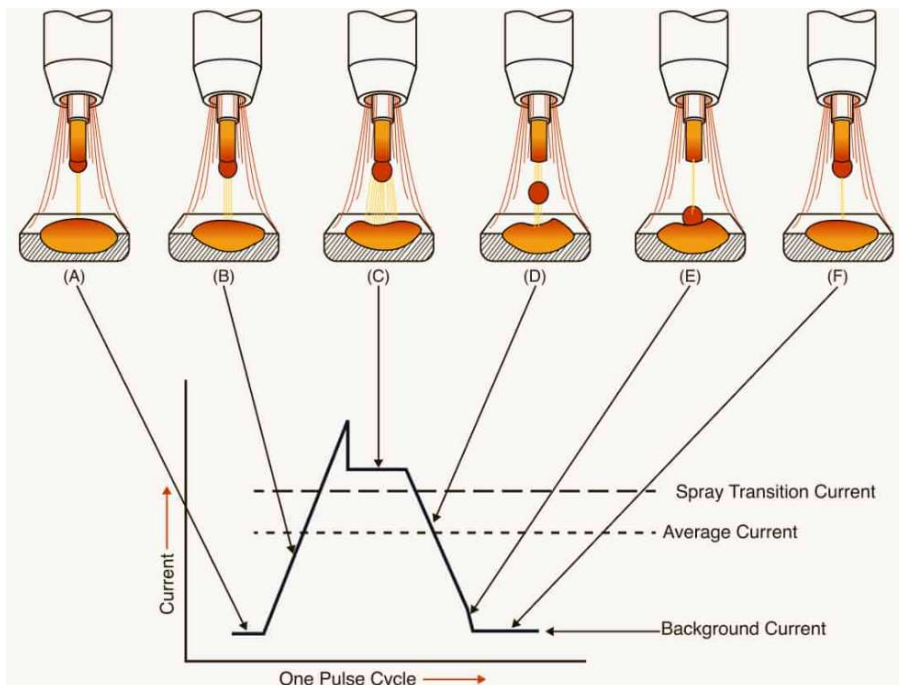


Fig. 1.6 Schematic of pulse transfer mode works

## 1.5 AC 펄스 MIG 용접

### 1.5.1 AC 펄스 MIG 용접 특성

가스 메탈 아크 용접은 자동화 및 로봇 적용이 용이하여 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다.[39][40] 그리고 가스 메탈 아크 용접은 연속적인 전극 와이어의 공급과 높은 용접전류를 활용하여 높은 용착량과 용접 속도 등 많은 장점이 있다. 이로 인해 효율성이 높고, 대규모 생산에 특히 적합하다. 그러나 가스 메탈 아크 용접은 용융 금속 이행의 조절에 한계가 있으며 특히, 기공 형성과 같은 여러 복합적인 결함에 민감하다는 단점을 가지고 있다.

이러한 가스 메탈 아크 용접의 단점을 보완하기 위해 AC 펄스 MIG가 개발되었다. AC 펄스 MIG 용접은 직류 역극성과 직류 정극성의 두 구간을 설정하고, 이 두 구간을 EN 극성비에 따라 주기적으로 반복하는 용접법이다. 이를 통해 직류 역극성과 직류 정극성의 장점을 동시에 활용할 수 있다.

AC 펄스 MIG 용접의 주요 장점 중 하나는 용접과정에서 발생하는 청정효과를 통해 용접부의 산화를 현저히 줄이는 능력이다. 이 청정효과는 특히 산화물층을 형성하기 쉬운 알루미늄 합금 및 티타늄 합금과 같은 소재를 용접할 때 큰 이점으로 작용한다. 용접과정에서 산화 방지는 용접부의 무결성과 강도를 유지하는 데 매우 중요하다.

또한, AC 펄스 파형의 변수를 조절함으로써 정밀한 용착량 제어가 가능하다. 아울러, 스파터가 거의 발생하지 않는 용융 금속 이행을 가능하게 하며, 기존의 가스 메탈 아크 용접 보다 낮은 에너지를 사용하면서도 유사한 품질의 용접 비드를 얻을 수 있다. 이 특성은 특히 두께가 얇은 모재의 용접에 유용하며, 이는 열에 민감한 소재나 복잡한 형상의 구조물 용접에도 적합하다.



AC 펄스 MIG 용접의 전류파형을 Fig. 1.7에 나타내었다. AC 펄스 MIG 용접의 전류파형은 식 (1.1) 과 같이 EN 극성비로 표현된다. 여기서  $I_{EP}$  는 EP 구간의 펄스 전류(A),  $I_B$  는 EP 구간의 베이스전류(A),  $I_{EN}$  는 EN 구간의 전류(A),  $T_{EP}$  는 EP 구간의 펄스전류 시간(sec),  $T_B$  는 EP 구간의 베이스전류 시간(sec),  $T_{EN}$  는 EN 구간의 시간(sec)을 나타낸다. 이러한 공정변수에 의해 아크의 안정성이 변하게 된다.

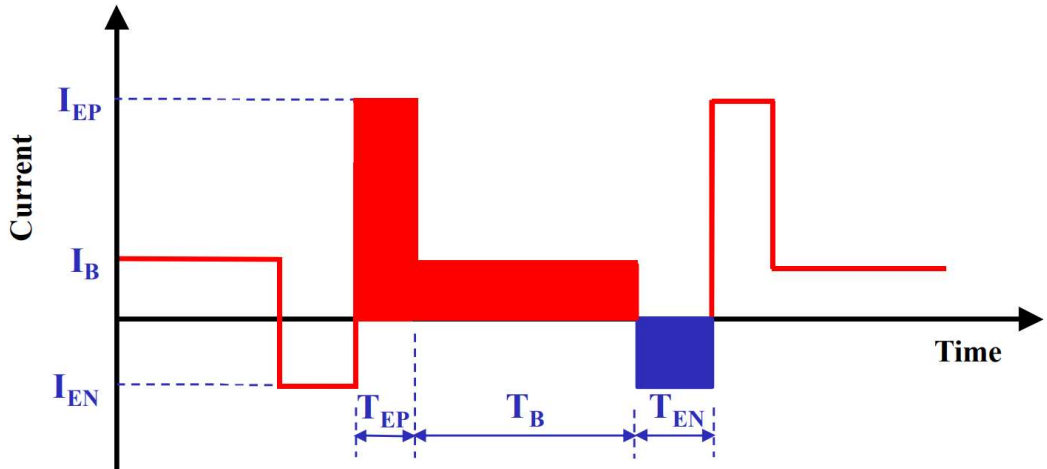


Fig. 1.7 Schematics of AC pulse MIG welding current waveform

$$ENratio(\%) = \frac{(I_{EN} \times T_{EN})}{(I_{EP} \times T_{EP}) + (I_B \times T_B) + (I_{EN} \times T_{EN})} \times 100 \quad (1.1)$$

$I_{EP}$  : EP 구간의 펄스전류(A)

$I_B$  : EP 구간의 베이스전류(A)

$I_{EN}$  : EN 구간의 전류(A)

$T_{EP}$  : EP 구간의 펄스전류 시간(sec)

$T_B$  : EP 구간의 베이스전류 시간(sec)

$T_{EN}$  : EN 구간의 시간(sec)

## 1.5.2 EN 극성비에 따른 용접 특성

직류 역극성 구간에서는 음극점이 모재에 형성되어, 아크 루트가 주로 모재 쪽에 집중된다. 이 구간에서 전극 와이어의 용융은 모재에 집중된 열에 의해 이루어지며, 결과적으로 용적은 작고 고온이 된다. 그러나 이때, 아크열이 전극 와이어를 용융시키는 데 효과적으로 사용되지 않아, 전극 와이어의 용융속도가 상대적으로 느려진다.

반면, 직류 정극성 구간에서는 아크 루트가 미용융된 전극 와이어의 표면, 즉 용적의 표면을 균일하게 덮고 있다. 이때 음극점은 용적 위에서 형성되며, 아크열이 전극 와이어를 용융하는 데 더 효과적으로 사용된다. 이는 전극 와이어의 용융속도를 증가시키며, 결과적으로 크고 저온의 용적이 형성된다. 그러나 이 구간에서는 음극적이 용적의 표면 위를 불규칙적으로 빠르게 이동하며, 이에 따라 아크가 다소 불안정해질 수 있다.

따라서 일정한 용접전류에서 EN 극성비가 증가함에 따라 직류 정극성 구간의 증가로 인해 전극 와이어의 용융속도는 높아진다. 이에 따라 용착금속량이 증가하고, 고속 용접이 가능해진다. 또한 일정한 전극 와이어 용융속도에 있어서 EN 극성비가 증가함에 따라 용접전류가 감소하며, 이에 따라 모재가 받는 입열량이 감소하게 된다.

## 제 2 장 연구 방법

### 2.1 실험방법 및 용접조건

#### 2.1.1 사용 소재 및 용접법

본 연구에서 사용된 이종재는 두께 2.5mm의 알루미늄 합금(AA5052-H32) 및 두께 3mm의 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)이며, 시험편의 제원은 200mm(L) X 100mm(W) 크기로 제작하였으며, 각 소재의 화학적 조성 및 기계적 물성치를 Table. 2.1과 Table. 2.2에 나타내었다.

이종재 알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)에 AC 펄스 MIG 용접을 적용하여 겹치기(Lap) 이음 용접을 실시하였다. 또한 AC 펄스 MIG 용접 시 사용된 전극 와이어는 용접성을 좋게 해주는 즉, 티타늄 합금 소재의 브레이징 시 젖음성을 향상되게 시켜주는 Si 성분 함량이 높은 Al-Si계의 ER 4047(AlSi12) 전극 와이어를 사용하였으며, 실험에 사용된 전극 와이어의 화학적 조성은 Table. 2.3에 나타내었다.[41]

Fig. 2.1에 나타낸 모식도와 같이 상판을 알루미늄 합금(AA5052-H32)으로, 하판은 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)으로 20mm 겹치기 이음으로 AC 펄스 MIG 용접을 실시하였다.

Table. 2.1 Chemical compositions of base materials

Chemical compositions (Wt%)								
Material	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
AA5052-H32	Bal.	0.25	0.4	0.1	0.1	2.55	0.1	0.18
Material	Ti	Al	V	Fe	Si			
Ti-6Al-4V	Bal.	6	4	0.25	0.05	.		

Table. 2.2 Mechanical properties of base materials

Mechanical properties	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
AA5052-H32	228	193	12
Ti-6Al-4V	950	880	14

Table. 2.3 Chemical compositions of electrode wire

Chemical compositions (Wt%)								
Material	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be
ER 4047	Bal.	12	0.8	0.3	0.15	0.1	0.2	0.0003

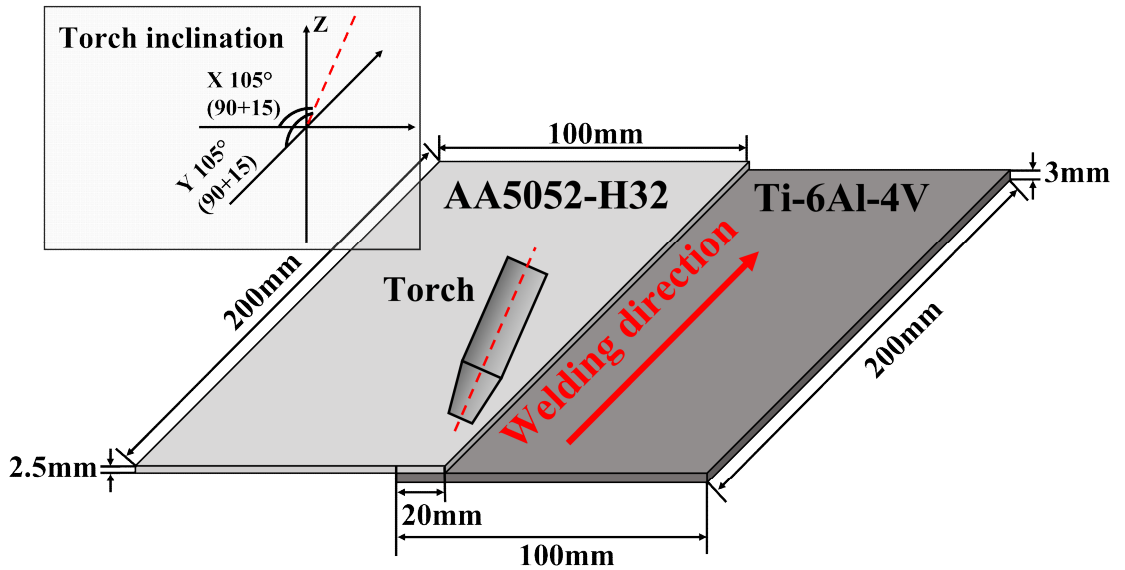


Fig. 2.1 Schematic of AA5052-H32 and Ti-6Al-4V welded joints specimen

## 2.1.2 실험장비 및 용접조건

본 연구에서 알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)에 대해 AC 펄스 MIG 용접 시 사용된 용접기는 Fig. 2.2에 나타난 Daihen社의 DW300을 사용하였다. DW300의 주요 사양은 정격 출력 전류 30 ~ 300 A, 정격 출력 전압 12 ~ 35 V를 사용하며, 정격 사용율은 최대 80%이다. 용접에 사용된 로봇은 Fig. 2.2에 나타난 OTC社의 FD-V6을 사용하였다. FD-V6의 주요 사양은 최대 허용 기판 하중 6kg의 수직 다관절형 6축 로봇이다.

AC 펄스 MIG 용접으로 겹치기 이음 용접 시 용접 공정변수로는 용접전류, EN 극성비, 이송 속도, CTWD(Contact tip to work distance), 토치 각도, 보호가스 및 보호가스 유량, 전극 와이어 위치 등이 있다.

본 연구에서는 알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 겹침 부 20mm 겹치기 이음 용접으로 갭(Gap) 없이 진행하였으며, 이송 속도 50cm/min, 토치 각도는 측면 각 15°, 전진 각 15°, 보호가스는 아르곤(Ar)을 사용하였으며, 보호가스의 유량은 18L/min, CTWD(Contact tip to work distance)는 15mm로 고정하여 실험을 실시하였다. 이때 적용된 용접 공정변수를 Table. 2.4에 나타내었다.

특히, 본 연구에서 AC 펄스 MIG 용접 시 주요 용접 공정변수는 용접전류와 EN 극성비로 설정하였다. 용접전류는 80A, 90A, 100A, 110A, 120A로 증가시켰으며, 각 용접전류에서 EN 극성비 0%, 10%, 20%로 변화시켜가며 실험을 실시하였다. 또한, EN 극성비가 증가함에 따라 모재에 대한 입열량이 감소하여, 이종재 용접 시 금속간화합물의 형성을 억제시킬 수 있다. 따라서 이를 주안점으로 용접전류별 EN 극성비에 따른 용접부 비드 형성과 금속간화합물에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

본 실험에 앞서 전극 와이어 위치에 따른 가장 건전한 용접부를 얻을 수 있는 조건을 선정하기 위한 실험을 실시하였다. 용접전류 120A, EN 극성비 0%의 고정조건에서 Fig. 2.3에 나타낸 모식도와 같이 전극 와이어를 상판 알루미늄 합금의 오른쪽 상단 끝단으로부터 0mm, 1mm, 2mm 떨어진 위치(Fig. 2.3의 ①, ②, ③)와 상판 알루미늄 합금의 오른쪽 하단 끝단으로부터 0mm, 그리고 티타늄 합금 측으로 1mm, 2mm 떨어진 위치(Fig. 2.3의 ④, ⑤, ⑥)로 이동하여, 총 6가지 조건에 대해 실험을 실시하였다.



Fig. 2.2 AC pulse MIG welding machine and 6 axis welding robot

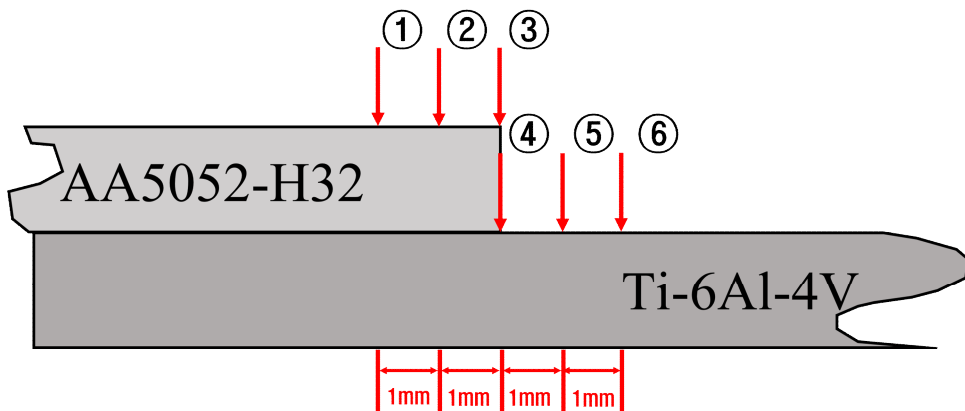


Fig. 2.3 Schematic of electrode wire positions in specimen

**Table. 2.4 Welding conditions of AC pulse MIG**

Welding parameters	Values
Welding process	AC pulse MIG
Type of joint	Lap joint
Electrode wire type	ER 4047
Electrode wire diameter (mm)	1.2
Overlapping length (mm)	20
Travel speed (cm/min)	50
Torch inclination ( ° )	15
Gap (mm)	0
Contact tip to work distance (mm)	5
Shielding gas (%)	Ar 99.99
Shielding gas flow rate (L/mm)	18
Current (A)	80, 90, 100, 110, 120
EN ratio (%)	0, 10, 20
Electrode wire position	① Al side 2mm ② Al side 1mm ③ Al side 0mm (Top) ④ Al side 0mm (Bottom) ⑤ Ti side 1mm ⑥ Ti side 2mm

## 2.2 용접부 특성 평가

### 2.2.1 비드 외관 및 단면 특성 평가

알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 AC 펄스 MIG 용접부에 대한 용접전류별 EN 극성비에 변화에 따른 용접부 비드 외관 및 단면을 분석하였다.

용접부 비드 관찰을 위해 용접부를 절단 가공하고, 핫 마운팅(Hot mounting)한 뒤 연마(Polishing)를 실시하였다. Sand paper를 사용하여 #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000 순서대로 연마하였다. 아울러 Diamond suspension paste 9 $\mu$ m, 6 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m를 이용하여 더욱 세밀하게 연마하였다.

AC 펄스 MIG 용접부의 비드 단면의 주요 특성 평가 인자인 젖음길이(Wetting distance)와 젖음각(Wetting angle) 그리고 비드높이(Bead height)를 광학현미경(Optical microscope)을 이용하여 용접성을 평가하였다. 젖음길이, 젖음각, 비드높이 측정 방법에 대한 모식도를 Fig. 2.4에 나타내었다.

또한, 용접부 접합 계면에서 형성되는 금속간화합물 층의 두께 및 상을 평가하기 위해 JEOL社의 JMS-7900F 장비의 Scanning electron microscope (SEM), Energy dispersive spectroscopy (EDS)를 이용하여 SEM-EDS 분석을 실시하였다.

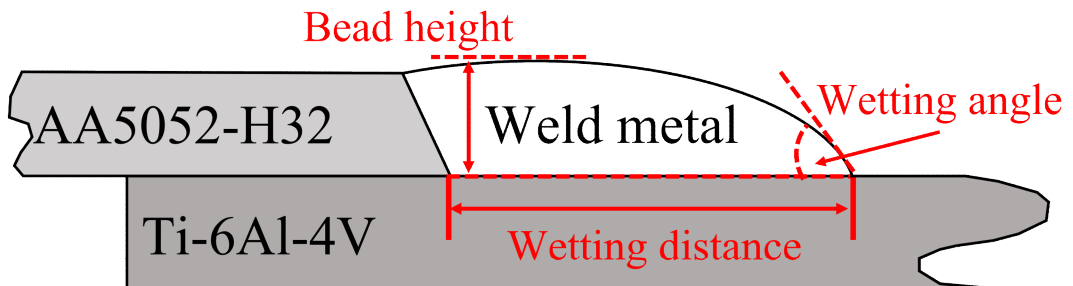


Fig. 2.4 Schematics of wetting distance, wetting angle, and bead height



## 2.2.2 기계적 특성 평가

인장-전단 하중을 평가하기 위해 용접조건별로 3개의 시험편에 대해 Shimadzu社의 만능재료시험기(Universal testing machine : UTM) 장비를 사용하여 인장-전단 하중 시험을 실시하고, 이를 평균값으로 나타내었다. 시험편의 물림부는 30mm로 하였고, 시험 속도는 1mm/min으로 진행하였으며, 하중축에 시험편의 하판인 티타늄 합금을 체결하여 수직 방향으로 진행되었다. 인장-전단 하중 시험편 제원은 Fig. 2.3에 나타내었다.

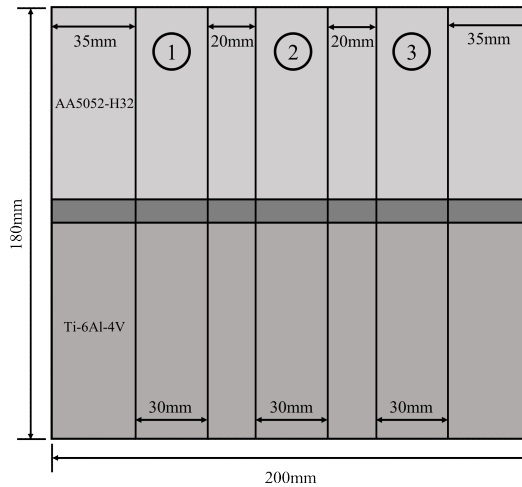


Fig. 2.5 Schematics of tensile-shear load test specimen

또한 용접부의 경도를 평가하기 위해 AKASHI社 HM-112 Vickers 경도 시험기를 사용하여, 하중 500g, 유지 시간 10초, 0.2 mm 간격으로 상판 알루미늄 합금 두께의 중간선을 따라 용착금속부(WM), 열영향부(HAZ), 모재(BM)에 대해서 경도를 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 2.6에 나타내었다.

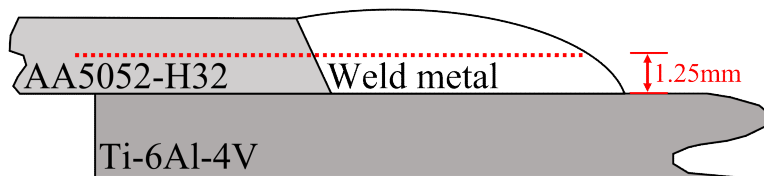


Fig. 2.6 Schematics of vickers hardness measurement location

## 제 3 장 연구 결과 및 고찰

### 3.1 용접 공정변수에 따른 용접부 특성

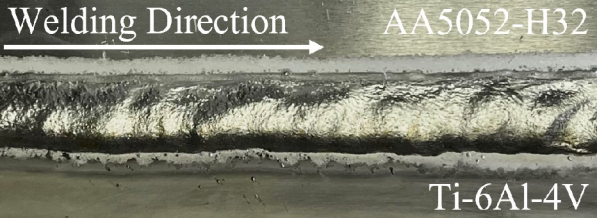
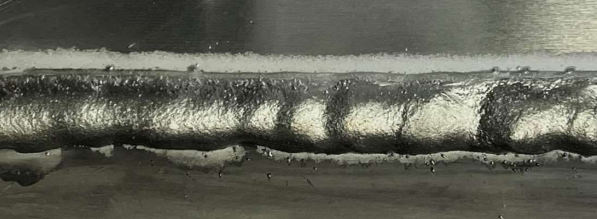



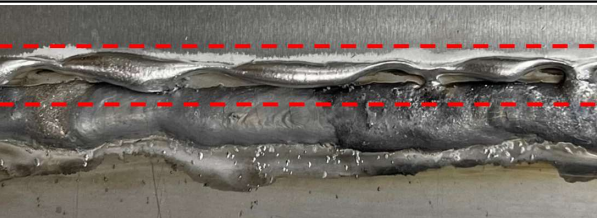
#### 3.1.1 전극 와이어 위치 변화

전극 와이어 위치에 따른 가장 양호한 용접부를 얻을 수 있는 조건을 선정하기 위해 용접전류 120A, EN 극성비 0% 조건으로 고정하고, 전극 와이어를 상판 알루미늄 합금의 오른쪽 상단부 끝단으로부터 0mm, 1mm, 2mm 떨어진 위치(Fig. 2.3의 ①, ②, ③)와 상판 알루미늄 합금의 오른쪽 하단부 끝단으로부터 0mm, 그리고 티타늄 합금 측으로 1mm, 2mm 떨어진 위치(Fig. 2.3의 ④, ⑤, ⑥)의 총 6가지 조건에서 전극 와이어 위치가 용접부에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

전극 와이어 위치 오프셋 조건별 용접부의 비드 외관을 Table. 3.1에 나타내었다. 용접부 비드 외관을 관찰한 결과, 전극 와이어를 티타늄 합금 측으로 2mm 위치한 조건(⑥)을 제외한 5개의 조건은 용접이 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

이는 전극 와이어를 티타늄 합금 측으로 2mm 위치한 조건(⑥)은 실험에서 사용한 전극 와이어의 지름이 1.2 mm이기 때문에 상판의 알루미늄 합금 모재까지 용접이 적절히 이루어지지 않은 것으로 생각된다.

Table. 3.1 Bead surface appearance of welded joints with different electrode wire positions

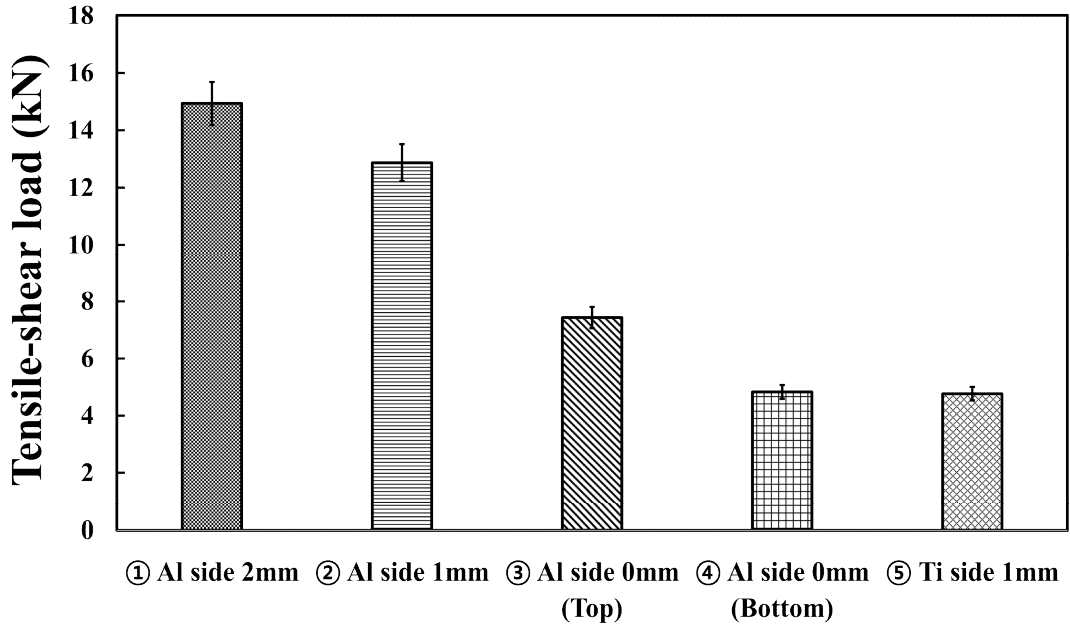
Electrode wire position	Bead surface appearance
① Al side 2mm	
② Al side 1mm	
③ Al side 0mm (Top)	
④ Al side 0mm (Bottom)	
⑤ Ti side 1mm	
⑥ Ti Side 2mm	

따라서 용접이 이루어지지 않은 전극 와이어를 티타늄 합금 측으로 2mm 위치한 조건(⑥)을 제외한 5가지 조건에 대해서 인장-전단 하중 시험을 실시하였다. 각 전극 와이어 위치에 따른 조건에 대한 인장-전단 하중 시험 결과를 Fig. 3.1과 Table. 3.2 에 나타내었다.

전극 와이어가 티타늄 합금에 직접적으로 닿아 있는 알루미늄 합금 측에서 하단부 0mm 위치한 조건(④)과 티타늄 합금 측으로 1mm 위치한 조건(⑤)은 용접 시 상판의 알루미늄 합금과 전극 와이어의 용융량이 충분하지 못하여 전극 와이어가 알루미늄 합금에 맞닿아있는 조건 대비 인장-전단 하중이 현저히 낮은 결과가 나타난 것을 확인할 수 있었다.

전극 와이어를 알루미늄 합금 측에서 상단부 0mm 위치한 조건(③)은 전극 와이어가 알루미늄 합금의 상단 끝단 부에 위치함으로써, 용접 시 모서리 부분에서 용융이 빠르게 일어난다. 이에 따라 아크의 길이가 불규칙하게 변하며, 결과적으로 아크가 불안정해진다. 따라서 과도한 용융과 아크의 불안정성으로 인해 인장-전단 하중이 다소 낮은 결과가 나타났다고 판단된다.

전극 와이어를 알루미늄 합금 측으로 2mm 위치한 조건(①)과 알루미늄 합금 측으로 1mm 위치한 조건(②)에서 각각 인장-전단 하중을 평균 약 14.9kN, 평균 약 12.9kN을 얻었다. 이는 티타늄 합금의 계면에서 전극 와이어의 용착량이 적절하여 타 조건 대비 용접이 잘 이루어진 것으로 판단된다.



### Electrode wire position

Fig. 3.1 Tensile-shear load of welded joints with different electrode wire positions

Table. 3.2 Tensile-shear load of welded joints with different electrode wire positions

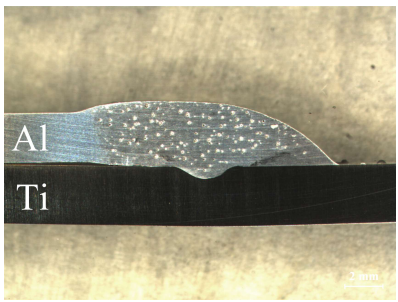
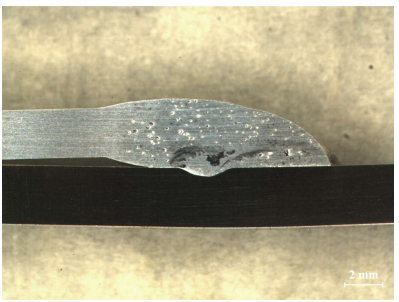
Electrode wire position	Tensile-shear load (kN)
① Al side 2mm	14.9
② Al side 1mm	12.9
③ Al side 0mm (Top)	9.8
④ Al side 0mm (Bottom)	4.8
⑤ Ti side 1mm	4.7

타 조건 대비 상대적으로 높은 인장-전단 하중을 보인 전극 와이어를 알루미늄 합금 측으로 2mm 위치한 조건(①)과 알루미늄 합금 측으로 1mm 위치한 조건(②)에 대하여 용접부 비드 단면을 분석하였다. Table. 3.3에 전극 와이어 위치 변화에 따른 용접부 비드 단면의 젖음길이, 젖음각과 비드높이를 나타내었다.

전극 와이어를 알루미늄 합금 측으로 2mm 위치한 조건(①)과 알루미늄 합금 측으로 1mm 위치한 조건(②)을 비교하였을 때, 전극 와이어가 상판 알루미늄 합금의 오른쪽 상단부 끝단으로부터 더 떨어진 지점에 위치할수록, 젖음길이는 증가하는 반면, 젖음각과 비드 높이는 감소하였다. 이는 전극 와이어가 티타늄 합금의 계면에서 용착되는 과정에서 젖음성이 향상되어 젖음길이가 증가하였다고 판단된다. 이에 따라, 젖음길이의 증가는 인장-전단 하중의 증가로 이어진다고 사료된다.

따라서 용접부 비드 외관 및 단면이 양호하고 평균 약14.9kN의 인장-전단 하중을 얻은 전극 와이어를 알루미늄 합금 측으로 2mm 위치한 조건(①)에서 실험을 실시하였다.

Table. 3.3 Bead cross section view of welded joints with different electrode wire positions

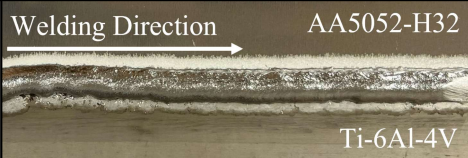


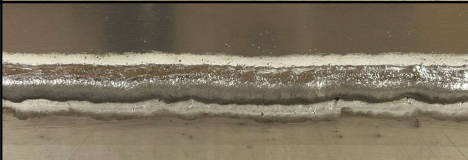









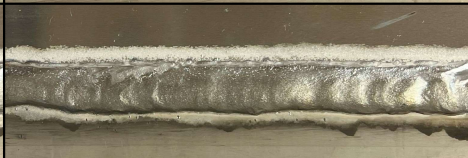

Electrode wire position	① Al side 2mm	② Al side 1mm
Cross section		
Wetting distance (mm)	12.4	10.0
Wetting angle (°)	38.2	50.4
Bead height (mm)	3.3	3.7

### 3.1.2 용접전류별 EN 극성비 변화

앞절 3.1.1 실험을 통해 도출된 최적 전극 와이어 위치의 조건인 상판 알루미늄 합금의 오른쪽 상단부 끝단으로부터 2mm 위치한 조건을 고정으로 하고, 용접부에 대한 용접전류별 EN 극성비 변화가 미치는 영향을 고찰하기 위해 실험을 실시하였다.

이에 대한 용접부 비드 외관을 Table. 3.4에 나타내었다. 모든 조건에서 상판의 알루미늄 합금 모재와 전극 와이어로 형성된 용융지는 티타늄 합금 계면에 골고루 습윤 되는 형태를 나타내었다. 특히, 용접전류 증가함에 따라 용착금속량이 증가하여 비드의 폭이 넓어지는 경향을 보였다.

Table. 3.4 Bead surface appearance of welded joints with EN ratios in different currents

Parameters		EN ratio (%)		
		0	10	20
Current (A)	80			
	90			
	100			
	110			
	120			



용접전류별 EN 극성비에 따른 용접부 비드 단면을 Table. 3.5에 나타내었다. 용접부 비드 단면 특성은 젖음길이, 젖음각, 비드 높이를 주요점으로 하여 고찰하였으며, 이에 대한 측정값을 Table. 3.6 나타내었다.

모든 용접조건에서 용접부의 비드 단면은 미려한 특성을 나타내었다. 또한, 용접전류가 증가할수록 알루미늄 합금 모재에서 용접 시 발생하는 수소가 빠른 용접 속도 및 응고 속도에 의해서 배출되지 못하고 티타늄 합금의 히트싱크(Heat sink) 작용으로 인해 냉각이 빨라져 용착금속부 내부에 응고되어 기공이 형성됨을 확인할 수 있었다.

특히, 용접전류 120A에서의 조건에서는 입열량이 높아져 티타늄 합금까지 용융되는 현상이 관찰되었다. 반면, 이러한 조건들을 제외한 나머지 실험 조건에서는 상대적으로 낮은 입열량으로 인해 티타늄 합금의 용융 온도보다 낮게 유지되어, 티타늄 합금이 완전히 용융되지 않았다는 것이 확인할 수 있었다. 이에 따라, 본 연구에서는 알루미늄 합금은 용융되었으나, 티타늄 합금은 브레이징됨을 알 수 있었다.

EN 극성비를 0%로 유지한 상태에서 용접전류를 80A에서 120A로 증가시켰을 때, 입열량이 증가함에 따라 티타늄 합금 계면에 용착되는 전극 와이어의 용융량이 증가하여 젖음길이가 용접전류 80A 조건일 때 6.8mm에서 용접전류 120A 조건에서는 12.4mm까지 점차 증가하는 결과를 확인할 수 있었다.

대조적으로, EN 극성비가 증가함에 따라 모든 용접전류 조건에서 젖음길이는 감소한 반면, 젖음각과 비드 높이는 증가하였다. EN 극성비가 높을수록 전류 파형에서 직류 정극성의 시간이 길어져 모재보다 전극 와이어에 열에너지가 집중되므로 전극 와이어 용융량이 증가하고 동시에 모재에 투입되는 열량이 줄어든다. 따라서 EN 극성비가 증가함에 따라 티타늄 합금의 계면에서 용융된 전극 와이어의 젖음성이 감소된다.

Table. 3.5 Bead cross section view of welded joints with EN ratios in different currents

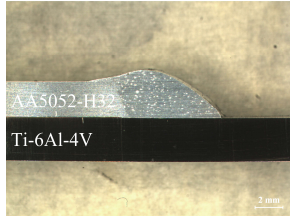
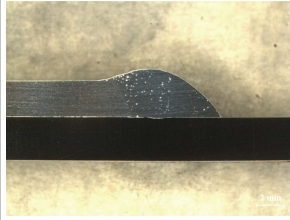
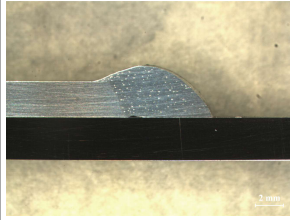
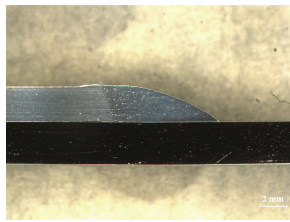
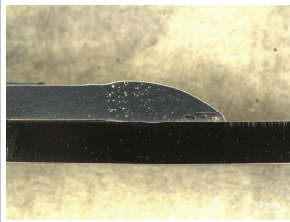
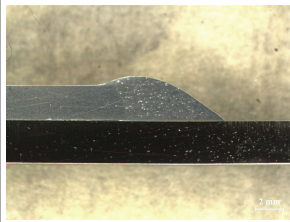
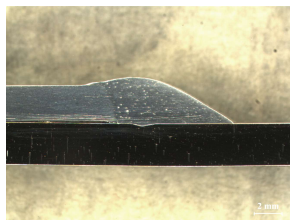
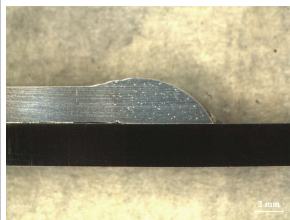
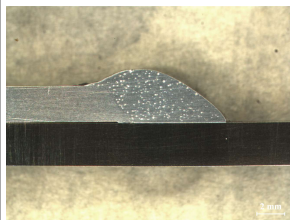

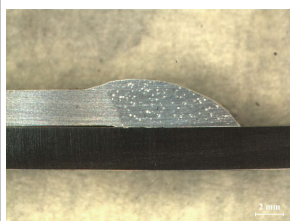
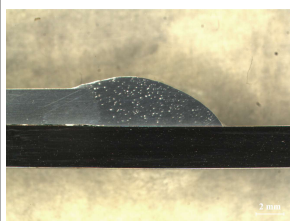


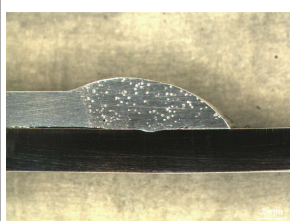
Parameters		EN ratio (%)		
		0	10	20
Current (A)	80			
	90			
	100			
	110			
	120			

Table. 3.6 Bead dimension of welded joints with EN ratios in different currents

Parameters				
Current (A)	EN ratio (%)	Wetting distance (mm)	Wetting angle (°)	Bead height (mm)
80	0	6.8	40.1	3.5
	10	6.6	47.4	3.7
	20	6.4	50.3	3.9
90	0	8.4	34.0	2.6
	10	7.7	34.6	3.0
	20	7.3	37.4	3.3
100	0	8.6	30.5	3.1
	10	7.3	43.9	3.4
	20	7.1	45.2	3.9
110	0	9.3	31.9	3.2
	10	9.0	39.6	3.7
	20	8.7	41.1	3.8
120	0	12.4	38.2	3.3
	10	10.5	38.4	3.3
	20	10.2	47.1	3.7

## 3.2 금속학적 특성 평가

### 3.2.1 금속간화합물 두께 분석

알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 AC 펄스 MIG 용접부에 대한 용접전류별 EN 극성비 변화에 따른 금속간화합물의 두께 변화를 고찰하고자 용접부 계면에서의 SEM 분석을 실시하였다. 알루미늄 합금과 티타늄 합금 용접 시 생성되는 Ti-Al계 금속간화합물은 취성의 특성을 지니고 있어 용접부의 강도를 저하시키는 인자이기 때문에 금속간화합물 층의 두께를 주안점으로 하여 고찰하였다. Fig. 3.5에서부터 Fig. 3.9까지 용접전류별 EN 극성비 증가에 따른 금속간화합물 두께의 SEM 사진을 나타내었다. 용접전류 80A 조건은 10,000배율로, 90A 조건과 100A 조건은 5,000배율로, 110A 조건과 120A 조건은 2,500배율로 촬영하였다. 이에 대한 측정값을 Table. 3.7 나타내었다.

용접전류가 증가할수록 금속간화합물의 두께가 용접전류 80A일 때 약 $0.83\mu\text{m}$ , 90A일 때 약 $2.93\mu\text{m}$ , 100A일 때 약 $3.75\mu\text{m}$ , 110A일 때 약 $5.01\mu\text{m}$ , 120A일 때 약 $19.1\mu\text{m}$ 로 증가함을 확인할 수 있었다. 용접전류가 증가함에 따라 용착금속량이 증가하고, 용접부 계면에 높은 입열이 발생하여 금속간화합물의 형성과 성장을 촉진한다. 또한 금속간화합물의 형태는 티타늄 합금 측으로 갈수록 상대적으로 균일한 두께의 분포 특성을 보인 반면, 용접전류가 증가할수록 알루미늄 합금 측은 불균일한 분포 특성을 확인할 수 있었다.

아울러, 용접전류별 EN 극성비가 증가할수록 금속간화합물의 두께는 감소하는 경향을 보였다. EN 극성비 20% 조건에서, 용접전류 80A일 때 약0.45 $\mu\text{m}$ , 90A일 때 약0.51 $\mu\text{m}$ , 100A일 때 약0.70 $\mu\text{m}$ , 110A일 때 약0.86 $\mu\text{m}$ , 120A일 때 약0.93 $\mu\text{m}$ 로 금속간화합물의 두께는 모든 조건에서 1.0  $\mu\text{m}$  이하로 감소하였다. 기공이나 크랙과 같은 결함은 발견되지 않았고, 금속간화합물 층 두께의 경우, 실제 적용하기 위해서는 10 $\mu\text{m}$  이내를 만족하는 것이 중요하다.[42][43] AC 펄스 MIG 용접 시 EN 극성비가 증가하면 EN 극성에서는 모재보다 전극 와이어에 더 많은 열원이 집중되고, 이는 용접되는 소재에 대한 입열을 낮추어 용접부 경계면의 온도가 낮아진다. 그러므로 온도가 낮을수록 이종재 사이의 원자 확산이 느려지므로 금속간화합물 층의 성장이 억제 가능함을 확인할 수 있었다.

또한 각 용접전류에서 EN 극성비가 증가할수록 금속간화합물 층이 다소 균일하게 분포하는 특성을 나타낼 수 있었다. 따라서 티타늄 합금에서 알루미늄 합금으로의 불균일 확산에 의한 금속간화합물 두께의 성장은 용접부 계면에서 높은 입열에 의해 증가된 표면 에너지에서 가속화될 수 있으며, 따라서 접합 계면에서 단위 시간에 더 급격한 온도변화를 의미한다고 볼 수 있다.

Table. 3.7 IMCs layer thickness dimension of welded joints with EN ratios in different currents

IMCs layer thickness ( $\mu\text{m}$ )		EN ratio (%)		
		0	10	20
Current (A)	80	0.83	0.63	0.45
	90	2.93	0.91	0.51
	100	3.75	1.13	0.70
	110	5.01	0.75	0.86
	120	19.1	1.69	0.93

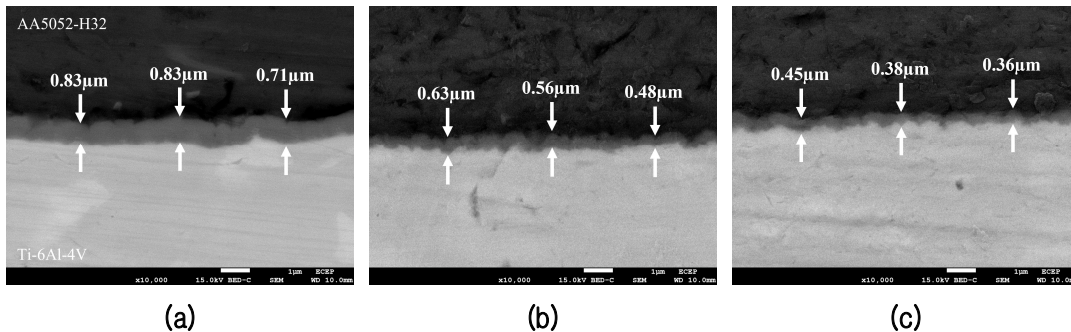


Fig. 3.2 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 80A, EN ratio 0%, (b) 80A, EN ratio 10%, (c) 80A, EN ratio 20%

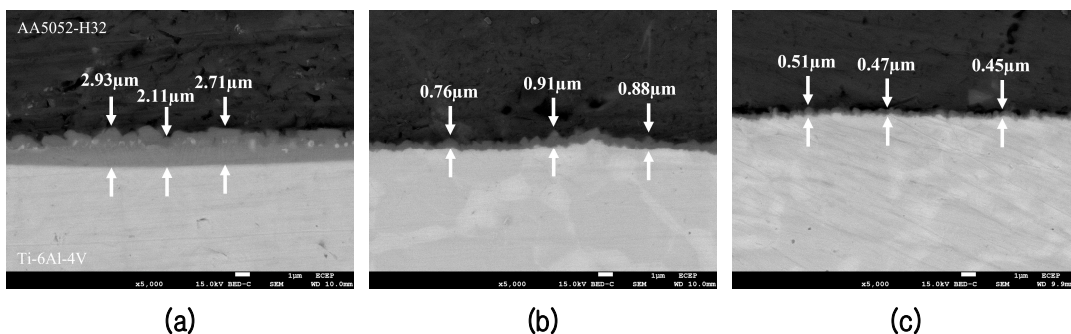


Fig. 3.3 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 90A, EN ratio 0%, (b) 90A, EN ratio 10%, (c) 90A, EN ratio 20%

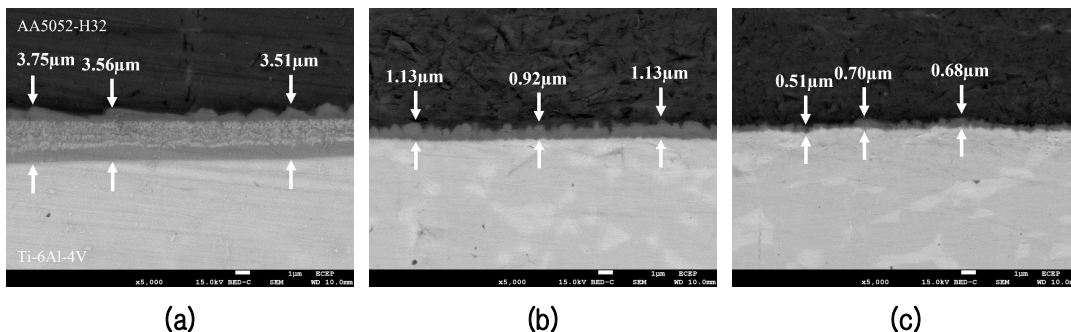
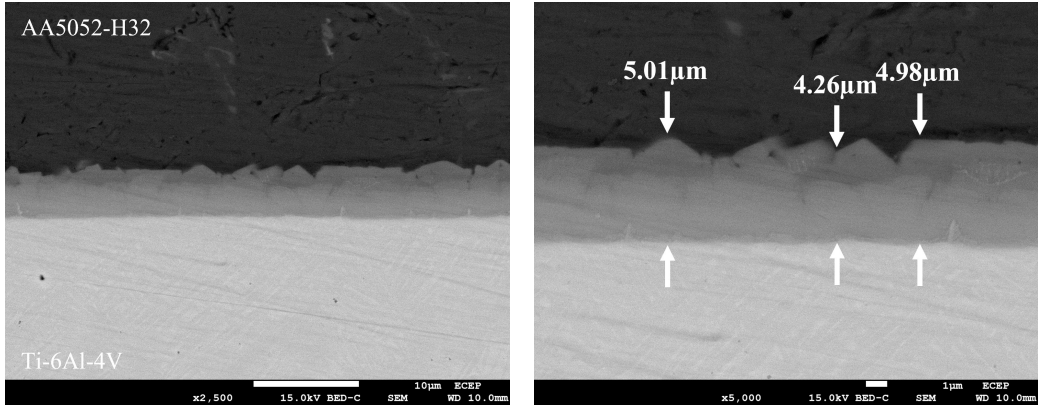
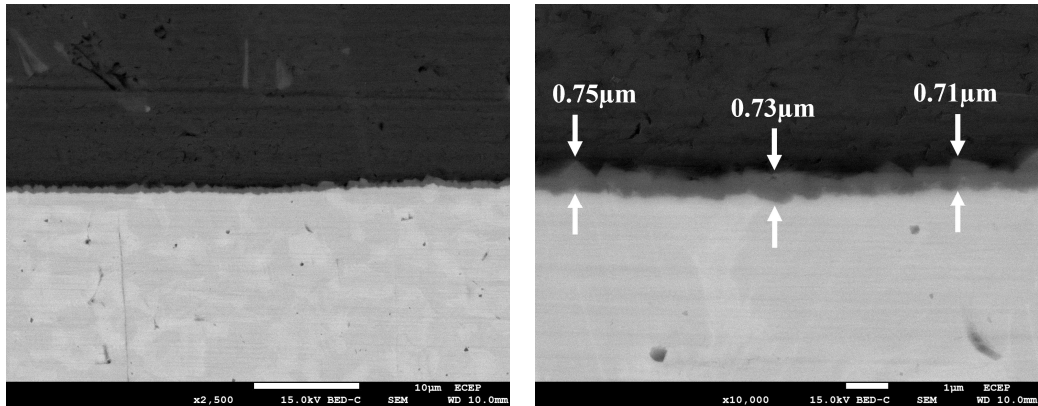


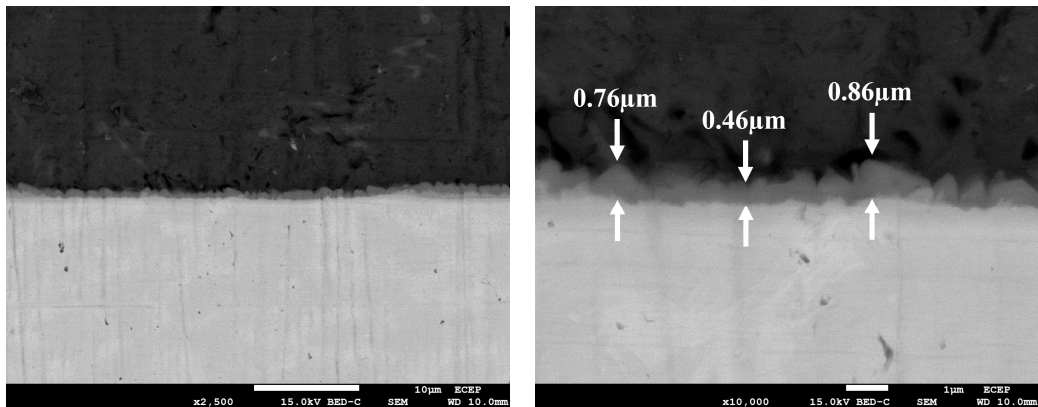
Fig. 3.4 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 100A, EN ratio 0%, (b) 100A, EN ratio 10%, (c) 100A, EN ratio 20%



(a)

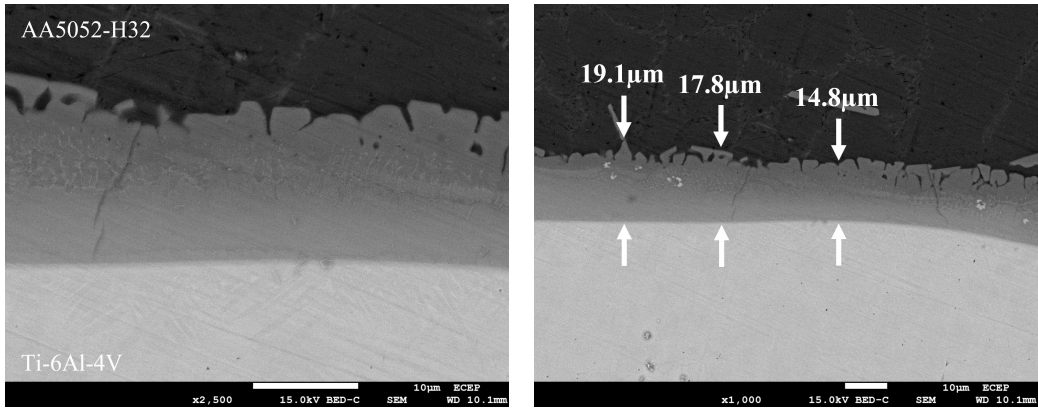


(b)

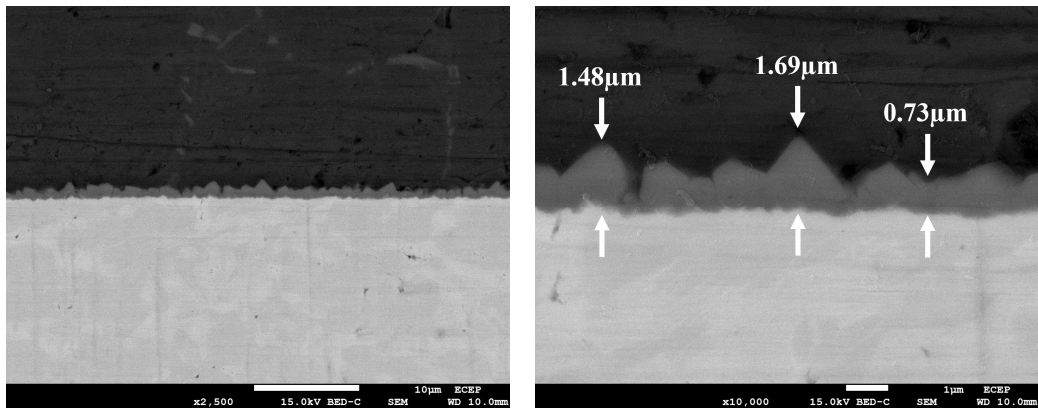


(c)

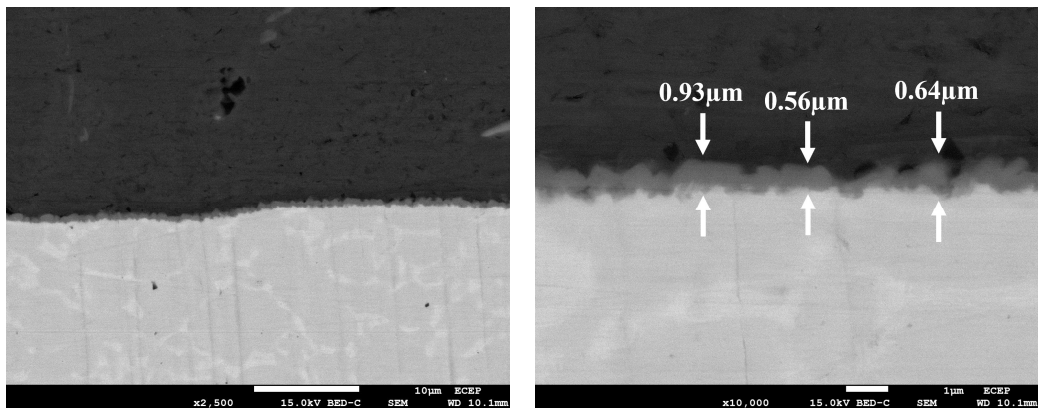
Fig. 3.5 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 110A, EN ratio 0%, (b) 110A, EN ratio 10%, (c) 110A, EN ratio 20%



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.6 SEM images of IMCs layer in AC pulse MIG welded joints; (a) 120A, EN ratio 0%, (b) 120A, EN ratio 10%, (c) 120A, EN ratio 20%



### 3.2.2 EDS 분석

알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 AC 펄스 MIG 용접부의 금속간화합물 층에 형성된 상을 분석하기 위해 EDS 점분석을 실시하였다.

알루미늄 합금과 티타늄 합금 용접부의 강도는 주로 용착금속부와 티타늄 합금 모재 사이의 브레이징 경계면에 의해 결정된다.[23][44] Fig. 3.11에 나타낸 Ti-Al 상태도에서  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $TiAl_2$ ,  $Ti_2Al_5$  및  $TiAl_3$ 와 같은 여러 금속간화합물이 형성된다. 이 중에서  $Ti_2Al_5$ 와  $TiAl_2$ 는  $TiAl$ 의 중간 생성물인 것으로 알려져 있다.

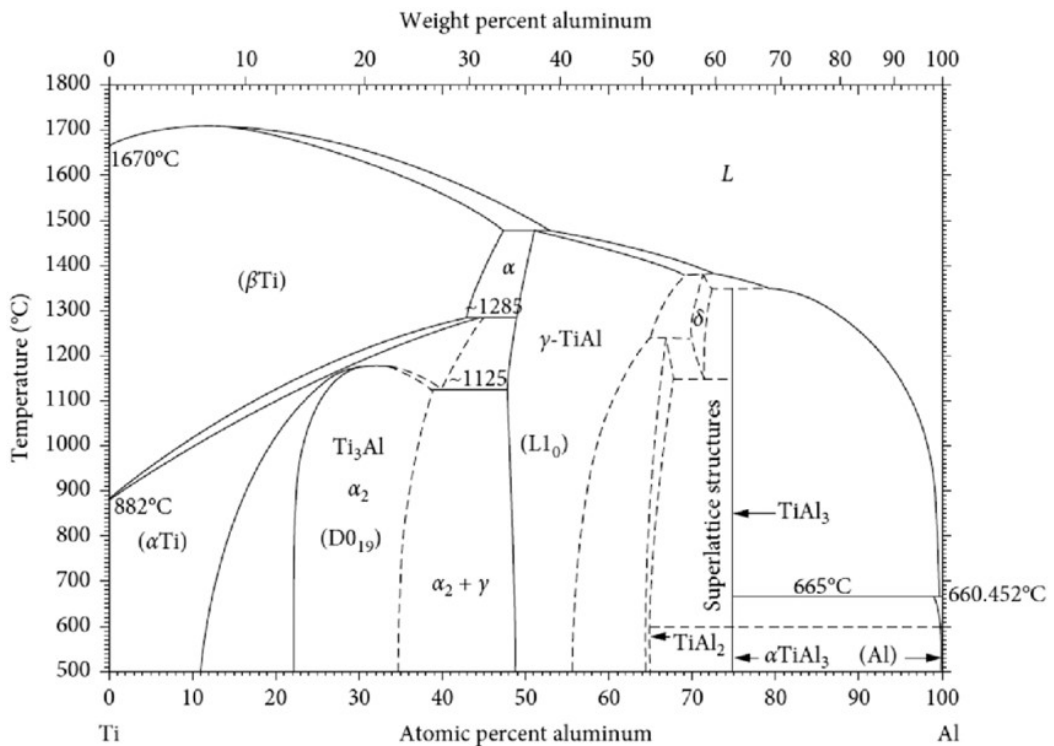


Fig. 3.7 Ti-Al binary phase diagram

용접전류 110A 조건에서 EN 극성비 증가에 따른 AC 펄스 MIG 용접부의 EDS 점분석 이미지를 Fig. 3.12, Fig. 3.13, Fig. 3.14에 나타내었다. EDS를 이용하여 금속간화합물 층의 이루어진 성분 함유량을 지점 A, B, C로 나누어 분석하였다. 알루미늄 합금에 가까운 A 지점에서부터 금속간화합물 층의 중간지점인 B 지점 그리고 티타늄 합금과 가까운 계면의 C 지점으로 나누어 분석을 진행하였다. 세 지점에서의 성분 함유량을 Table 3.8, Table 3.9, Table 3.10에 나타내었다.

성분 함유량을 Ti-Al 상태도에 대입해보았을 지점 A는  $TiAl_3$ 로 구성되어 있다. 그러나 이 지점에서는 Si 함량이 다소 높게 나타났다. Si 원자는 Si와 Al의 원자 반경이 유사하여  $TiAl_3$  결정격자에서 Al 원자를 대체하는 경향이 있다.  $TiAl_3$ 에서의 Si의 용해도는 최대 15%에 도달할 수 있으며, 따라서  $TiAl_3$ 는 종종  $Ti(Al, Si)_3$ 로 간주된다.[45]

따라서 금속간화합물 층의 성분 함유량은 알루미늄 합금에서부터 티타늄 합금까지 A 지점, B 지점, C 지점 순서대로  $TiAl_3$ ,  $TiAl$ ,  $Ti_3Al$ 로 주로 구성되며 이는 L.Xu 등의 결론과 일치한다.[46] 또한, EN 극성비가 증가할수록 티타늄 합금 모재에 대한 입열량이 감소하여 금속간화합물에서 알루미늄의 성분 함유량이 증가하였다.

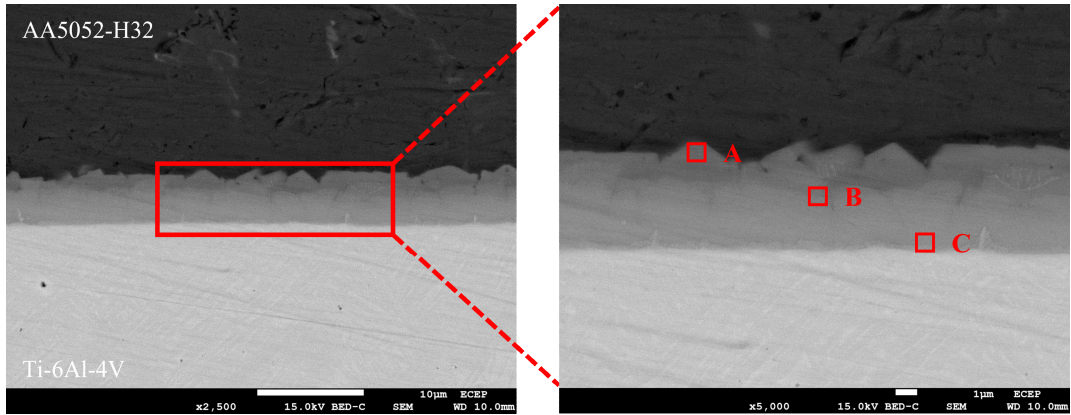
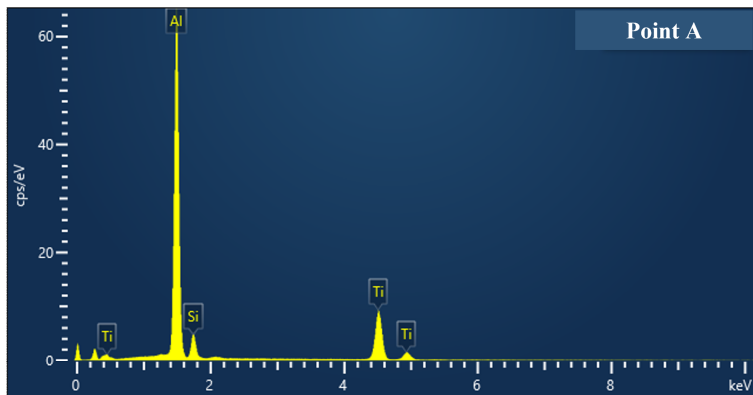


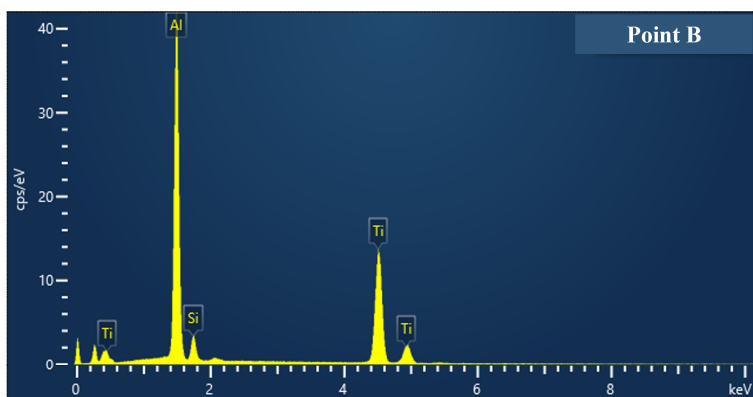
Fig. 3.8 EDS analysis images at various points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 0%

Table. 3.8 Chemical compositions and possible phases at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 0%

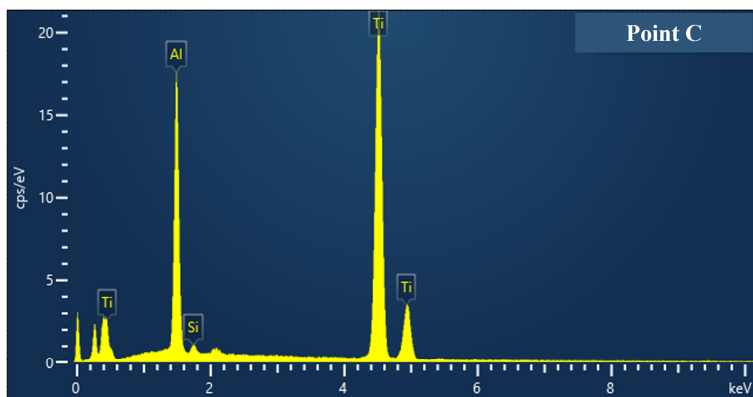
Test point	Chemical compositions (Wt.%)			Possible phase
	Ti	Al	Si	
Point A	33.95	59.02	7.03	TiAl <sub>3</sub>
Point B	52.06	43.49	4.45	TiAl
Point C	79.06	20.21	0.72	Ti <sub>3</sub> Al



(a) Point A



(b) Point B



(c) Point C

Fig. 3.9 SEM-EDS spectrum at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 0%: (a) Point A, (b) Point B, (c) Point C

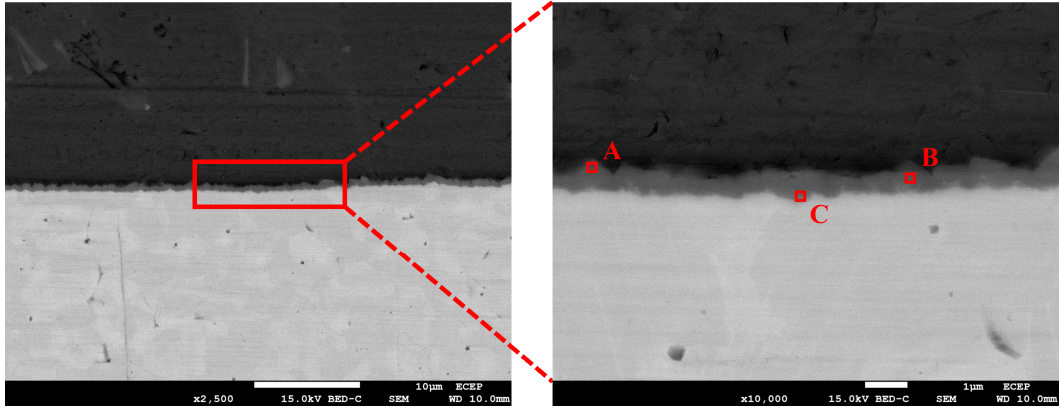
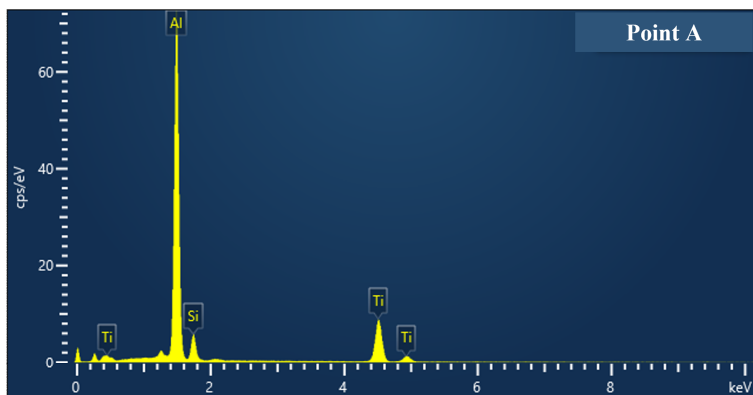


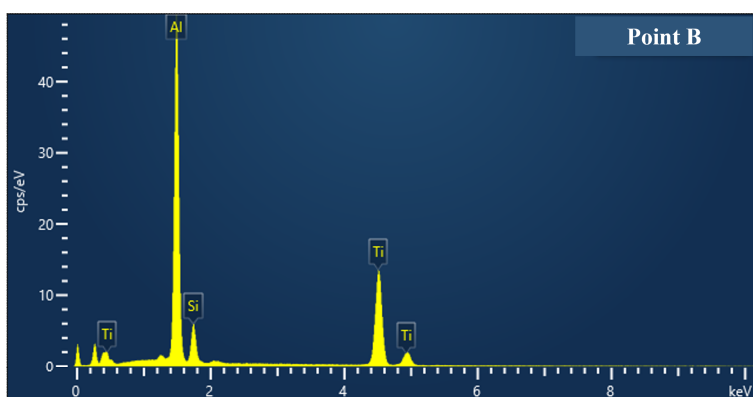
Fig. 3.10 EDS analysis images at various points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 10%

Table. 3.9 Chemical compositions and possible phases at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 10%

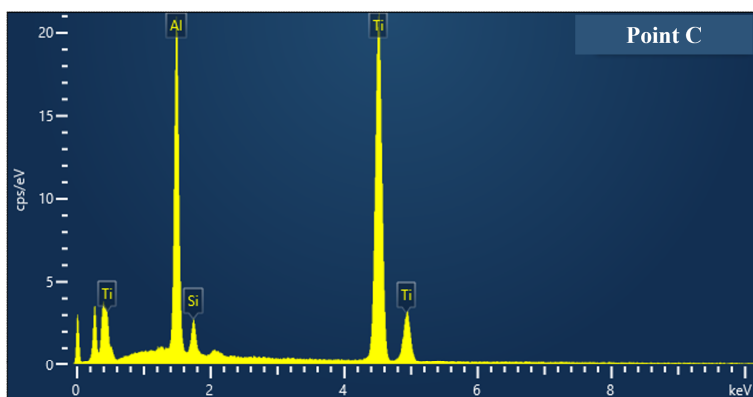
Test point	Chemical compositions (Wt.%)			Possible phase
	Ti	Al	Si	
Point A	30.64	61.47	7.89	TiAl <sub>3</sub>
Point B	46.92	45.69	7.39	TiAl
Point C	74.70	22.71	2.59	Ti <sub>3</sub> Al



(a) Point A



(b) Point B



(c) Point C

Fig. 3.11 SEM-EDS spectrum at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 10%: (a) Point A, (b) Point B, (c) Point C

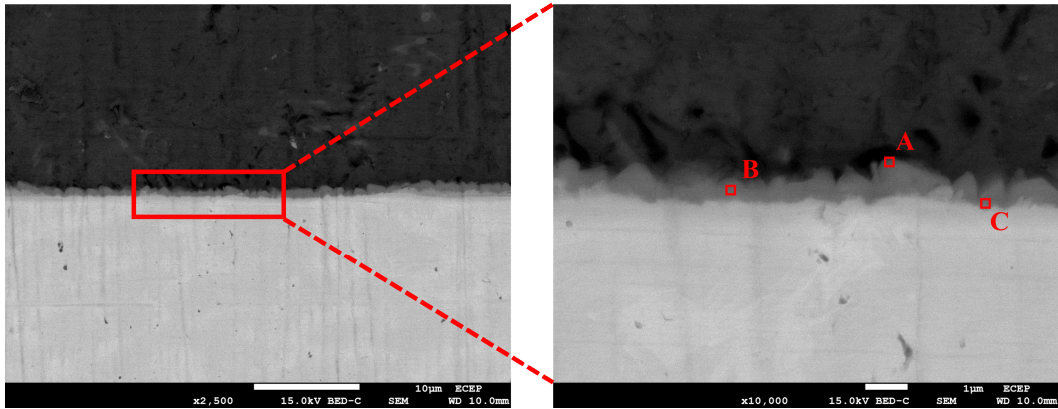
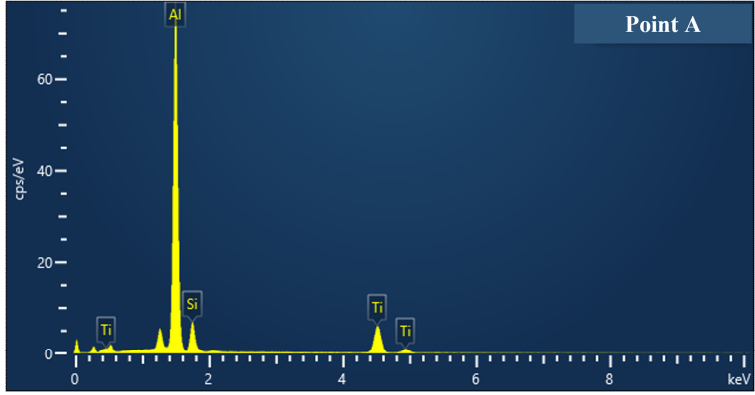


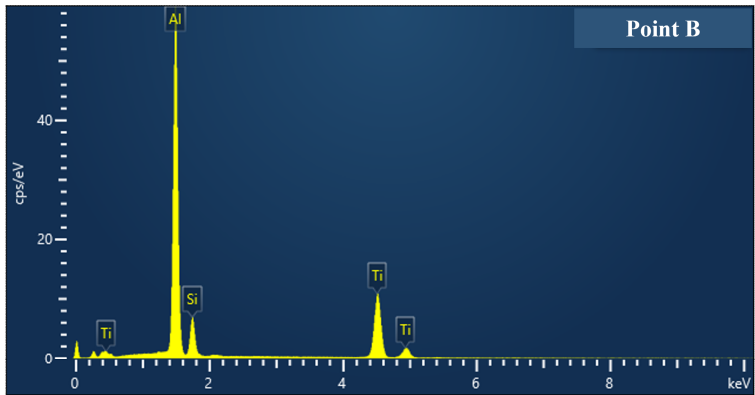
Fig. 3.12 EDS analysis images at various points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 20%

Table. 3.10 Chemical compositions and possible phases at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 20%

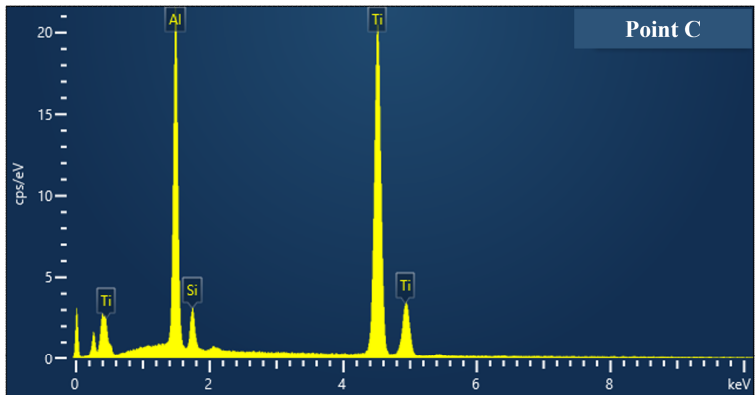
Test point	Chemical compositions (Wt.%)			Possible phase
	Ti	Al	Si	
Point A	22.95	66.75	10.31	TiAl <sub>3</sub>
Point B	38.27	52.42	9.31	TiAl
Point C	73.38	23.33	3.29	Ti <sub>3</sub> Al



(a) Point A



(b) Point B



(c) Point C

Fig. 3.13 SEM-EDS spectrum at denoted points of AC pulse MIG welded joint with current 110A and EN ratio 20% (a) Point A, (b) Point B, (c) Point C



### 3.3 기계적 특성 평가

#### 3.3.1 인장-전단 하중 시험

알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 AC 펄스 MIG 용접부에 대한 용접전류별 EN 극성비 변화에 따른 인장-전단 하중 시험을 실시하였다. 용접 전류 80~120A, EN 극성비 0~20% 조건에서 용접부의 평균 인장-전단 하중을 Fig. 3.14와 Table. 3.11에 나타내었다.

용접전류 80A 조건에서는 EN 극성비가 증가할수록 인장-전단 하중이 점차 감소하는 특성을 나타내었다. EN 극성비가 증가함에 따라 전극 와이어 용융량이 증가하고 동시에 모재가 받는 입열량이 줄어든다. 따라서 용접전류 80A 조건에서는 EN 극성비가 증가하여 금속간화합물의 두께가 감소하였지만, 입열량이 불충분하여 감소한 젓음길이의 영향이 더 크게 작용해, 인장-전단 하중이 점차 감소하였다고 판단된다.

반면 용접전류 90~110A 조건에서는 EN 극성비가 증가할수록 인장-전단 하중이 증가하는 특성을 나타내었으며, 모든 용접전류 조건에서 EN 극성비 20% 조건이 가장 높은 인장-전단 하중 값을 나타내었다. 특히 용접전류 110A, EN 극성비 20% 조건에서는 EN 극성비 증가함에 따라 젓음길이는 미소하게 감소하였으나, 모재에 대한 입열량의 감소로 인한 금속간화합물의 형성을 억제시켜 가장 높은 인장-전단 하중 값 평균 약 17.6kN을 얻을 수 있었다. 용접전류 90~110A 조건에서도 EN 극성비가 증가함에 따라 젓음길이가 감소하였으나, 인장-전단 하중에 크게 영향을 미치는 요인으로 작용될 수 있을 정도의 차이는 아니었다. 오히려 EN 극성비가 증가로 인한 모재에 대한 입열량 제어로 금속간화합물의 형성을 억제하여 인장-전단 하중의 증가를 나타내었다.

용접전류 120A 조건에서도 마찬가지로 EN 극성비가 증가할수록 인장-전단 하중이 증가하는 특성을 나타내었다. 그러나 모든 조건 대비 젖음길이가 양호하였음에도 불구하고 과도한 입열로 인해 취성의 금속간화합물 층이 크게 형성되어 인장-전단 하중이 용접전류 110A 조건 대비 전체적으로 감소한 특성을 나타내었다.

일반적으로 아크 용접에서 용접부의 강도는 각장 길이와 용입 깊이에 의해 영향을 크게 받는다. 그러나 본 연구에서는 AC 펄스 MIG 용접이 알루미늄 합금만을 용융시켜 티타늄 합금 모재에 습윤시키는 브레이징이기 때문에 각장 길이와 용입 깊이가 대신 용접부 비드의 젖음길이를 인장-전단 하중에 미치는 요인으로 고려하였다. 그러나 젖음길이와 인장-전단 하중과의 상관관계는 불규칙한 결과를 보이는 듯했으나 용접전류별 EN 극성비가 증가함에 따라 젖음길이는 감소하였지만, 그 차이는 미소하였으며, EN 극성비가 증가할수록 감소하게 되는 입열량과는 양호한 상관관계를 보였다. 따라서 AC 펄스 MIG 용접부의 인장-전단 하중은 EN 극성비 변화 따른 입열량에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

결과적으로 같은 용접전류에서 EN 극성비 변화는 입열량을 제어 가능하여 기존의 MIG 용접보다 인장-전단 하중을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

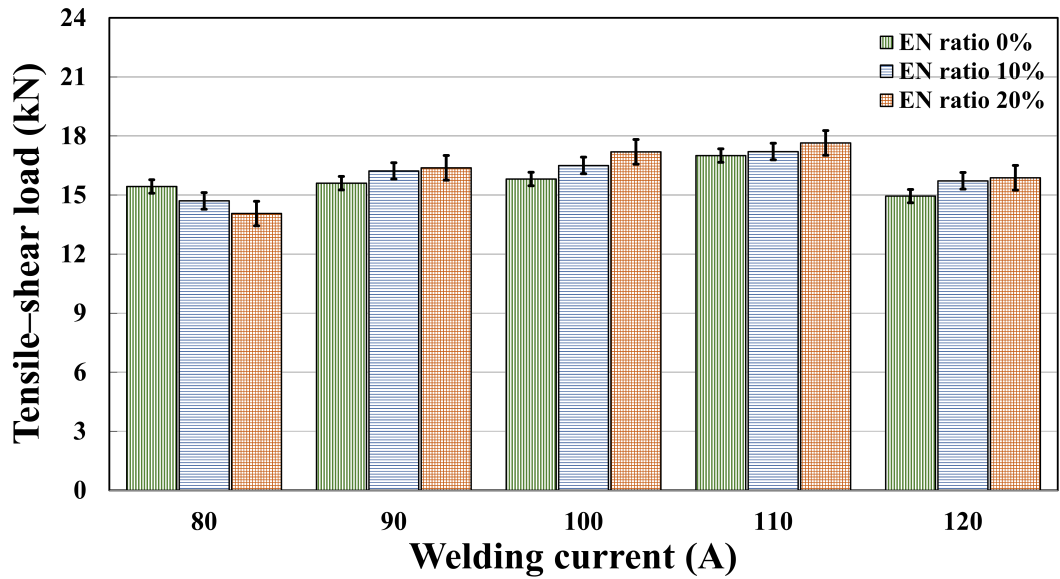


Fig. 3.14 Tensile-shear load of AC pulse MIG welded joints

Table. 3.11 Tensile-shear load of AC pulse MIG welded joints

Tensile-shear load (kN)		EN ratio (%)		
		0	10	20
Current (A)	80	15.4	14.7	14.1
	90	15.6	16.2	16.4
	100	15.8	16.5	17.2
	110	17.0	17.2	17.6
	120	14.9	15.7	15.9

### 3.3.2 경도 시험

Fig. 3.4는 최대 인장강도를 나타낸 용접전류 110A 조건에서 EN 극성비가 용접부의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 시험편 상판의 알루미늄 합금 두께의 중간선을 따라 0.2mm 간격으로 용착금속부(WM), 열영향부(HAZ), 모재(BM)에 대해 측정된 경도를 나타낸 것이다.

사용된 알루미늄 합금 (AA5052-H32)의 경도 값이 평균 약 65Hv로 나타났지만, 열영향부에서는 재결정화 및 입자 성장인 어닐링 효과로 인한 연화로 인해 모재의 평균 경도보다 낮은 평균 약 47Hv를 나타내었다. 또한, 용착금속부에서는 모재보다 경도가 높은 Al-Si 공정(Eutectic)의 존재로 인해 경도가 증가하여 평균 약 96Hv를 나타내었다.

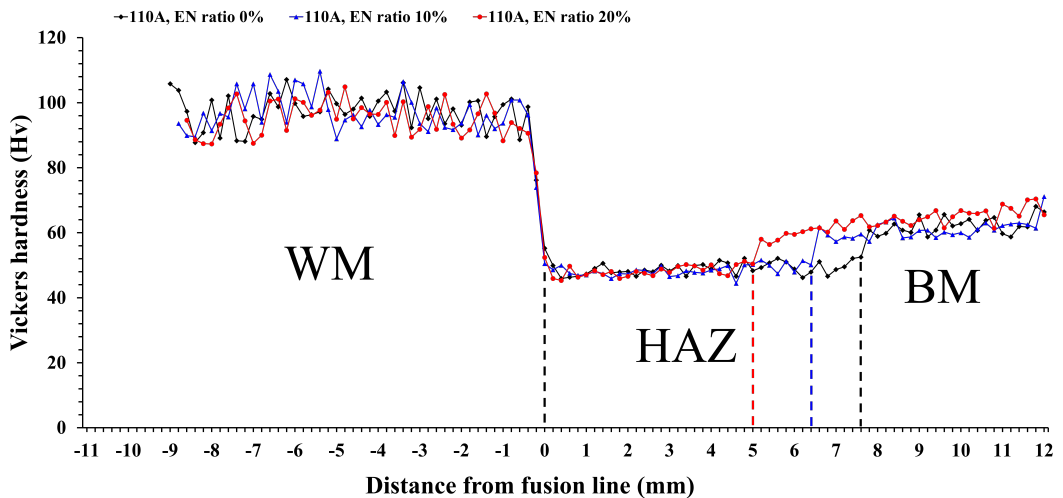


Fig. 3.15 Comparison of hardness values with EN ratio in 110A condition of AC pulse MIG welded joints

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 알루미늄 합금(AA5052-H32)과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V) 이종재에 AC 펄스 MIG 용접의 적용성을 검토하고, 용접 공정변수(전극 와이어 위치, 용접전류, EN 극성비) 변화에 따른 용접부의 기계적 특성 및 금속간화합물 형성에 미치는 영향을 고찰하였다.

1) 전극 와이어가 상판 알루미늄 합금의 오른쪽 상단부 끝단에서 더 멀리 떨어진 지점에 위치할수록, 티타늄 합금 계면에서의 전극 와이어 용착량이 증가하여 젖음길이가 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 젖음길이의 증가는 인장-전단 하중의 증가로 이어진 것을 알 수 있었으며, 특히 알루미늄 합금 측으로 2mm 위치한 조건에서 인장-전단 하중 값 평균 약 14.9kN을 나타내었다.

2) EN 극성비를 0%로 고정한 상태에서 용접전류를 증가시켰을 때, 입열량이 증가함에 따라 티타늄 합금 계면에서 전극 와이어의 용착량이 증가하여 젖음길이가 증가하는 결과를 확인할 수 있었다. 또한, 모든 용접전류 조건에서 EN 극성비가 높아질수록 모재보다 전극 와이어에 열에너지가 더 집중되기 때문에 전극 와이어의 용융량이 증가하고 모재가 받는 열량은 줄어든다. 따라서 용융된 전극 와이어는 티타늄 합금 계면에 덜 습윤 되어, 젖음길이가 감소하고 젖음각과 비드 높이는 증가함을 나타내었다.

3) 용접전류가 증가함에 따라 용착금속량이 증가하고, 용접부 계면에서 높은 입열이 발생하여 금속간화합물의 형성과 성장을 촉진함을 알 수 있었다. 반면에, EN 극성비가 증가하면 모재보다 전극 와이어에 더 많은 열원이 집중되어, 이는 용접부 계면의 온도가 낮아진다. 따라서 온도가 낮을수록 금속간화합물 층의 성장이 억제 가능함을 확인할 수 있었다.

4) 용접전류별 EN 극성비가 증가함에 따라 젖음길이는 감소하였지만, 그 차이는 미소하였으며, 용접부의 인장-전단 하중은 EN 극성비 변화 따른 입열량에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 동일한 용접전류에서의 EN 극성비 변화는 기존의 MIG 용접보다 인장-전단 하중을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 김경유, 조철 자동차산업 탄소중립 추진 동향과 과제, 산업연구원, 2021
- [2] HYUNDAI KEFICO, 자동차 회사가 차량 경량화에 주목하는 이유, HYUNDAI MOBIS group journal, 2020.05.08
- [3] Jim Motavalli, Key to Tougher Teslas: Titanium, The New York Times, 2014.04.11
- [4] 중소기업기술정보진흥원, 자동차·항공기용 경량화 소재 및 성형, 중소기업기술로드맵 금속, 2022.01.31
- [5] 홍재근, 임창동, 김수현, 첨단 경량금속 신소재 산업의 동향과 향후 트렌드, 산업통상자원부, 2016.12
- [6] Md. Abdul Karim, Yeong Do Park, A Review on Welding of Dissimilar Metals in Car Body Manufacturing, Journal of Welding and Joining, 38(1), 2020, pp. 8-23
- [7] Soni Kumari, E Krishna Rao Patro, Shivani Singh, Pradeep Kumar Chandra, Safa Abdul Kareem, Lavish Kansal, Advanced Welding of Dissimilar Materials for Aerospace and Automotive Applications, E3S Web of Conferences, Vol. 430, EDP Sciences, 2023, pp.01108
- [8] Deekshant Varshney, Kaushal Kumar, Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization, Ain Shams Engineering Journal, 12.1, 2021, pp. 1143-1152
- [9] Shuang-Shuang Li, Xin Yue, Qing-Yuan Li, He-Li Peng, Bai-Xin Dong, Tian-Shu Liu, Hong-Yu Yang, Jun Fan, Shi-Li Shu, Feng Qiu, Qi-Chuan Jiang, Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry, Journal of Materials Research and Technology, 2023
- [10] James C. Williams, Rodney R. Boyer, Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components, Metals, 10.6, 2020, pp. 705
- [11] Kazuhiro Takahashi, Kenichi Mori, Hidenori Takebe, Application of Titanium and its Alloys for Automobile Parts, MATEC web of conferences, Vol. 321, EDP Sciences, 2020

- [12] Amlan Kar, Satyam Suwas, Satish V. Kailas, Two-pass Friction Stir Welding of Aluminum alloy to Titanium alloy: A Simultaneous Improvement in Mechanical Properties, *Materials Science and Engineering: A*, 733, 2018, pp. 199–210
- [13] C.Q. Zhanga, J.D. Robsona, P.B. Prangnell, Dissimilar ultrasonic spot welding of aerospace aluminum alloy AA2139 to titanium alloy TiAl6V4, *Journal of Materials Processing Technology*, 231, 2016, pp. 382–388
- [14] Fábio A. O. Fernandes, José J. M. Gonçalves, António B. Pereira, Evaluation of Laser Lap Weldability between the Titanium Alloy Ti-6Al-4V and Aluminum Alloy 6060-T6, *Crystals*, 13.10, 2023, pp. 1448
- [15] Su-Jin Lee, Makoto Takahashi, Yousuke Kawahito, Seiji Katayama, Microstructural evolution and characteristics of weld fusion zone in high speed dissimilar welding of Ti and Al, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16, 2015, pp. 2121–2127
- [16] Miroslav Sahul, Martin Sahul, Maroš Vyskoč, Ľubomír Čaplovič, Matej Pašák, Disk Laser Weld Brazing of AW5083 Aluminum Alloy with Titanium Grade 2, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 2017, pp. 1346–1357
- [17] B Majumdar, R Galun, A Weisheit, BL Mordike, Formation of a crack-free joint between Ti alloy and Al alloy by using a high-power CO<sub>2</sub> laser, *Journal of Materials Science*, volume 32, 1997, pp. 6191–6200
- [18] Shuhai Chen, Dawei Yang, Meng Li, Yuanheng Zhang, Jihua Huang, Jian Yang, Xingke Zhao, Laser penetration welding of an overlap titanium-on-aluminum configuration, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 87, 2016, pp. 3069–3079
- [19] W.V. Vaidya, M. Horstmann, V. Ventzke, B. Petrovski, M. Koçak, R. Kocik, G. Tempus, Structure-property investigations on a laserbeam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications Part I: Local gradients in microstructure, hardness and strength, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe*, 40.8, 2009, pp. 623–633

- [20] Ming Gao, Cong Chen, Yunze Gu, Xiaoyan Zeng, Microstructure and Tensile Behavior of Laser Arc Hybrid Welded Dissimilar Al and Ti Alloys, *Materials*, 7(3), 2014, pp. 1590–1602
- [21] Florian Wagner, Michael Kreimeyer, Rainer Kocik, Frank Vollertsen, Laser joining of aluminum to titanium with focus on aeronautical applications, *Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics*, Vol. 2006, No. 1, Laser Institute of America, 2006, pp. 42–47
- [22] M. Kimura, S. Nakamura, M. Kusaka, K. Seo, A. Fuji, Mechanical properties of friction welded joint between Ti-6Al-4V alloy and Al-Mg alloy (AA5052), *Science and Technology of Welding and Joining*, 10.6, 2005, pp. 666–672
- [23] Shuhai Chen, Liqun Li, Yanbin Chen, Jihua Huang, Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding–brazing process, *Journal of Alloys and Compounds*, 509.3, 2011, pp. 891–898
- [24] D.M. Fronczek, J. Wojewoda–Budka, R. Chulist, A. Sypien, A. Korneva, Z. Szulc, N. Schell, P. Zieba, Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing, *Materials & Design*, 91, 2016, pp. 80–89
- [25] M.S. Kenevisi, S.M. Mousavi Khoie, M. Alaei, Microstructural evaluation and mechanical properties of the diffusion bonded Al/Ti alloys joint, *Mechanics of materials*, 64, 2013, pp. 69–75
- [26] Y. Li, Y. Zhang, Z. Luo, Microstructure and mechanical properties of Al/Ti joints welded by resistance spot welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 20.5, 2015, pp. 385–394
- [27] A. AlHazzaa, T.I. Khan, I. Haq, Transient liquid phase (TLP) bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V alloy, *Materials characterization*, 61.3, 2010, pp. 312–317
- [28] Hyoung Jin Park, Dong Cheol Kim, Mun Jin Kang, Sehun Rhee, The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, 2013, pp. 867–875



- [29] Jair Carlos Dutra, Régis Henrique Gonçalves e Silva, Bruna Martinello Savi, Cleber Marques, Orestes Estevam Alarcon, New methodology for AC-pulsed GMAW parameterization applied to aluminum shipbuilding, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38, 2016, pp. 99–107
- [30] Rakesh Kumar, Ulrich Diltthey, D.K. Dwivedi, P.K. Ghosh, Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding, *Materials & design*, 30.2, 2009, pp. 306–313
- [31] Seong Min Hong, Shinichi Tashiro, Hee-Seon Bang, Manabu Tanaka, A Study on the Effect of Current Waveform on Intermetallics Formation and the Weldability of Dissimilar Materials Welded Joints (AA5052 Alloy-GI Steel) in AC Pulse GMAW, *Metals*, 11.4, 2021, pp. 561
- [32] Francisco Dias, Gonçalo Cipriano, Arménio N. Correia, Daniel F. O. Braga, Pedro Moreira, Virgínia Infante, Joining of Aluminum Alloy AA7075 and Titanium Alloy Ti-6Al-4V through a Friction Stir Welding-Based Process, *Metals*, 13.2, 2023, pp. 249
- [33] Haodong Wang, Xinjian Yuan, Ting Li, Kanglong Wu, Yongqiang Sun, Chuan Xu, TIG welding-brazing of Ti6Al4V and Al5052 in overlap configuration with assistance of zinc foil, *Journal of Materials Processing Technology*, 251, 2018, pp. 26–36
- [34] R. Cao, J. H. Sun, J. H. Chen, Mechanisms of joining aluminium A6061-T6 and titanium Ti-6Al-4V alloys by cold metal transfer technology, *Science and Technology of Welding and Joining*, 18.5, 2013, pp. 425–433
- [35] Hyoung Jin Park, Sehun Rhee, Mun Jin Kang, Dong Cheol Kim, Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding, *Materials transactions*, 50.9, 2009, pp. 2314–2317
- [36] Adeel Ikram, Hyun Chung, The Effect of EN Ratio and Current on Microstructural and Mechanical Properties of Weld Joined by AC-GMAW on Square Groove Butt Joints, *Applied Sciences*, 7.3, 2017, pp. 261
- [37] Woohyeon Ju, Taewan Kim, Yoochan Kim, Aluminum Arc Welding Technology to Improve Quality and Productivity of Electric Vehicles, *Journal of Welding and Joining*, 40.5, 2022, pp. 438–447

- [38] Aytakin Ulutaş, Joining Techniques Like Welding in Lightweight Material Structures, Handbook of Research on Advancements in the Processing, Characterization, and Application of Lightweight Materials, IGI Global, 2022, pp. 121-152
- [39] 연구개발특구진흥재단, 용접 재료 시장, 글로벌 시장동향 보고서, 2021.10
- [40] 연구개발특구진흥재단, 로봇 용접 시장, 글로벌 시장동향 보고서, 2021.10
- [41] KANG Min Jung, KIM Cheol Hee, Cold-Metal-Transfer Arc Joining of Al 6K32 Alloy to Steel Sheets, Defect and Diffusion Forum, Trans Tech Publications Ltd, 2013, pp. 247-251
- [42] Hitoshi Ozaki, Shingo Hayashi, Muneharu Kutsuna, Laser roll welding of dissimilar metal joint of titanium to aluminium alloy, Welding International, 23.7, 2009, pp. 501-509
- [43] Michael Kreimeyer, Florian Wagner, Frank Vollertsen, Laser processing of aluminum-titanium-tailored blanks, Optics and Lasers in Engineering, 43.9, 2005, pp. 1021-1035
- [44] Yanbin Chen, Shuhai Chen, Liqun Li, Effects of heat input on microstructure and mechanical property of Al/Ti joints by rectangular spot laser welding-brazing method, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44, 2009, pp. 265-272
- [45] Shant Prakash Gupta, Intermetallic compounds in diffusion couples of Ti with an Al-Si eutectic alloy, Materials Characterization, 49.4, 2002, pp. 321-330
- [46] L. Xu, Y.Y. Cui, Y.L. Hao, R. Yang, Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples, Materials Science and Engineering: A, 435, 2006, pp. 638-647