



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](#)

2019
년

8월

석사학위논문

2019년 8월
석사학위 논문

AC 펄스 MIG 브레이징을 이용한
알루미늄 합금과 용융아연도금강의
용접성에 관한 연구

AC 펄스 MIG 브레이징을 이용한
알루미늄 합금과 용융아연도금강의
용접성에 관한 연구

최
솔

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 솔

AC 펄스 MIG 브레이징을 이용한
알루미늄 합금과 용융아연도금강의
용접성에 관한 연구

A Study on Weldability of Aluminum Alloy and Hot Dip
Galvanized Steel by AC Pulse MIG Brazing

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 솔

AC 펄스 MIG 브레이징을 이용한
알루미늄 합금과 용융아연도금강의
용접성에 관한 연구

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 4월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 솔

최솔의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 특임교수 방한서 (인)

위 원 조선대학교 교 수 방희선 (인)

위 원 조선대학교 교 수 손윤철 (인)

2019년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	IV
Abstract	V
1장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내·외 기술 동향	5
1.3 가스 메탈 아크 용접	8
1.3.1 가스 메탈 아크 용접 원리	8
1.4 AC 펄스 MIG 용접	15
1.4.1 AC 펄스 MIG 용접특성과 EN Ratio	15
1.5 알루미늄 및 용융아연도금강 소재의 특징	19
1.5.1 알루미늄	19
1.5.2 용융아연도금강	21

2장 . 연구 방법	23
2.1 연구방법	23
2.2 실험장비 및 조건	25
2.2.1 사용소재 및 용접법	25
2.2.2 실험장비	28
2.2.3 실험조건	29
2.3 용접부 특성 평가 방법	31
2.3.1 용접 공정변수에 따른 표면 및 단면 특성 평가	31
2.3.2 용접부 인장-전단강도 시험	33
3장 . 연구 결과	35
3.1 용접 공정변수에 따른 표면 및 단면 특성	35
3.1.1 용접 공정변수(전류, EN Ratio)에 따른 겹침-이음표면 특성 ..	35
3.1.2 용접 공정변수(전류, EN Ratio)에 따른 단면 특성	37
3.1.3 SEM/EDS 분석	41
3.2 인장-전단강도 특성	45
4장 . 결론	47
참고문헌	48

List of Figures

Fig. 1.1 Steel and Aluminum Market Volume	3
Fig. 1.2 Aluminium Production and Consumption in the World	4
Fig. 1.3 Schematic Drawing of GMAW Process	9
Fig. 1.4 Schematic Drawing of GMAW Droplet Metal Transfer	14
Fig. 1.5 Schematic Illustration of AC Pulse MIG Current Waveform	16
Fig. 1.6 Comparison Schematics of GMAW Polarity	18
Fig. 1.7 Coating Process of Galvanized Steel Sheet	22
Fig. 2.1 Flow Chart of Thesis	24
Fig. 2.2 Schematic of Lap Jointed Al 6061-T6 to Galvanized Steel	27
Fig. 2.3 AC pulse MIG Welding Machine and 6 Axis Welding Robot	28
Fig. 2.4 Schematic of Lap Joint Wire Position	30
Fig. 2.5 OM and SEM	32
Fig. 2.6 Schematic of Tensile-Shear Test Specimen	33
Fig. 2.7 Universal Testing Machine	34
Fig. 3.1 Schematic of Joint Interface Length	40
Fig. 3.2 Thickness of Intermetallic Compound by EN Ratio	42
Fig. 3.3 EDS Line Analysis of Intermetallic Compound	44
Fig. 3.4 EDS Spot Analysis of Intermetallic Compound	44
Fig. 3.5 A Fractured Specimen of Shear-Tensile Test	45
Fig. 3.6 A Graph of Shear-Tensile Test Results	46

List of Tables

Table. 1.1 Characteristics and Classification of Aluminum Alloy	20
Table. 1.2 Characteristics and Classification of Galvanized Steel	22
Table. 2.1 The Chemical Composition in Al 6061-T6 (Wt%)	26
Table. 2.2 The Mechanical Properties in Al 6061-T6	26
Table. 2.3 The Chemical Composition in Galvanized Steel (Wt%)	26
Table. 2.4 The Mechanical Properties in Galvanized Steel	26
Table. 2.5 The Chemical Composition in ER 4047 Aluminium Wire (Wt%)	27
Table. 2.6 The Mechanical Properties in ER 4047 Aluminium Wire	27
Table. 2.7 Al 6061-T6 / GI Steel Lap Joint Welding Experiment Condition ..	30
Table. 2.8 Keller 's Etching Reagent	32
Table. 3.1 Bead Appearance of Welded Surface	36
Table. 3.2 Cross Section of Welds	39
Table. 3.3 The Joint Interface Length, Neck Thickness and Leg Length According to Welding Conditions	40
Table. 3.4 A Result of Shear-Tensile Test	46

ABSTRACT

A Study on Weldability of Aluminum Alloy and Hot Dip Galvanized Steel by AC Pulse MIG Brazing

Choi Sol

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

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, greenhouse gas emissions in the transport sector in the global industrial sector are 25%, and automobile fuel efficiency regulations are being tightened to restrain greenhouse gas emissions through strengthening environmental regulations. With the development of automobile products and the development of production technology, many technologies are being developed for improvement of fuel efficiency and reduction in weight for reducing CO₂ emission gas.

The focus of the development of light-weighting technology for the existing body has been research and development as a substitute concept of aluminum and super high tensile steel. Therefore, it is not a single material development for securing productivity and stability and maximization of light weight, but the need for application of various metal materials, increase in

moldability and material price due to acceleration of multi-materialization, and research and development for solving the problem of dissimilar material bonding .

The aluminum alloy material has a specific gravity of 1/3 as compared with steel, and has the advantages of moldability and corrosion resistance, and the utilization thereof is increasing. In addition, the application of the material of the hot-dip galvanized steel sheet to improve the corrosion resistance of the steel is increasingly applied to automobiles. However, it is difficult to expect good welding results due to the formation of intermetallic compound (IMC) which is formed at the interface between dissimilar materials using fusion welding between ferrous and non-ferrous materials.

In this study, the weld-brazing characteristics of Al 6061-T6 and hot-dip galvanized steel lap joint welding were analyzed according to welding current and EN Ratio using AC pulse MIG welding.

The wire used in the AC pulse MIG welding was Alcotec ER 4047 wire with a diameter of 1.2 mm. The material Al 6061-T6 (thickness 2 mm) and hot-dip galvanized steel sheet (thickness 2 mm) used in this study were stacked with Al 6061-T6 and the lower plate was overlapped with GI steel 20 mm and AC pulse MIG welding. the process variables, the welding currents were changed to 50A, 60A, and 70A, and the EN ratios were 0%, 10%, and 20%. Neck thickness, Leg length. Joint interface length was measured. SEM-EDS analysis was also conducted to measure the amount of Al-Fe-Si intermetallic compound at the interface between Al 6061-T6 and the hot-dip galvanized steel sheet.

As a result, as the EN ratio increased, the amount of metal deposition increased, and the neck thickness, joint interface length and leg length tended to increase. As the current increased, the root porosity increased due to the increase of heat input. At welding current 60A and EN ratio 20%, the thickness of intermetallic compound was the thinnest at 2.41 μm . As the EN ratio increases, the melting amount of the filler increases, but the intermetallic compound growth is inhibited because the heat input at the brazing interface of GI Steel is reduced. The intermetallic compound formed a mixed layer of Fe - Al - Si system. The optimum condition was the maximum tensile - shear load of 7.9kN when the welding current was 60A and En ratio was 20%.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

세계 자동차 산업은 지구 온난화와 자원고갈의 위기에 직면해 있으며, 글로벌 산업분야 중 수송 부분의 온실가스 배출량은 25%로 환경규제강화를 통한 온실가스 배출 억제를 위해 자동차 연비규제가 강화되고 있다.[1][2]

이와 더불어 자동차 제품 개발 및 생산기술 발달에 따라 연비 향상 및 CO2 배출 가스 저감을 위한 차량 경량화에 대한 많은 기술 개발이 진행되고 있다.[3] 자동차 연비향상 기술은 엔진 및 구동계 효율 향상, 주행저항 감소 및 차체경량화 기술로 구분할 수 있으며, 그 중 차체경량화 기술은 타 기술 대비 빠른 적용 및 기대효과 창출로 인해 연비 개선이 가능하다는 장점이 있으며, 연비규제 부합을 위한 필수적 요소가 되고 있다.[4]

이를 위해 차체 경량화를 위한 소재로 알루미늄이나 마그네슘 등 비철금속의 적용이 확대 되었으며, 차체 소재는 스틸에서 점차 비철금속으로 복합적으로 구성되고 있으며, 위의 소재 적용을 위해서는 이종소재간의 접합기술 확보가 선행 되어야 한다.[4][5]

차량중량을 혁신적으로 절감하기 위한 기술개발로 해외 주요 자동차생산 업체들은 기존 차체소재인 일반강판에서 고강도강 초고강도 강판 등으로 대체, 최근 여러 가지 소재가 혼합된 차체 개발을 진행 및 적용이 증가하고 있다. 또한 프리미엄 브랜드를 중심으로 다중 소재 차체를 양산적용하고 있으며, F세그먼트 고급차종 중심에서 최근에는 D/E세그먼트 차종으로 경량소재가 확대되고 있다.[3]

그러나 기존 차체의 경량화 기술개발 초점은 철강소재를 알루미늄 및 초고장력 철강소재의 대체개념으로 연구개발을 시작하였다. 이로 인해 생산성 및 안정성 확보, 경량화 극대화를 위한 단일소재 개발이 아니라 다종 금속소재 적용의 필요성, 다종소재화의 가속으로 인한 성형성 및 소재가격상승, 이종소재 접합의 문제의 해결을 위한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다.[6]

자동차 차체 경량화에 적용되는 이종소재는 주로 알루미늄 합금계열과 스틸계열로 구성되어있으며, 이종재료의 접합은 서로 상이한 물성으로 인해 용융용접 시 적합한 강도와 내구성의 품질을 확보하는데 어려움이 있다.

특히, 알루미늄 합금소재는 스틸에 비해 비중이 1/3이고, 성형성과 내식성의 강점을 갖고 있으며, 그 활용성이 증가하고 있는 추세이다. 또한, 스틸의 내부식성을 개선시키기 위한 용융아연도금 강판의 소재의 자동차 적용이 확대되고 있다. 그러나 철계 및 비철계 간의 용융용접을 이용한 이종재료 접합 기술은 계면에서 형성되는 금속간화합물(Intermetallic Compound, IMC)의 형성으로 좋은 용접결과를 기대하기 어렵다. 이 금속간화합물은 Fe와 Al의 함량 비율에 따라 5가지의 화합물로 분류할 수 있으며, Al의 비율이 증가할수록 취성적인 금속간화합물을 생성하게 된다.[7]

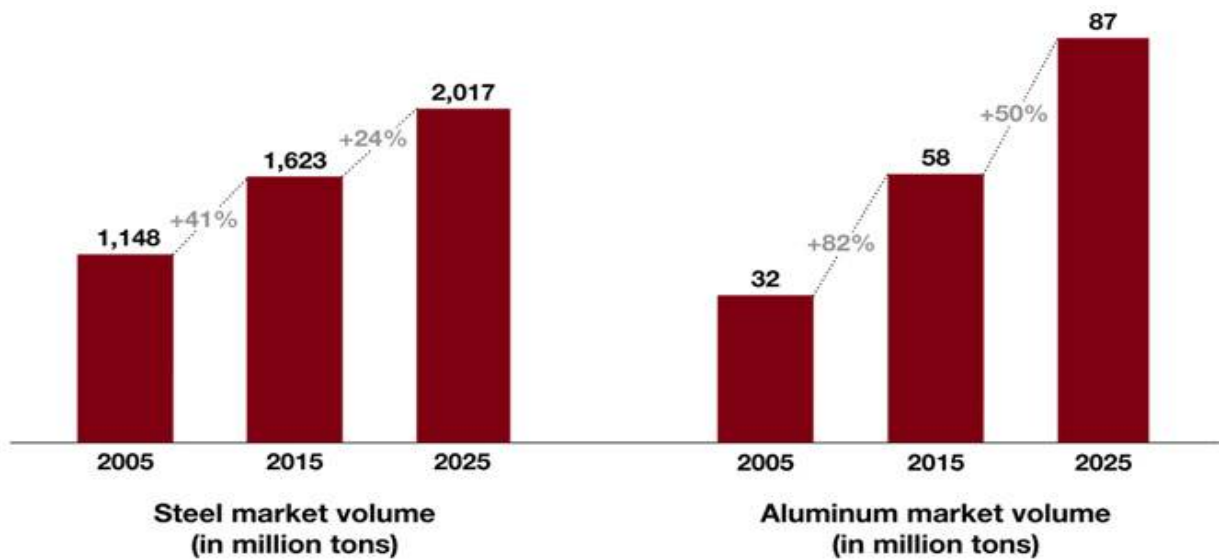
스틸과 알루미늄 접합의 고전적인 방법으로는 폭발압접[8], 초음파용접[9], 그리고 최근에는 마찰교반용접[10][11], 레이저용접[12] 및 하이브리드용접[13](등과 아크열원을 이용한 브레이징[14] 접합 등 많은 연구가 시행되었다. 그러나 기존의 접합방법들은 용접재의 크기나 형상에 제한을 받거나 설비 자체가 고가이므로 생산성이 낮다는 문제점이 있다.

최근에 용접-브레이징 공정이 알루미늄 합금과 스테인리스강의 이종소재 접합 기술 연구가 활발하게 진행되고 있다. 용접-브레이징 시 알루미늄 합금과 용가재가 용융되고, 용융아연도금강은 용융된 용가재와 모재에 의해 브레이징 되고 이에 따

른 접합부는 두 가지의 특성을 지니게 된다. 특히, MIG(Metal Inert Gas)/GMAW(Gas Metal Arc Welding)는 높은 생산성으로 인해 일반적으로 사용된다.[15]

AC 펄스 MIG 용접은 펄스 파형의 반복을 통한 아크용접으로, 한 펄스에 한 방울이 규칙적으로 이행되며, 스파터(Spatter) 발생이나 용접품질이 우수한 용접법이다.[16] 따라서, 펄스 전류를 사용하기 때문에 직류 전류에 비하여 모재에 가해지는 입열량이 작으며, 주기적인 이행으로 용접부 품질을 향상시킬 수 있는 용접법이다.

따라서 본 연구에서는 AC 펄스 MIG 용접-브레이징을 이용하여 알루미늄 합금과 용융아연도금강판의 겹침 이음 시 EN-Ratio 따른 용접-브레이징 특성을 파악하고자 한다.



Source: Strategy&; World Steel Association; International Aluminium Institute



Fig. 1.1 Steel and Aluminum Market Volume

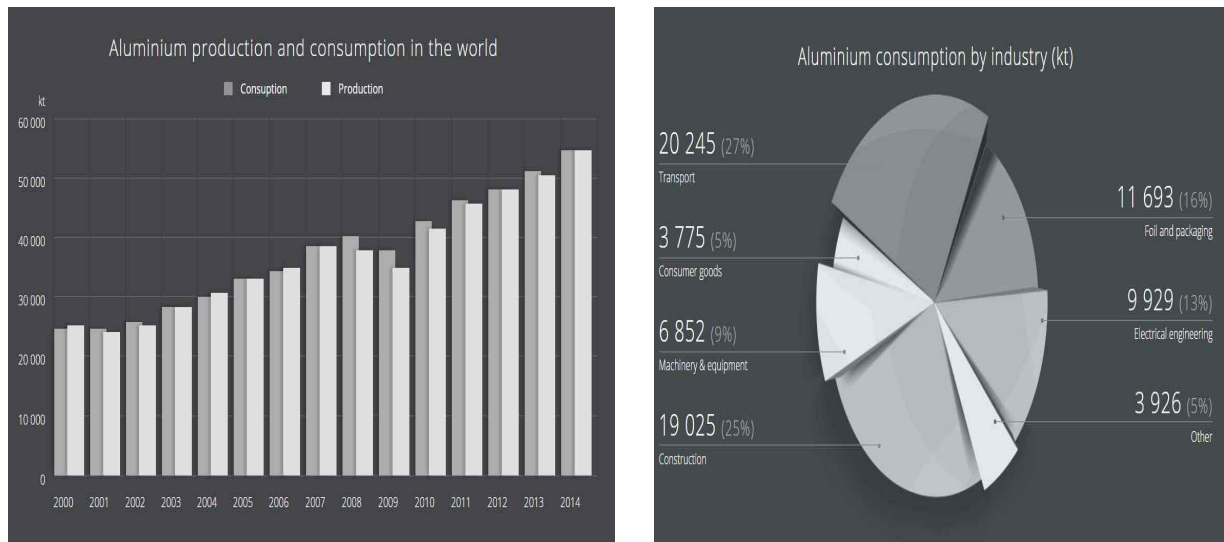


Fig. 1.2 Aluminium Production and Consumption in the World

1.2 국내·외 기술 동향

이종소재 알루미늄 합금과 용융아연도금강판의 이종소재 접합에 대한 AC펄스 MIG 및 CMT용접 등을 이용한 연구가 진행 되고 있다. 해외의 경우 Jiankang 등은 Double-Electrode GMAW용접을 이용한 알루미늄합금과 용융아연도금강판의 용접 시, 짧은 펄스 전송모드를 이용해 두 이종소재간의 용접조건을 최적화하여, ER4043, ER4047 와이어를 통한 접합메커니즘 및 금속간화합물(Intermetallic Compound)의 형성을 규명하였다.[17]

H.T Zhang등은 CMT용접을 이용한 알루미늄합금과 아연도금강판의 브레이징 시 Al-Si계 용가재를 이용하여 브레이징 시 스틸계면에서 형성되는 Fe-Al계 금속간 화합물의 두께와 형성 메커니즘을 입열량에 따라 규명했으며, IMC의 두께가 40 μm를 초과했음에도 불구하고, 접합강도에 영향이 없다고 주장하였다.[14]

Guoliang Qin등은 AC펄스 MIG 브레이징을 이용한 알루미늄 합금과 용융아연도금강판의 Al-Si계 용가재를 이용한 용접 시 Zn도금층과 Si계열의 용가재로 인해, 금속의 퍼짐성을 촉진시켜, 젖음성을 크게 향상시키며, 브레이징 과정에서 접합계면에서 형성되는 금속간화합물 층은 용융되는 알루미늄계면에서 가장 높은 두께를 형성되고, 브레이징되는 스틸계면에서 복합적인 성장 거동을 보여준다고 주장하였다. 또한, Al-Si계 용가재의 금속 퍼짐성 촉진 및 개선으로 인한 접합강도가 증가함을 규명하였다.[18]

Ksishna 등은 더블 펄스 MIG 용접을 이용한 브레이징 시 알루미늄합금과 용융아연도금강판, 합금아연도금강판, 일반강판의 접합 특성을 규명하였다. 용융아연도금강판은 브레이징 시 아연도금층의 영향으로 용가재의 젖음성 및 퍼짐성이 증가하고, 세 가지 소재 중 가장 높은 인장-전단강도를 확보하였다. 그리고, 브레이징 시 발생하는 언더컷 및 Root부 기공을 최소화하기 위해 브레이징 시 아연증기의 기화 통로를 확보해야 하고 이는 갭(Gap)부여를 통해 최소화 시킬 수 있다고 주장하였

다.[19]

Youngchao su 등은 직류펄스(DPG) MIG, 교류펄스(APG) MIG, 교류 더블펄스(ADG) MIG 용접 시 알루미늄합금과 아연도금강판의 이종소재의 기공형성 및 특성을 분석하였으며, APG MIG 용접 시 용융지의 흐름 및 응고가 가속화되어 기공형성이 증가하였으며, DPG MIG 용접 시 접합부의 기공이 줄어들고, 특히 용접상부에 주로 분포하는 특성을 보여주었다. ADG MIG 용접시 중첩된 펄스파형은 용융지의 유동을 약화시키고, 기공형성을 억제에 효과적인 공정이다. 또한 APG MIG 용접 시 발생하는 기공에 비해 더 작은 기공이 형성되었음을 증명하였다.[20]

국내의 연구동향은 조상명 등은 극성가면 AC 펄스 MIG 용접을 이용한 브레이징 시 냉연강판(SPHC) 전기아연도금강판(Galvanized sheet steel, EG)의 극성효과와 EN극성비(정극성과 역극성의 비율)에 따른 접합 특성을 연구하였다. CuSi-Al 계 와이어를 이용한 아크 브레이징시 건전한 이음부를 얻음과 동시에 동일한 와이어 송급속도에서 EN극성비(정극성과 역극성의 비율)가 증가함에 따라 모재에 입열이 줄어들어 변형이 적고, 브레이징 시 양호한 강도 값을 확보하였다.[21]

김용 등은 저입열 단락이행 형태의 GMAW 용접법을 이용하여 알루미늄합금과 용융아연도금강판(GI Steel), 합금아연도금강판(GA Steel), 일반냉연강판(Cold rolled)의 도금층에 따른 용접특성을 연구하였다. GI강판의 경우 아연도금층에 Al-si계열의 용가재를 이용해 용접 시, 금속간화합물 층의 두께가 3 μ m 이하로 형성되고 원활한 접합이 이루어졌으나, 기화된 아연(Zn) 층이 빠져나가지 못해 Root부 다량의 기공이 발생되어, 적절한 갭 부여가 필요하다고 주장하였다.[22]

방한서 등은 TIG-FSW 용접을 이용한 알루미늄합금과 스테인리스강의 용접특성을 연구하였다. 기존의 마찰교반 용접의 경우, 용접부 계면에서 취성파단이 일어났으며, TIG 보조열원을 이용한 TIG-FSW 하이브리드 용접의 경우 열영향부에서 연성파단이 일어났다.[23]

조상명 등은 DC 및 AC펄스 MIG용접을 이용하여, 용융아연도금강판의 기공 발생특성을 연구하였다. AC펄스 용접 시 EN Ratio를 증가시켜, 입열량을 제어하여, 아연 도금층의 손실을 줄이고, DC펄스보다 AC펄스 MIG용접법을 적용하였을 때, 기공이 더 감소함을 보여주었다.[24]

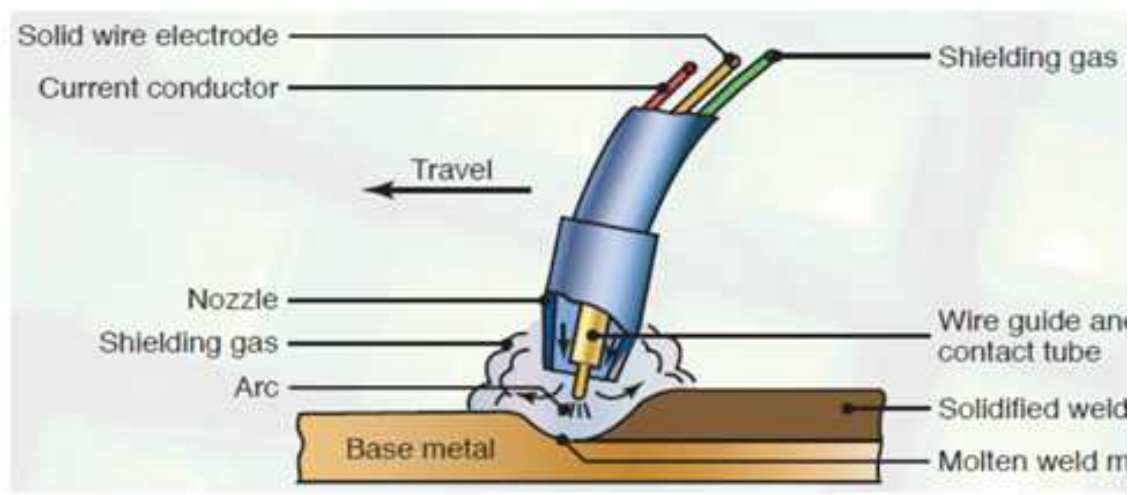
1.3 가스 메탈 아크 용접

1.3.1 가스 메탈 아크 용접 원리

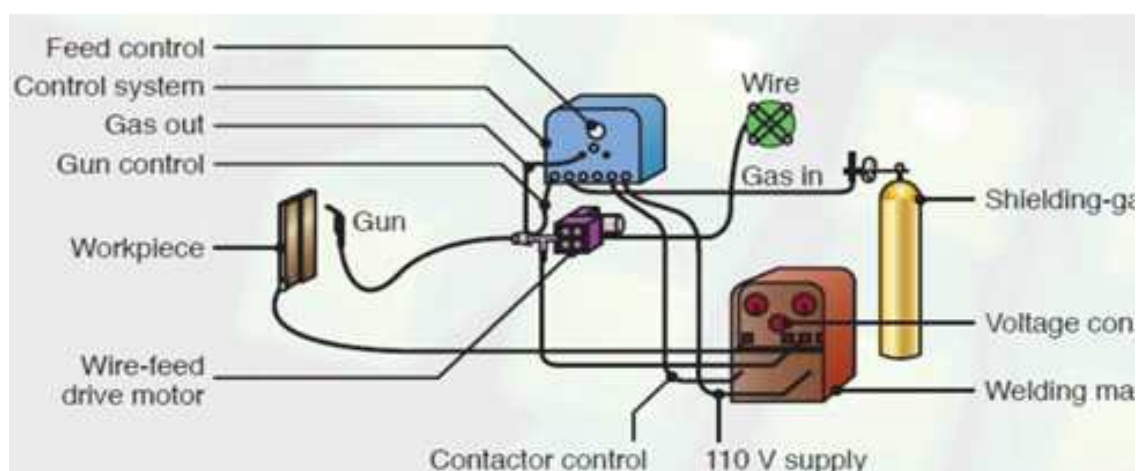
1) 가스 메탈 아크 용접의 원리

가스 메탈 아크 용접(GMAW)은 전류를 통하여 와이어와 모재사이에 아크가 발생하고, 소모전극 와이어(Electrode wire)를 이용해 일정한 속도로 용융지에 공급하는 용접법이다. 와이어를 용융시키는 열은 용접전류에 의해 발생하는 아크와 와이어 자체에서 발생하는 저항열로 제공되며, 연속적으로 공급되는 와이어가 용융되고 아크기동을 거쳐 용융지로 이행하고, 용융부위는 공급되는 보호가스에 의해 주위의 대기로부터 보호된다. Fig. 1.3은 가스 메탈 아크 용접의 공정모식도이다.[25]

가스 메탈 아크 용접(GMAW)은 보호가스의 종류에 따라 분류할 수 있다. 대표적으로 CO₂, CO₂와 Ar과의 혼합가스 등 산화성의 실드가스를 사용하는 용접법을 마그(Metal Active Gas, MAG)라 하고, Ar과 같은 불활성 가스를 사용하는 용접법을 미그(Metal Inert Gas, MIG)라 한다. 또한, 미그용접은 모재 표면의 산화막(Al, Mg 등 경합금)에 대해 클리닝 효과가 있다.



gas metal arc welding operation



Gas Metal Arc Welding process equipment

Fig. 1.3 Schematic Drawing of GMAW Process

2) 가스 메탈 아크 용접의 극성

아크용접에서 용접봉과 모재를 양극 또는 음극에 연결함에 따라 특성이 달라지며, 이를 극성(Polarity)라고 부른다. 극성은 용접봉과 모재의 연결에 따라서 직류 정극성(Direct Current Electrode Negative, DCEN), 직류 역극성(Direct Current Electrode Positive, DCEP), 교류(Alternative Current, AC)로 구분할 수 있고, 극성에 따라 용접봉과 용융량, 모재의 입열량 그리고 아크 안정성(Arc stability)이 변화하게 된다.

DCEN 극성은 직류 용접에서 음극을 용접봉, 양극을 모재에 연결하는 방법이고, 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 가스 메탈 아크 용접에서 DCEN 극성은 와이어의 용융량은 줄어들고, 용적의 온도는 낮으며, 모재의 용융량은 증가한다. 또한 DCEN에서 와이어의 극성이 음극이 되면 비열전자가 방출되고, 전자는 일함수가 낮은 산화물에서 먼저 방출되어 음극점을 형성한다. 이러한 음극점이 불규칙적으로 이동하면서, 아크는 와이어 선단 뒤쪽까지 둘러싸여 용적 끝에 집중되지 못하므로 아크가 불안정하다.

DCEP 극성은 양극을 용접봉, 음극을 모재에 연결하는 방법이고, 가스 메탈 아크 용접에서 와이어의 용융량은 증가하고, 모재의 용융량은 작아진다. 따라서, 안정적인 아크를 얻기 위해 가스 메탈 아크 용접에서는 DCEP극성을 사용한다. DCEP극성을 및 보호가스로 Ar을 사용할 경우 청정효과(Cleaning effect)가 발생하고, 이는 모재표면의 산화막(Oxide film)을 제거하는 현상을 말한다. 음극인 모재 표면에 존재하는 산화막에서 전자가 발생하므로 아크가 산화막에 집중되어 고온에 의해 산화막을 파괴하기 때문이다.[26]

따라서, 가스 메탈 아크 용접에서 극성가변 AC펄스 아크용접은 DCEP극성과 DCEN 극성의 구간을 두고 주기적 반복을 통한 용접법으로, 두 가지 극성모드에서의 장점을 모두 얻을 수 있는 용접방법이다.

3) 가스 메탈 아크 용접의 용적이행

용적이행(Metal transfer)이란 소모성전극을 이용한 아크용접에서 용융된 금속이 용융풀(Molten pool)로 이행하는 현상을 말한다. 용적이행은 용접전류(Welding current), 보호가스(Shielding gas), 용접봉의 재질, 와이어 돌출길이(Wire extension), 등의 조건에 따라 영향을 받는다.[27]

용적이행 모드는 IIW(International Institute of Welding) 기준에 의하면 입상(Globular)용적이행, 단락(Short circuiting)이행, 스프레이(Spray)이행모드로 분류된다. 입상용적이행과 스프레이이행 모드를 합하여 자유 비행모드(Free-flight mode)로 구분할 수 있고, 스프레이이행 모드는 전류가 증가함에 따라 프로젝티드(Projected), 스트리밍(Streaming), 회전(Rotating) 모드로 나눌 수 있다. 용적이행 모드에 따른 분류 모식도를 Fig. 1.4에 나타내었다.

입상용적이행 모드는 아크의 길이가 짧거나, 용접 전압이 낮은 경우 발생한다. 용적의 직경이 용접 와이어의 직경보다 크고 용적이 용융풀(Molten pool)과 직접 접촉하지 않는 특징을 갖는다. 또한, 용접조건에 따라 입상용적이행과 단락이행 모드가 혼합되어 발생하기도 하며, 입상용적이행 모드는 큰 용적이 이탈하므로 아크 길이의 변화가 크고 이에 따라 용접 전압과 전류의 변화도 프레이 이행모드에 비해 크다.

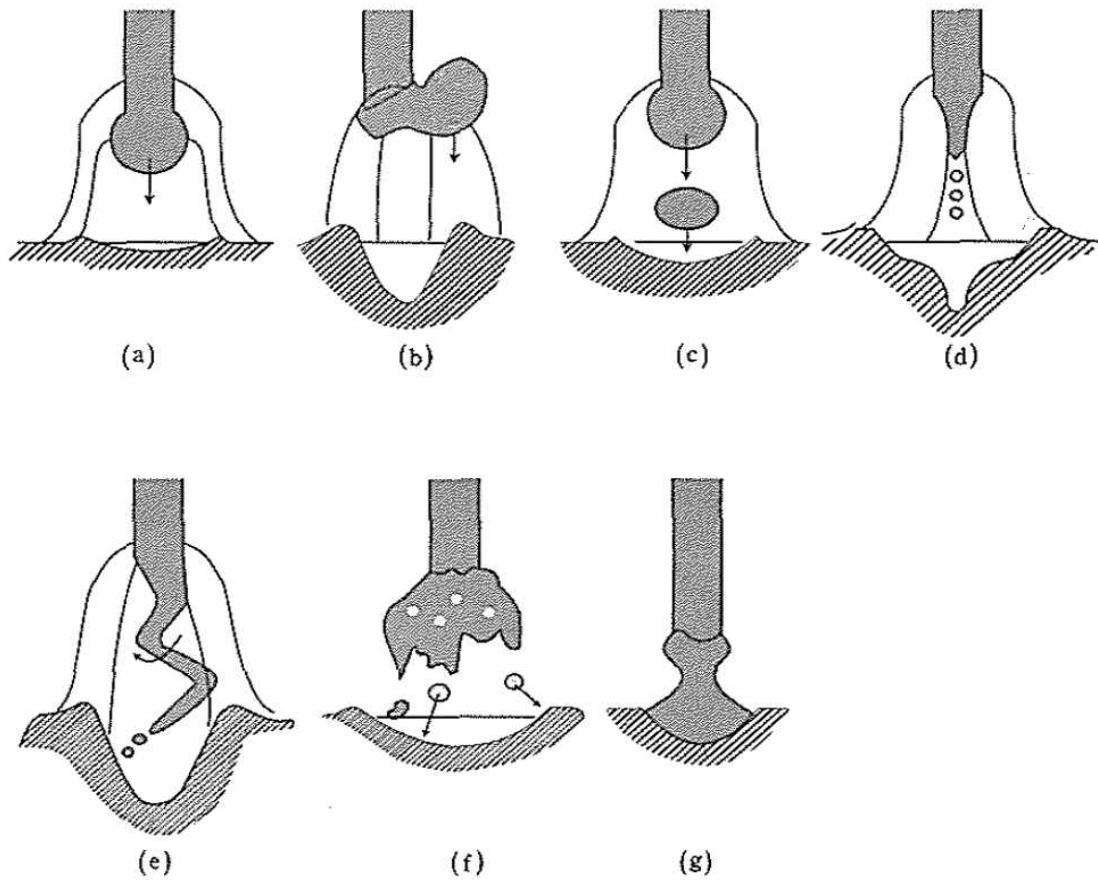
단락이행 모드는 조성에 관계없이 저전류 저전압조건에서 발생하고, 와이어 선단에서 형성된 용적이 충분하지 성장하지 못한 상태에서 용융풀(Molten pool)과 접촉하여 단락 시, 전기저항이 급격히 저하하고 용접아크는 소멸한다. 저전류, 저전압 영역에서 발생하기 때문에 입열량이 작고 박판용접에 용이하다. 그러나 단락이행시 순간적인 단락으로 인한 급격한 전류 상승으로 많은 스파터(Spatter)가 발생하고 이는 용접품질과 생산성을 저하시키는 주요인이다.

스프레이이행 모드는 Ar가스를 주성분으로 하는 보호가스 사용 시 특정 전류 값에서 용적의 크기나 형상이 급격하게 변화하는 천이전류이상 증가할 때 발생한다. 스프레이이행 모드는 전류가 증가함에 따라 프로젝티드, 스트리밍 및 회전 모드로 세분화 한다. 천이전류 근처에서 발생하는 프로젝티드 모드는 이탈 용적의 지름이 용접봉의 지름과 거의 비슷하다. 전류가 증가하면 용융부의 길이가 증가하고 테이퍼(Taper)가 발생하여 원추형과 유사한 형태인 스트리밍 모드로 변화한다.

스트리밍 모드는 프로젝티드 모드보다 높은 전류영역에서 발생하며, 용접봉 돌출부의 길이는 거의 변화하지 않으며 용적이 매우 높은 주파수로 이탈하기 때문에 용접전류와 전압의 변화는 매우 작다. 프로젝티드와 스트리밍 모드는 Ar을 주성분으로 하는 보호가스를 사용하기 때문에 아크가 안정되고 스패터(Spatter) 발생이 적으며, 용입이 증가한다.

회전 모드는 스트리밍 모드보다 높은 전류 영역에서 발생한다. 저항열과 아크열에 의해 용융된 와이어의 끝이 전자기력의 영향을 받아 나선형 궤적을 그리면서 빠른 속도로 용융풀(Molten pool)로 이행된다. 회전 모드는 아크가 불안정하고 스패터(Spatter)가 크게 발생하므로 이를 제어가 어렵고 일반적으로 사용하지 않는다.

이러한 용적이행 방법 중 용접성 즉, 스프레이 이행은 용접부의 균열 발생 저항성, 용접부의 기공 발생 빈도, 용접부의 강도 회복 능력이 상대적으로 가장 우수하며, AC 펄스 MIG 용접이 이에 속한다.[28]



- | | |
|--------------|-----------|
| (a) 입상용적 이행 | (e) 회전 이행 |
| (b) 반발 이행 | (f) 폭발 이행 |
| (c) 프로젝티드 이행 | (g) 단락 이행 |
| (d) 스트리밍 이행 | |

Fig. 1.4 Schematic Drawing of GMAW Droplet Metal Transfer

1.4 AC 펄스 MIG 용접

1.4.1 AC 펄스 MIG 용접특성과 EN Ratio

1) AC 펄스 MIG 용접의 특성

AC 펄스 MIG 용접은 용접도중 와이어의 극성이 (+)극과 (-)극으로 주기적으로 교차하며 바뀌게 된다. 와이어가 (+)극이고 모재가 (-)극인 역극성일때 전자가 모재에서 와이어로 이동하며 열을 발생시켜 와이어의 용융량이 많아진다. 그리고 알루미늄 용접 시 보호가스로 Ar 가스를 사용할 경우 청정효과(Cleaning effect)가 발생한다.

역극성에서 음극인 모재 표면에 존재하는 산화막(Oxide film)에서 전자가 발생하므로 아크가 산화막에 집중되어 고온에 의해 산화막을 제거하는 청정효과가 발생한다. 또한 아크 기둥에서 발생한 양이온이 음극인 용융부 표면에 충돌하면서 산화막을 제거한다.[29]

위와 반대로 와이어가 (-)극이고 모재가 (+)인 정극성일때는 전자가 와이어에서 모재로 이동하며 열을 발생시켜 모재에 입열이 많이 발생하기 때문에 깊은 용입을 얻을 수 있다. 그러나 일반적인 AC MIG는 주파수의 2배에 해당하는 빈도로 아크가 소멸, 재생성 되므로 아크가 항상 불안정하다.

AC 펄스 MIG 용접은 DCEP 극성과 DCEN 극성의 두 구간을 두어 두 구간을 EN 극성 비율에 의해 주기적으로 반복하는 용접법으로서, DCEP 극성과 DCEN 극성의 두 가지 효과를 동시에 얻을 수 있는 용접방법이다.[15]

AC 펄스 MIG 용접의 전류파형을 Fig. 1.5에 나타내었다. AC 펄스 MIG 용접의 전류파형은 식 (1.1) 과 같이 EN 극성 비율로 표현된다. 여기서, I_{EP} 는 EP 구간의 평균전류(A), I_{EN} 는 EN 구간의 평균전류(A), T_{EP} 는 EP 구간의 시간(sec), T_{EN} 는 EN 구간의 시간(sec)을 나타낸다.

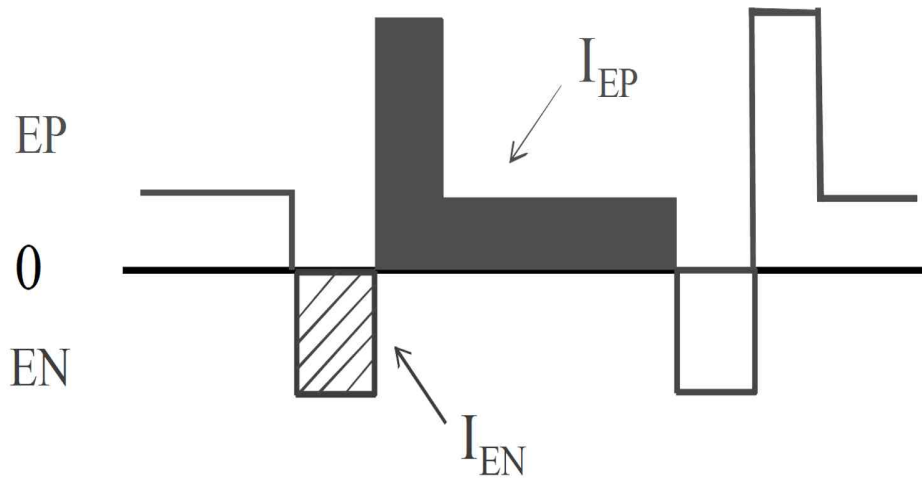


Fig. 1.5 Schematic Illustration of AC Pulse MIG Current Waveform

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

I_{EP} : EP 간의 평균 전류(A)

I_{EN} : EN구간의 평균 전류(A)

T_{EP} : EP구간의 시간(sec)

T_{EN} : EN구간의 시간(sec)

2) EN Ratio에 따른 AC 펄스 MIG 용접의 특성

EN 구간에서 용적은 아크에 의해 균일하게 덮여 있고, 음극점은 용적 위에서 형성되어진다. 이때, 아크열이 와이어를 녹이는데 효과적으로 사용되므로 와이어의 용융속도가 빠르며, 용적은 크고 저온의 용적이 된다. 그러나 음극점은 양극점과 같이 고정되어 있지 않고, 음극의 표면 위를 불규칙적으로 빠르게 이동하는 특성이 있어 아크는 불안정해진다.

EP 구간에서 아크는 용적 아랫부분에 집중된다. 이로 인해 용적 아래 부분이 과열되고 아크열이 와이어를 용융시키는데 효과적으로 사용되지 못하고 와이어의 용융속도가 느리며 용적은 작고 고온의 용적이 된다.[30]

EN 비율이 증가할수록 일정한 용접 전류에서는 와이어 용융속도가 높아지고, 일정한 와이어를 용융시키기 위해 필요한 용접 전류는 감소하는 것을 알 수 있다.[31][32]

따라서 EN 비율이 증가함에 따라 용착금속량은 증가하게 된다. 용착량의 증가로 인한 고속 용접이 가능하게 되며 일정한 와이어 공급 속도에서는 EN 비율이 증가함에 따라 용접전류는 감소하며, 모재가 받는 입열량이 낮아지게 된다. 이러한 상관관계를 Fig. 1.6에 모식도로 나타내었다.[33]

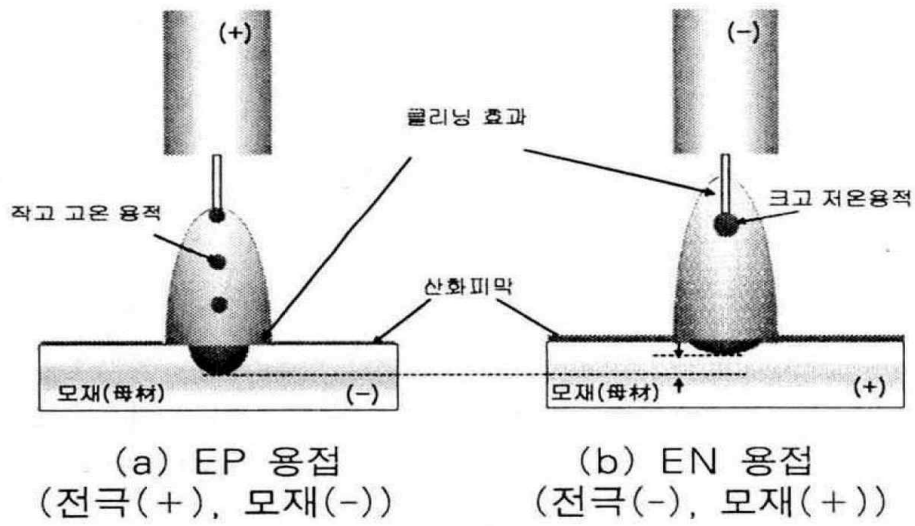


Fig. 1.6 Comparison Schematics of GMAW Polarity

1.5 알루미늄 및 용융아연도금강 소재의 특징

1.5.1 알루미늄

알루미늄은 산소와 규소 다음으로 지구상에 많은 원소로 대부분 산화물 형태로 존재하였으나, 정제 기술의 발달로, 산업분야에 많이 사용되는 소재이다. 알루미늄의 비중은 2.7로 철의 1/3 수준의 가벼운 금속이다. 따라서 자동차 산업에서 꾸준히 사용량이 증가하고 있는 추세이다.[34]

알루미늄 합금은 주로 항공우주 산업에 많이 사용되며, 특히 최근에는 공업용 차량, 조선, 건축, 화학 등 여러 산업분야에 사용범위가 확대되고 있다. 또한 pH 4.5 ~ 8.5의 환경에서 산화 피막이 모재를 보호하고 있으며, 따라서 내식성은 우수하나 이온화 경향이 크므로 부식 환경에서 철, 구리, 납 등과 접촉하면 부식이 발생하고 수은은 ppm 단위 접촉만으로도 심하게 부식된다.

순수 알루미늄은 강도가 낮고, 이를 보완하기 위해 Mn, Si, Mg, Cu, Zn, Cr 등을 첨가하여 주로 석출 경화에 의한 강도 향상을 위해 사용한다. 일반 탄소강에 비해 열전도도와 전기 전도도는 약 4배 정도로 크고, 자성이 없으며, 선팽창계수는 약 2배 정도로 용접성은 많이 떨어진다.

알루미늄 합금은 전신재와 주물 및 다이캐스팅 합금으로 분류되며, 열처리 유무에 따라 열처리 합금과 비열처리 합금으로 분류할 수 있다. 이에 따른 합금명과 특성, 용도를 Table. 1.1에 나타내었다. 6XXX계(Al-Mg-Si계) 합금은 내식성, 강도, 성형가공성, 용접성이 우수하지만 용접부가 용접 열에 의해 연화되는 단점이 있다. 6061 합금은 차량용 재료 및 건축용 재료, 6063 합금은 건축용 샷시, 6N01 합금은 대형 용접용 형재로서 철도차량 또는 선박용으로 사용되고 있다.[35]

Table. 1.1 Characteristics and Classification of Aluminum Alloy

구분	합금명	특성	용도
비열처리형 (고용 경화)	1XXX(pure Al)	내식성, 도전성, 성형가공 성 우수	도전재, 화학 공업 용, 식품용기
	3XXX(Al-Mn계)	용접성, 내식성, 성형가공 성 우수	주방용품, 판금재 료
	4XXX(Al-Si계)	내마모성, 내열성	피스톤, 용접봉
	5XXX(Al-Mg계)	용접성 양호, 내식성 우수	건축, 차량, 선박, 가드레일, 액화가 스설비
열처리형 (석출 경화)	2XXX(Al-Cu-Mg계)	기계적 성질, 절삭성 우수, 고강도	기계부품, 항공기 기, 광학부품
	6XXX(Al-Mg-Si계)	용접성, 내식성 양호	건축용 및 구조용 재료
	7XXX(Al-Zn-Mg계)	용접성 우수, 고강도	방산용 재료, 용접 구조재

1.5.2 용융아연도금강

용융아연도금(이하 GI Steel)은 1741년 프랑스 화학자인 Pall jacgues Melouin이 아연을 녹여 철 표면에 도금한 것을 시작으로, 1863년 프랑스 Sorel과 영국의 Crowford가 Flux 발명특허를 취득하면서 산업에 본격적으로 사용되기 시작했다. 아연도금강판(Galvanized Steel Sheet, Zinc coated Steel Sheet)은 아연을 도금한 강판 전체를 총칭하는 것으로 그 제조방법에 따라 용융아연도금강판(hot Dipped Galvanized-Iron, HDGI, CGI, GI)과 전기아연도금강판(Electrolytic Galvanized Iron, EGI)으로 구분된다. Fig. 1.7에 아연도금강판의 도금 공정을 나타내었다.

이 중 자동차 산업에서 가장 많이 사용되는 아연도금강의 종류는 순수 아연 도금(Galvanized Steel Sheet)과 합금화아연도금(Galvannealed Steel Sheet)로 구분되며, 초 고장력 강을 자동차에 적용했을 때, 알루미늄 등 대체소재보다 경제성 및 강도가 높으며, 특히 안정성 면에서 우수하다. 철의 가공성과 용접성이 뛰어나고, 일반 스틸의 가장 큰 단점인 부식을 방지하는데 탁월하다. 아연도금강의 부식 방지 메커니즘은 아연(Zn)과 철(Fe)이 조합하여 금속의 이온화 서열에 상대적으로 반응성이 큰 아연(Zn)이 먼저 부식되고, 철(Fe)은 방식되는 원리이다. 또한, 아연도금면이 벗겨지더라도 주변에 위치한 아연(Zn)이 먼저 부식하는 희생방식으로 타 도금에 비해 효과적이다. 높은 내식성과 부식방지효과의 지속성으로 경제성이 뛰어나고, 다양한 종류의 제품개발이 가능하며 자동차산업에서 가장 많이 사용되는 강판 중 하나이다. Table. 1.2에 도금종류에 따른 아연도금강판의 특징을 나타내었다.

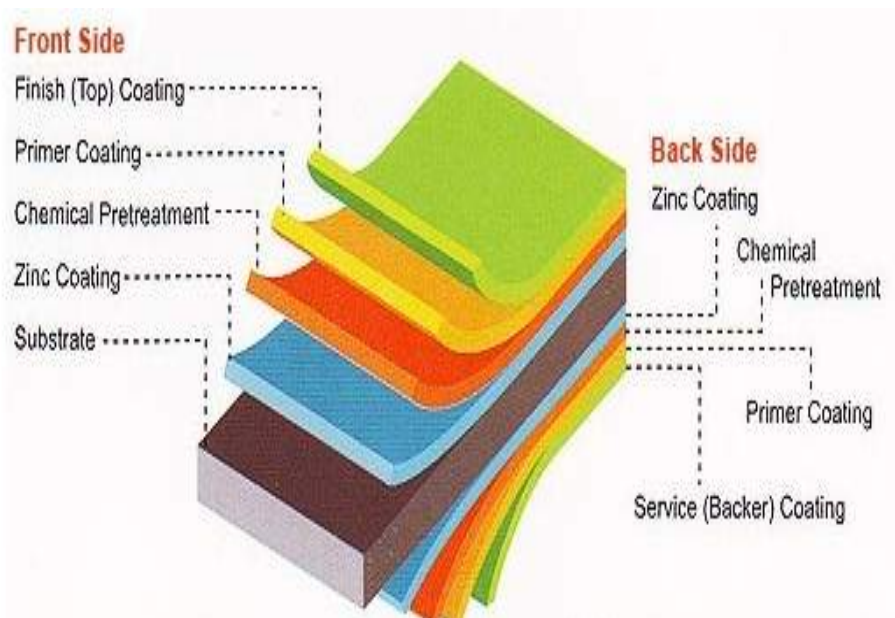


Fig. 1.7 Coating Process of Galvanized Steel Sheet

Table. 1.2 Characteristics and Classification of Galvanized Steel

구분	특성	용도
GI (Hot-dip Galvanized Steel)	내식성, 도장성, 용접성, 도장성	가전제품, 자동차부품, 골조, 건축내외장재
GA (Galvannealed Steel)	내식성, 도장성, 가공성	가전제품, 철제가구, 자동차 외판
EGI (Electro Galvanized Steel)	내식성, 도장성	가전제품, Display, 모터커브

제 2 장 연구 방법

2.1 연구 방법

1장에서는 본 연구의 배경 및 목적과 국내외 기술동향, 용접 공정의 원리 및 소재의 특성에 대해 서술하였다.

2장에서는 본 연구에 사용된 재료, 용접법 및 용접 조건 등 실험 방법에 대해 서술하였으며 EN Ratio(정극성과 역극성의 비율), 용접 전류의 변화에 따른 AI 6061-T6와 용융아연도금강의 AC 펄스 MIG 브레이징 성을 고찰하였다.

3장에서는 용접부의 기계적, 금속학적 특성 평가를 위해 AI 6061-T6와 용융아연도금강의 겹침 이음 용접부의 기계적 특성 평가로 인장-전단 강도 시험을 실시하였고 금속학적 특성 파악을 위해 마크로 단면 분석 및 SEM/EDS 분석을 실시하였다.

4장에서는 AI 6061-T6와 용융아연도금강의 AC 펄스 MIG 겹침 이음 용접부에서 EN Ratio(정극성과 역극성의 비율)와 용접 전류의 영향에 대해 요약 및 결론 도출을 실시하였다.

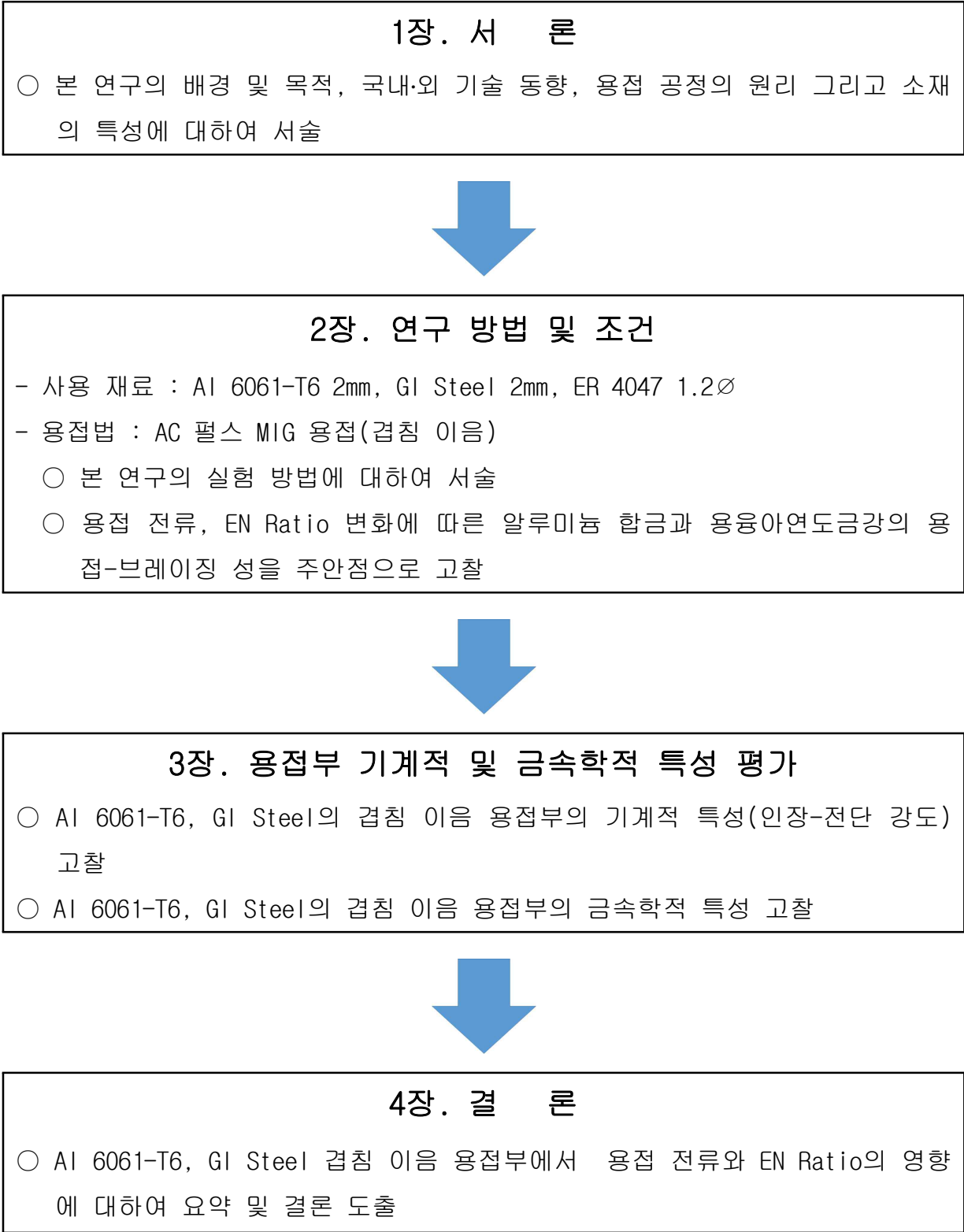


Fig. 2.1 Flow Chart of Thesis

2.2 실험장비 및 조건

2.2.1 사용소재 및 용접법

본 연구에서는 AC 펄스 MIG 용접을 사용하여 AI 6061-T6와 용융아연도금강 이종 소재 겹침 이음 용접 시 용접 전류와 EN Ratio(정극성과 역극성의 비율)에 따른 용접-브레이징 특성에 대해 분석하였다.

본 연구에서 사용한 판재는 열처리형 알루미늄 합금인 AI 6061-T6(두께 : 2mm)와 용융아연도금강(두께 : 2mm)로, 실험에 사용한 판재의 화학적 조성은 Table. 2.1와 Table. 2.3에, 기계적 물성은 Table. 2.2와 Table 2.4에 각각 나타내었다. 또한 AC 펄스 MIG 용접 시 사용된 와이어는 1.2mm 직경의 Alcotec社 ER 4047 와이어를 사용하였으며 실험에 사용된 와이어의 화학적 조성과 기계적 물성은 Table. 2.5와 Table. 2.6에 나타내었다.

실험에 사용된 시험편은 AI 6061-T6과 용융아연도금강 모두 (L)=200mm, 폭 (B)=100mm, 각각 절단하여 시험편을 제작하였다.

용접은 Fig. 2.2에 나타낸 모식도와 같이 하판을 상판을 AI 6061-T6로 GI강판로, 20mm 겹쳐 AC 펄스 MIG 용접을 진행하였다. 용접 토치 각도는 전진각 10도, 측면 각 10도로 하였으며 CTWD(Contact Tip to Workpiece Distance)는 15mm로 고정하여 실험을 진행하였다.

Table. 2.1 The Chemical Composition in Al 6061-T6 (Wt%)

Composition Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
Al 6061-T6	0.4 ~0.8	0.7	0.15 ~0.4	0.15	0.1	0.04 ~0.35	0.25	Bal.

Table. 2.2 The Mechanical Properties in Al 6061-T6

Material	Mechanical properties		
	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al 6061-T6	276	310	12

Table. 2.3 The Chemical Composition in Galvanized Steel (Wt%)

Composition Material	C	Si	Mn	P	S	SoI-Al	Fe
GI Steel	0.012	0.01	0.15	0.015	0.007	0.032	Bal.

Table. 2.4 The Mechanical Properties in Galvanized Steel

Material	Mechanical properties		
	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
GI Steel	164	294	53

Table. 2.5 The Chemical Composition in ER 4047 Aluminium Wire (Wt%)

Composition Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be	Al
ER 4047	11.0~ 13.0	0.8	0.3	0.15	0.1	0.2	0.000 3	Bal.

Table. 2.6 The Mechanical Properties in ER 4047 Aluminium Wire

Material	Mechanical properties		
	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
ER 5356	131	268	17

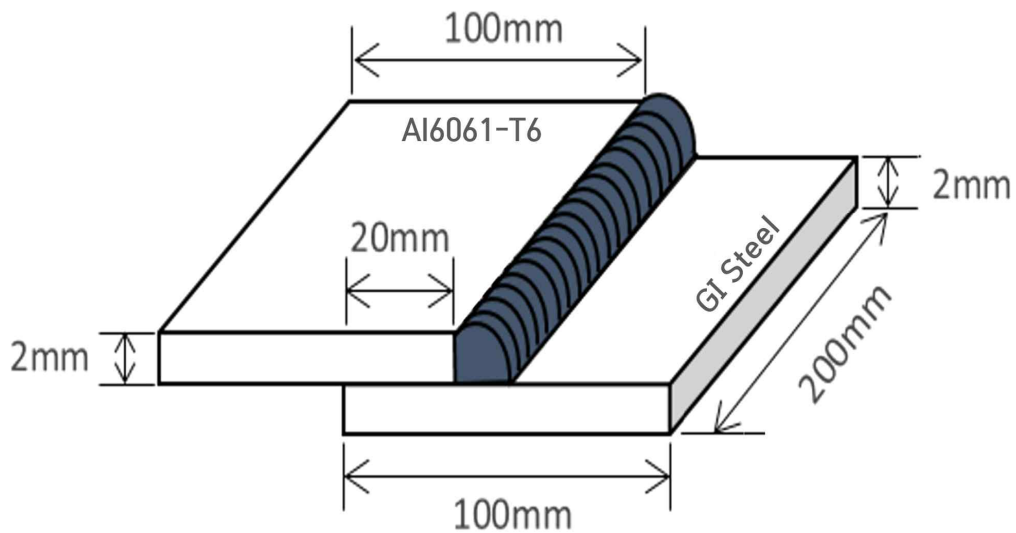


Fig. 2.2 Schematic of Lap Jointed Al 6061-T6 to Galvanized Steel

2.2.2 실험장비

본 연구에서 사용된 AC 펄스 MIG 용접기는 Fig. 2.3에 나타난 일본 Daihen社의 DW300 AC 펄스 MIG 용접기를 사용하였다. DW300의 주요 사양은 정격 출력 전류 30~300A, 정격 출력 전압 12~35V를 사용하며, 정격 사용율은 최대 80%이다.

용접에 사용된 로봇은 Fig. 2.3에 나타난 일본 OTC社의 FD-V6을 사용하였다. FD-V6의 주요 사양은 최대 허용 가반 하중 6kg의 수직다관절형 6축 로봇이다.

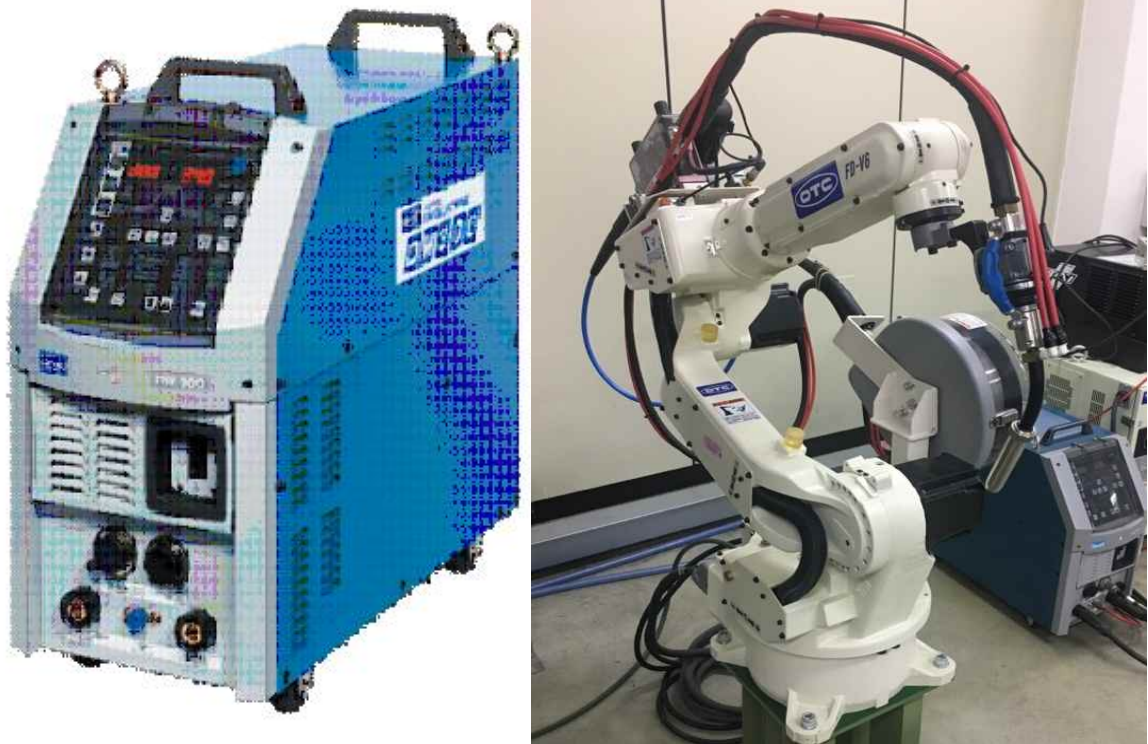


Fig. 2.3 AC pulse MIG Welding Machine and 6 Axis Welding Robot

2.2.3 실험조건

AC 펄스 MIG 용접으로 겹침 이음 용접을 할 경우 용접공정변수로는 용접전류, 용접전압, EN 비율, 와이어 돌출길이(CTWD), 토치(torch)각도, 보호가스 및 유량, 이송속도 등 이 있다. 따라서 많은 공정변수로 인해 최적의 용접조건을 설정하기가 어렵다.

또한, Al 6061-T6와 용융아연도금강의 겹침 이음 용접 시 발생하는 금속간화합물(Fe-Al) 감소시키기 위하여 입열량을 줄일 필요가 있다. 와이어 송급속도가 일정할 때 EN 비율이 증가할수록 용입은 줄어들고 용착금속량은 증가하는데 이는 모재로 들어가는 입열량이 줄어든다는 것을 알 수 있다.[36][37]

2mm의 동 두께의 Al 6061-T6와 용융아연도금강의 겹침 이음 용접은 겹침부 20mm로 갭(gap) 없이 용접을 진행하였으며, 위의 모식도를 Fig. 2.4에 나타내었다. 또한 토치각도는 전진각 10도, 측면각 10도로 하였으며 CTWD는 15mm로 고정하였다. 보호가스는 100% Ar 가스를 사용하였으며 보호가스 유량은 18L/min, 용접속도는 50cm/min으로 하였다.[38]

특히, 용접-브레이징 공정변수로는 용접 전류와 EN Ratio로 용접 전류는 50A, 60A, 70A로 변화시켰으며, 주안점으로 EN Ratio에 따른 용접특성을 파악하기 위해 0%, 10%, 20%로 공정변수를 설정하고, 이에 따른 용접 공정변수를 Table. 2.7에 나타내었다.

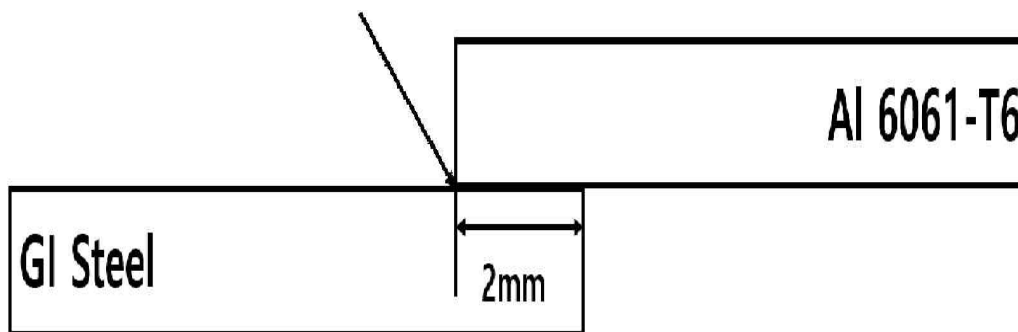


Fig. 2.4 Schematic of Lap Joint Wire Position

Table. 2.7 Al 6061-T6 / GI Steel Lap Joint Welding Experiment Condition

Welding process	AC Pulse MIG
Type of joint	Lap joint
Overlapping length (mm)	20
Electrode type	ER 4047
Electrode diameter (mm)	1.2
Travel speed (cm/min)	50
Torch angle (deg.)	10 / 10
Gap (mm)	0
Shielding gas	Ar 100%
Shielding gas flow rate (L/min)	18
Contact tip to work distance (mm)	15
EN Ratio(%)	0, 10, 20
Current(A)	50, 60, 70

2.3 용접부 특성 평가 방법

2.3.1 용접 공정변수에 따른 표면 및 단면 특성 평가

Al 6061-T6와 용유아연도금강의 겹침 이음 용접 시 EN 비율 각각 0%, 10%, 15%로 설정하고, 용접 전류는 50A, 60A, 70A, 그리고 이에 따른 목두께 (Neck thickness), 각장(Leg length), 접합계면 길이(Joint interface length) 등을 측정하였다.

또한, Al 6061-T6와 용유아연도금강계면의 Al-Fe계 금속간화합물의 생성량을 측정하기 위하여 SEM-EDS 분석도 진행하였다. SEM-EDS 분석은 Hitachi社의 S-4800 Scanning Electron Microscope(SEM), Energy Dispersive Spectroscopy(EDS)를 이용하였으며, 이를 Fig. 2.5에 나타내었다.

분석 진행을 위하여 용접부를 절단 하고, 핫 마운팅(Hot mounting) 및 미세연마(Polishing)을 실시하였다. 핫 마운팅을 실시하고 연마지를 사용하여 # 400, # 600, # 800, # 1000, # 1200, # 1500, # 2000, # 2400, # 4000 순서로 연마를 진행하였다. 더욱 세밀한 연마를 위하여 Diamond paste 9 μ m, 3 μ m, 1 μ m 순서로 미세 연마를 진행하였다.

마이크로 단면을 관찰하기 위하여 연마된 시험편을 Keller' s 부식액으로 15초간 etching을 실시하였고, Keller' s 부식액은 증류수 50ml, 염산 15ml, 질산 25ml, 불산 10ml를 섞어 사용하였으며, Keller' s 부식액의 사용량은 Table. 2.8에 나타내었다. 마이크로 단면 관찰은 일본 OLYMPUS社의 BX51M 광학현미경을(Optical Microscope, OM) 사용하였다.

Table. 2.8 Keller 's Etching Reagent

Solutions	Values(ml)
pure water (H ₂ O)	50
Hydrochloric acid(HCl)	15
Nitric acid(HNO ₃)	15
Hydrofluoric acid(HF)	10



Fig. 2.5 OM and SEM

2.3.2 용접부 인장-전단강도 시험

용접부에 대한 인장-전단강도를 측정하기 위하여 인장-전단시편은 각 조건별로 3개씩 채취하였으며 시편은 Fig. 2.6과 같이 시험편을 제작하여 인장-전단시험을 진행하였다. 인장-전단시험에 사용된 장비는 Fig. 2.7의 일본 Shimadzu社의 20Ton Universal Testing Machine이다. 시험편 길이 180mm, 폭 30mm, 물림부 길이 40mm로 하였으며 인장-전단시험 속도는 2mm/min으로 수행하였다. 인장-전단시편의 두께는 Al 6061-T6와 용융아연도금강 2mm로, 2mm의 스페이서(Spacer)를 같이 물려 인장-전단시험을 실시하였다.

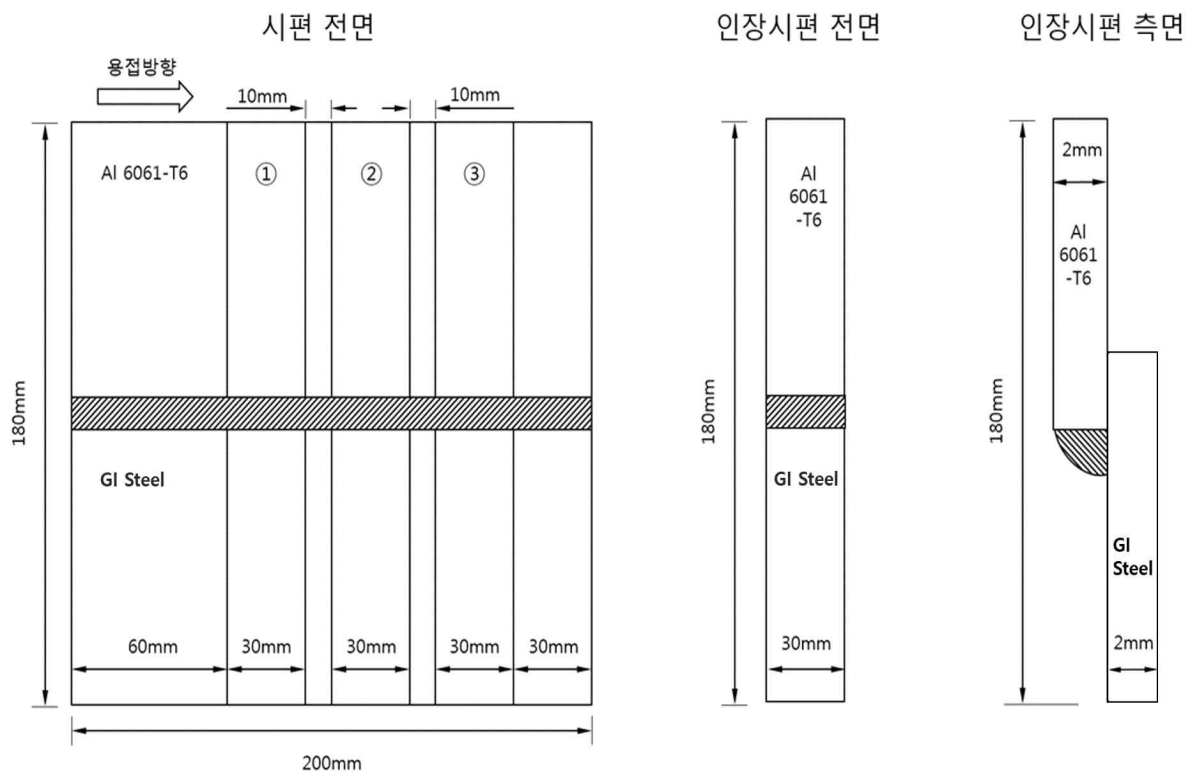


Fig. 2.6 Schematic of Tensile-Shear Test Specimen



Fig. 2.7 Universal Testing Machine

제 3 장 연구 결과

3.1 용접공정변수에 따른 표면 및 단면특성

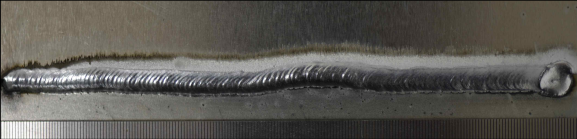
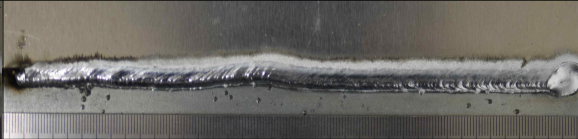
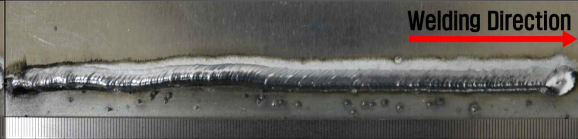
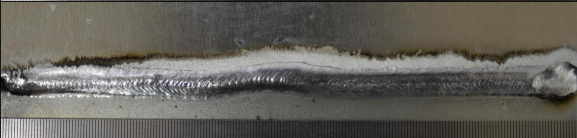
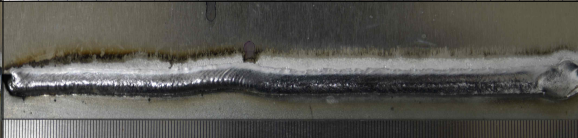

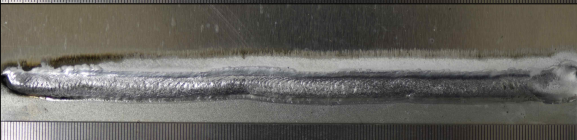
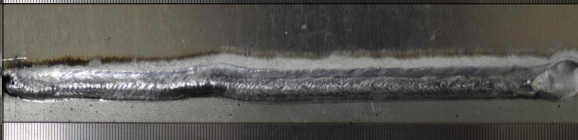

3.1.1 용접공정변수(전류, EN Ratio)에 따른 겹침-이음표면 특성

Al 6061-T6와 GI Steel 겹침 이음부의 표면을 Table. 3.1에 나타내었다. 모든 조건에서 알루미늄 모재와 용가재로 형성된 용융지는 GI Steel 계면의 Zn로 인해 젖음성이 향상되면서, 골고루 퍼지는 형태를 나타낸다. 용접전류 및 EN Ratio가 증가함에 따라 비드가 넓게 퍼지며, 용착금속량이 증가하는 경향을 보인다.

용접전류 50A에 EN Ratio 0%와 비교하여, EN Ratio가 올라감에 따라 스파터(Spatter) 발생이 증가하였다. 이는 EN Ratio가 증가하게 되면, 모재가 받는 입열량이 줄어들기 때문에, 입열 부족으로 인한 알루미늄 계면의 용융 및 GI Steel 계면의 브레이징(brazing)이 원활하게 이루어지지 못하였기 때문으로 추측된다. 또한 입열 부족과 더불어, EN Ratio가 증가하게 되면 아크의 불안정성이 높아지며 이는 원활한 용적이행을 방해하는 요소로 작용하였을 가능성이 크다.

용접전류 60A와 70A 조건에서 적절한 입열로 인한 원활한 용융지 형성 및 접합 계면 브레이징으로 인해, 비교적 적은 스파터(Spatter)와, 적합한 브레이징이 이루어졌음을 알 수 있다.

Table. 3.1 Bead Appearance of Welded Surface

Current (A)	Electrode negative ratio(%)		
	0%	10%	20%
50			
60			
70			

3.1.2 용접공정변수(전류, EN Ratio)에 따른 단면 특성

용접된 AI 6061-T6와 GI Steel 겹침 이음부의 단면을 Table. 3.2에 나타내었다. 50A에 EN Ratio가 증가함에 따라 root부 기공 및 내부 기공이 발생하였다. 이는 입열 부족으로 인하여 원활한 브레이징이 이루어지지 않았으며, EN Ratio가 증가함에 따라, 아크가 와이어를 용융시키는데 많은 열량을 소모하고 이에 따른 입열 부족으로 용융지 형성 및 유동성 저하로 기공의 발생 후 소멸을 제어하지 못한 것으로 판단된다.

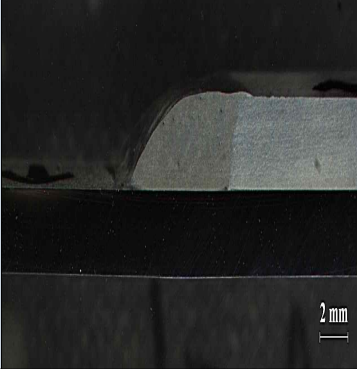
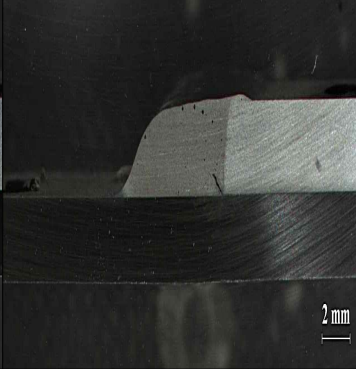
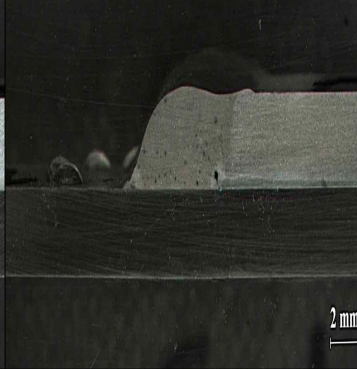
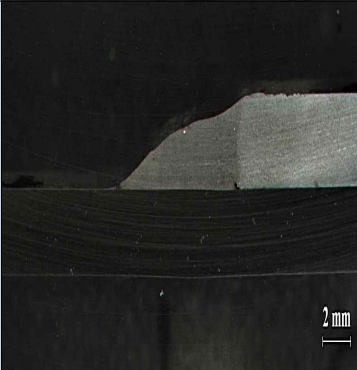
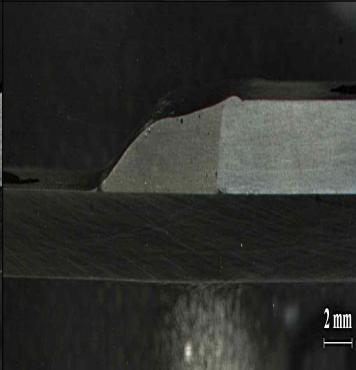
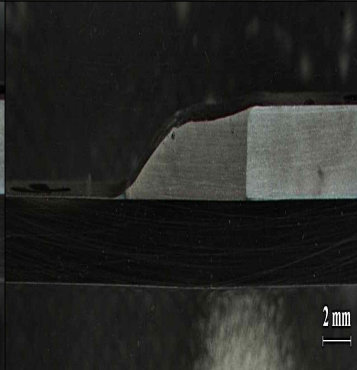
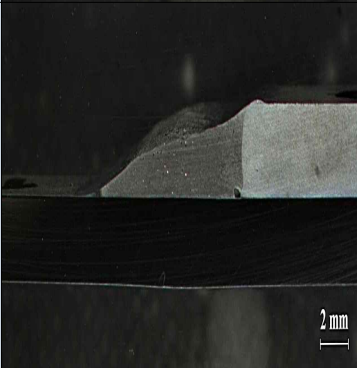
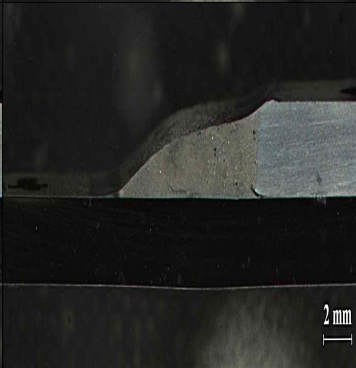
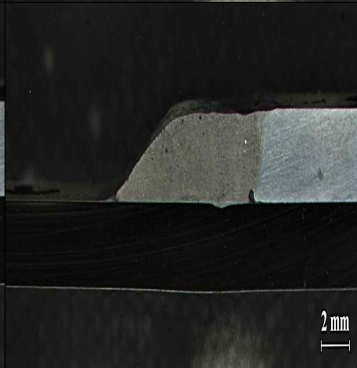
특히, GI Steel의 도금층인 Zn가 고상상태에서 순식간에 기화될 경우 발생하는 강한 증기압은 일부가 빠져나가지 못해 용착금속의 내부 기공으로 잔존하여 발생하며, 용접 전류가 증가함에 따라, 용접 root 기공은 증가해야하나, EN Ratio의 증가로 60A의 EN Ratio 10%, 20%조건에서는 root부 및 비드 내부 기공이 감소함을 알 수 있다. 70A의 조건은 입열량 과다로 인해 다량의 기공이 발생했으며, 이는 GI Steel의 도금층인 Zn의 기화량의 증가로 root부의 Zn증기 배출이 원활하게 이루어지지 못하여 발생된 것으로 사료된다.

AI 6061-T6와 GI Steel 겹침 이음부 강도의 주요요소인 유효 목두께, 접합계면 길이, 각장 측정값을 Table 3.3에 나타내었다. 접합계면 길이 측정에 관한 모식도를 Fig. 3.1에 나타내었으며, 용착금속량에 따른 유효목두께와, 접합계면길이, 각장 등은 AI 6061-T6와 GI Steel 겹침 이음부의 강도에 중요한 역할을 하게 되며, 외부의 응력이 작용 하였을 때, 응력이 루트부에 덜 집중되어 더 많은 응력을 견딜 수 있다.

모든 조건에서 EN 비율이 증가함에 따라 목두께, 접합계면길이, 각장이 증가함을 알 수가 있다. 그러나 용접전류 50A 조건에서 비드의 높이가 가장 높게 측정되었으며, 이는 입열 부족으로 용가재와 알루미늄 합금의 용융 및 GI Steel 계면의 브레이징이 제대로 이루어지지 못하여, 용가재가 GI Steel 계면으로 원활하게 퍼지지 못한 것이 원인으로 판단된다.

용접전류 60A 조건 일때 각장은 EN Ratio에 따른 증가율이 용접전류 50A조건보다 낮지만, 접합계면길이의 증가 및 목두께의 증가로, 용가재가 알루미늄 합금과는 용융, GI Steel 계면에서는 브레이징이 원활하게 이루어 졌음을 알 수 있다. 그러나 70A의 조건에서는 모든 측정값이 EN Ratio에 따라 증가하였지만, 입열 과다 및 용착금속량의 증가로 다량의 Zn증기가 발생하였으며, Zn증기가 배출되지 못하고 용접부 내부에 잔존하여, root부 기공 발생의 원인으로 사료된다.

Table. 3.2 Cross Section of Welds

Current (A)	Electrode Negative Ratio(%)		
	0%	10%	20%
50			
60			
70			

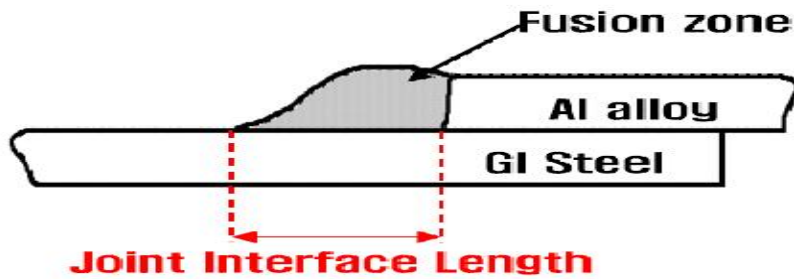


Fig. 3.1 Schematic of Joint Interface Length

Table. 3.3 The Joint Interface Length, Neck Thickness and Leg Length According to Welding Conditions

Current (A)	50			60			70			
	EN Ratio (%)	0	10	20	0	10	20	0	10	20
Throat thickness (mm)		4.78	5.32	5.6	5.56	6.26	6.85	6.13	6.68	7.10
Joint interface length (mm)		7.60	7.80	7.80	9.22	9.48	9.99	11.00	11.34	11.48
Leg length (mm)		2.70	2.80	2.90	2.0	2.18	2.2	1.9	1.95	2.5

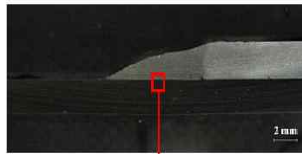
3.1.3 SEM/EDS 분석

1) EN Ratio에 따른 금속간화합물 두께

용접 전류 60A, EN Ratio에 따른 금속간화합물(Intermetallic compound)의 생성량을 확인하기 위해, SEM(Scanning Electron Microscope)를 이용해 금속간화합물의 두께를 측정하였다. Fig. 3.2에 2000배율로 찍은 SEM 사진을 나타내었다. 용접 전류가 65A EN Ratio 0%의 조건에서는 금속간화합물의 평균두께는 $4.96\mu\text{m}$, EN Ratio 10%조건은 $4.69\mu\text{m}$, EN Ratio 20%조건에서는 $2.41\mu\text{m}$ 가 측정되었다.

모든 조건에서 금속간화합물로 추측되는 층의 두께가 약 $2 \sim 4\mu\text{m}$ 이 형성 되었으며, EN Ratio가 증가함에 따라 취성(brittle)적인 금속간화합물 층의 성장이 억제되었다. 이는 EN Ratio의 증가에 따른 용가재의 용융량은 증가하나, 입열은 줄어들기 때문에, 용가재와 GI Steel의 브레이징 계면에서의 금속간화합물 생성이 감소한 것으로 판단된다. GI Steel 계면에서의 금속간화합물 층은 다소 매끄러우며, 알루미늄 계면은 톱니모양을 나타내고 있다. 이는 브레이징 공정 중 GI Steel의 방향으로 금속간 화합물 층이 성장한 것으로 추측된다.

전류 60A , EN ratio 0%



✓ IMC 평균두께 : 4.96 μ m



전류 60A , EN ratio 10%



✓ IMC 평균두께 : 4.69 μ m



전류 60A , EN ratio 0%



✓ IMC 평균두께 : 2.41 μ m



Fig. 3.2 Thickness of Intermetallic Compound by EN Ratio

2) EDS 성분분석

용접전류 60A, EN Ratio 20%일 때 형성된 금속간화합물의 성분 분석을 위해, SEM(Scanning Electron Microscope) EDS 성분분석을 진행하였다. Fig. 3.3과 Fig. 3.4는 EDS Line 분석과 Spot분석을 진행한 결과이다.

EDS 성분분석 결과 Line 분석에서는 Al, Fe, Zn, Si의 성분이 주를 이루는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 금속간 화합물(Intermetallic compound) 추측되는 구간의 Fe의 함량이 GI Steel 계면에서 알루미늄 소재 방향으로 점차적으로 감소하고, 이와 대조적으로 알루미늄은 점차적으로 증가함을 알 수 있다. GI Steel의 도금 층인 Zn은 용점 약 420°C, 끓는점 약 907°C이고, 따라서 브레이징 시 아크의 온도구배로 인해 증발하였다. 이로 인해 전 구간 함량 분포가 낮았으며, 온도가 가장 높은 아크의 중심에서 GI Steel소재 방향으로 멀어질수록 함량 분포가 미세하게 증가하였다.

Si의 경우 용가재 용융 시 ER4047 Aluminium Wire에서 알루미늄 모재 및 GI Steel 모재에 용착되며, 그 중 Si 일부가 브레이징 계면 층으로 확산되어 Al-Fe-Si 삼원 상을 형성한 것으로 추측된다. Al과 Fe가 섞이는 양상을 보이는 것을 확인 할 수 있으며 이를 통해 접합계면 사이에 금속간화합물 층이 형성되었다고 판단된다.

EDS Spot분석을 통해 금속간화합물 층(Intermetallic compound layer)로 추측되는 부위 내의 Spot을 선정하여 EDS 분석을 진행하였다. 분석결과 Fe, Al, Si가 검출되었으며, 최초 브레이징 시 GI Steel 계면의 도금층인 Zn의 용융 및 기화와 용가재의 Si성분이 GI Steel계면으로의 확산을 통해 Fe-Al계 금속간화합물의 성장을 억제 시킨 것으로 추측된다.

전류 60A , EN ratio 20%

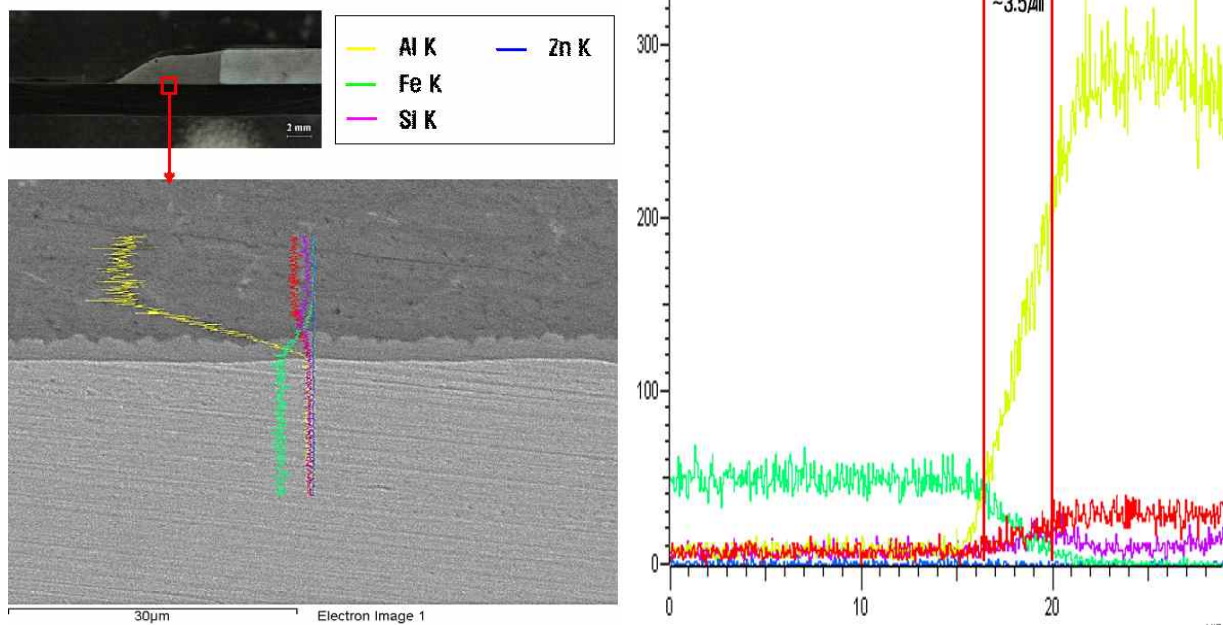
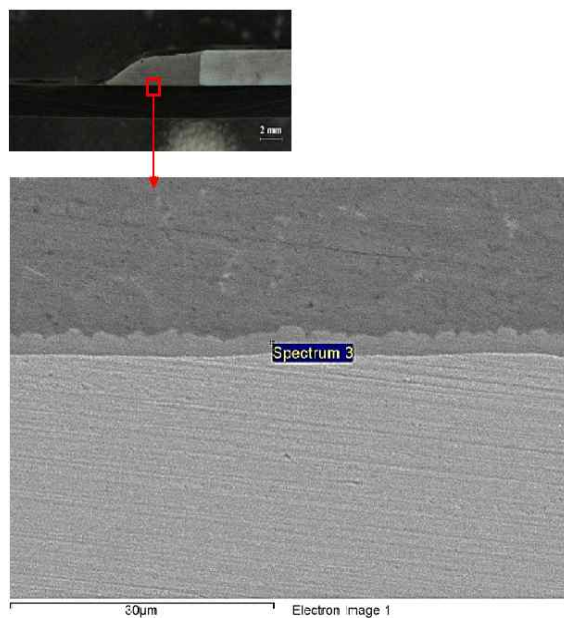
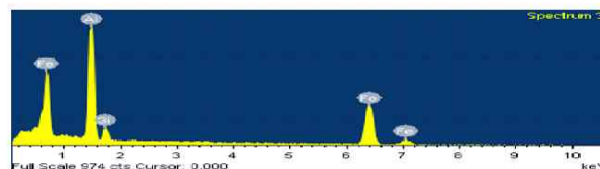


Fig. 3.3 EDS Line Analysis of Intermetallic Compound

전류 60A , EN ratio 20%



Spectrum 3



Element	Weight%	Atomic%
Al	30.45	46.19
Si	3.90	5.69
Fe	65.65	48.12
Totals	100.00	100.00

Fig. 3.4 EDS Spot Analysis of Intermetallic Compound

3.2 인장-전단강도 특성

Al 6061-T6와 GI Steel 겹침 이음부에 대한 인장-전단 강도시험을 실시하였다. 모든 인장-전단 강도시험에서 파단은 Fig. 3.5과 같이 인장 시험 중 root부와 toe부에서 국부적인 소성 변형이 집중적으로 발생하고, 모든 파단시편이 용접 root부 선단의 응력집중 부위에서 순간적으로 파단이 발생하였다.

Al 6061-T6와 GI Steel 겹침 이음부에 대한 인장-전단 강도시험 결과를 Fig.3.6와 Table. 3.4에 나타내었다. 최대 인장-전단 강도는 용접전류 70A, EN Ratio 20%일 때 8.0kN이 확보되었다. 그러나 마크로 단면 분석에서 볼 수 있듯이 용접전류 70A EN Ratio 20% 조건에서는 root부 기공이 발생하였다. 이는 응력 집중부위로 치명적인 결함발생요인이 될 수 있고, 용접전류 60A EN Ratio 20%의 조건에서는 root부 기공이 발생되지 않았으며, 최대 인장-전단 강도는 7.9kN을 확보하였다.

EN Ratio가 증가함에 따라 인장-전단 강도는 점진적으로 증가하였으며, 또한, EN Ratio가 20%일 때 용접전류 50A, 60A, 70A에서 모두 가장 높은 인장-전단 강도 값을 확인 할 수 있었다.

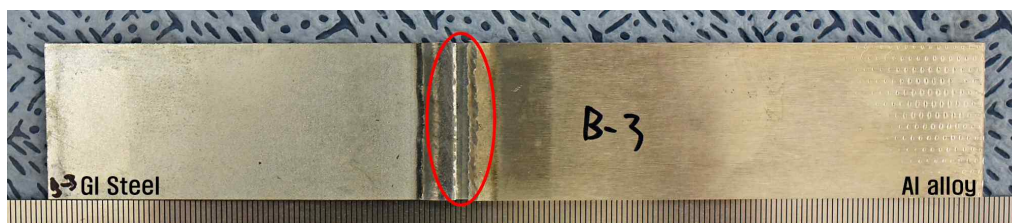


Fig. 3.5 A Fractured Specimen of Shear-Tensile Test

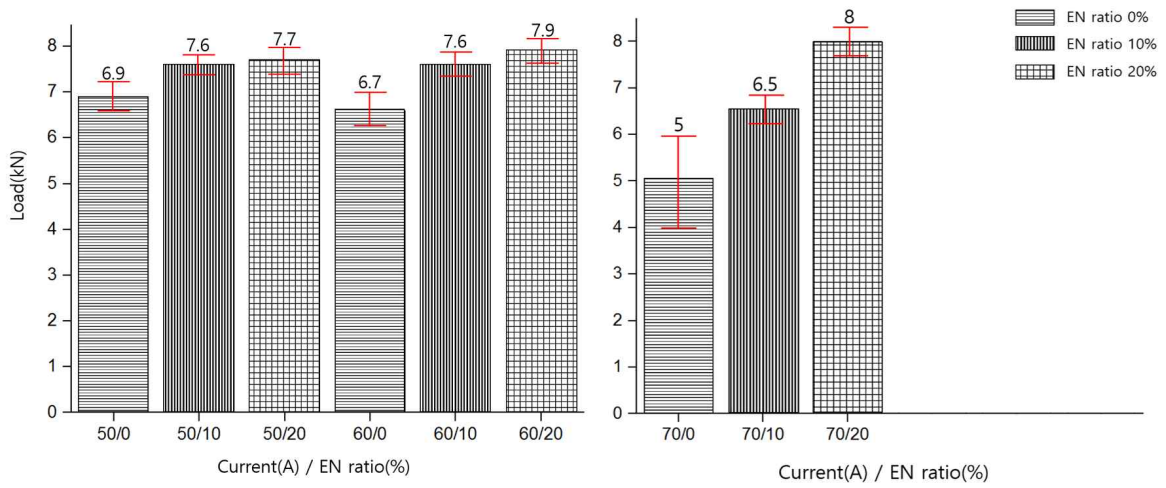


Fig. 3.6 A Graph of Shear-Tensile Test Results

Table. 3.4 A Result of Shear-Tensile Test

Current (A)	50			60			70		
EN Ratio (%)	0	10	20	0	10	20	0	10	20
Shear-tensile strength (kN)	6.9	7.6	7.7	6.7	7.6	7.9	5	6.5	8.0

제 4 장 결 론

본 연구에서는 Al 6061-T6와 GI Steel의 AC 펄스 MIG 브레이징 시 EN Ratio 따른 용접-브레이징 성을 평가하였으며 용접전류와 EN Ratio에 따른 기계적 특성 및 브레이징 메커니즘에 대해 고찰하였다. 또한 EN Ratio 20%일 때 최적의 조건을 얻을 수 있었다.

1) EN Ratio가 20%일 때 용접전류 50A, 60A, 70A의 모든 조건에서 높은 인장-전단 하중을 견뎠다. EN Ratio가 증가함에 따라, 용착금속량은 증가하고, 목두께, 접합 계면길이, 각장이 증가하는 경향을 보였으며, 입열이 부족한 용접전류 50A의 조건에서 root부 기공 발생, 과도한 입열 조건인 용접전류 70A의 조건에서 역시 root부 기공이 발생하였다. 용접전류 60A, EN Ratio 20%조건에서는 root부 기공이 발생하지 않았으며, 적절한 입열로 인한 원활한 브레이징이 이루어졌다.

2) 용접전류 60A, EN Ratio 20%일 때 금속간화합물의 두께가 가장 얇았다. 용접전류 60A의 EN Ratio 0% 조건에서 금속간화합물의 평균 두께는 $4.96\mu\text{m}$, EN Ratio 10%조건에서 $4.69\mu\text{m}$, EN Ratio 20%조건에서 $2.41\mu\text{m}$ 로 EN Ratio가 증가하면, 용가재의 용융량은 증가하나, GI Steel의 브레이징 접합계면의 입열은 줄어들기 때문에 금속간화합물의 성장이 억제된 것으로 사료된다.

3) Al6061-T6와 GI Steel의 접합계면에 생성된 금속간화합물은 EDS 성분분석 결과 Fe-Al-Si가 검출되었으며, 최초 브레이징 시 GI Steel의 도금층인 Zn의 용융 및 기화와, 용가재의 Si성분이 브레이징 계면으로 확산을 통해 삼원상의 Fe-Al-Si 혼합층이 형성된 것으로 판단된다.

4) 최적 용접-브레이징 조건은 용접전류가 60A이고, EN Ratio가 20%일 경우이고, 최대 인장-전단 하중 7.9kN이 확보되었다.

참고문헌

- [1] 김용, 박기영, 곽성복, 차체 소재 다변화에 따른 체결 및 접합기술 Journal of Welding and Joining, Vol.33 No.3(2015) pp12-18
- [2] 이목영, 정성훈, 알루미늄 기반 Advanced Multi-Material 기술의 선진 동향 Journal of Welding and Joining, Vol.34 No.5(2016) pp19-25
- [3] Robert W. Messler, Trends in key joining technologies for the twenty-first century, *Assembly Automation*, 20(2) (2000), P118-128
- [4] 김용, 이보영, 아크 열원을 이용한 스틸과 알루미늄의 이종접합에 관한 연구 (1) Journal of Welding and Joining, Vol.36 No.4(2018) pp1-12
- [5] 김용, 방희선, 용접공정을 위한 CFRP와 금속의 접합기술 동향 Journal of Welding and Joining, Vol.36 No.5(2018) pp27-38
- [6] 박형진, 박판 알루미늄 합금의 교류 펄스 미그 용접공정 최적화 기법 학위논문
- [7] 김의환, 민택기, 스텐리스강(STS304)과 알루미늄합금(Al6351) 마찰용접부의 기계적 특성에 관한 연구, 한국공작기계학회지, 2000, Vol.9 No.4, pp 131-136
- [8] Mustafa Acrer, Bilge Demir, An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum-dual phase steel, *Material Letter*, 62(25) (2008) 4148-4160
- [9] Takehiko Watanabe, Hideo Sakuyama and Atsushi Yanagisawa, Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet, *Journal of Material Processing Technology*, 209(15)(2009), 5475-5480
- [10] R.S. Coelho, A. Kostka, J.F. dos Santos and A. Kaysser-Pyzalla, Friction stir dissimilar welding of aluminum alloy to high strength steels, Mechanical properties and their relation to microstructure, *Materials Science and Engineering A*, 556 (2012), 175-183

- [11] 방한서, 방희선, 전근홍, 마찰교반접합기술을 이용한 이종재료 접합에 관한 최근 연구동향, 대한용접·접합학회지, 2011, Vol.29 Vo.5, pp37-40
- [12] M, j, Torkamany, S. Tahamtan and J. sabbaghzadeh, Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser, Materials & Design, 31(1)(2010), 458-465
- [13] 방희선, 노찬승, 엠 에스 비조이, 방한서, 이윤기, TIG-FSW 하이브리드 용접을 이용한 이종재 맞대기 용접부의 잔류응력 해석 대한용접·접합학회지,(2012) 30(2),47-53
- [14] H.T.Zhang, J.C. Feng, P. He, H. Hackl Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process, Materials Characterizaion 58 (2007) 588-592
- [15] 김동철, 박형진, 강문진, 교류 펄스 미그 용접의 원리 및 특성, 대한용접·접합학회지, 2008, Vol.26, No.6, pp548-551
- [16] P. Praveen, P. K. D. V. Yarlagadda and M. J. Kang : Advancements in pulse gas metal arc welding, Journal of Materials Processing Technology, 164-165 (2005), 1113-1119
- [17] Jiankang Huang, Xiaoying He, Yanning Guo, Zhengpeng Zhang, Yu Shi, Ding FanState, Joining of aluminum alloys to galvanized mild steel by the pulsed DE-GMAW with the alternation of droplet transfer Journal of Manufacturing Processes 25 (2017) 16-25
- [18] Guoliang Qin, yang Ji, Hong Ma, Zhiyong Ao, Effect of modified flux on MIG arc brazing-fusion welding of aluminum alloy to steel butt joint, Journal of Materials Processing Technology 245 (2017) 115-121
- [19] Krishna P. Yagati, Ravi N. Bathe, Koteswara rao V. Rajulapatib, K. Bhanu Sankara Rao, G. Padmanabham, Fluxles arc weld-brazing of aluminium alloy Steel, Journal of Materials Processing Technology 214(2014) 2949-2959

- [20] Su, Yongchao, Xueming Hua, and Yixiong Wu, Quantitative characterization of porosity in Fe-Al dissimilar materials lap joint made by gas metal arc welding with different current modes, *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 81-86
- [21] 조상명, 공현상, 극성가변 AC펄스 MIG용접기를 이용한 아크브레이징, *Journal of KWS*, Vol, No. 4, August, (2003) 426-432
- [22] 김용, 박기영, 이경돈, 스틸과 알루미늄의 아크 이중접합, *대한용접·접합학회지* 28(5) 2010.10, 1-3
- [23] HanSur Bang, HeeSeon Bang, GeunHong Jeon, Ikhyun Oh and ChanSeung Ro, Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel, *Materials and Design*, 2012, Vol.37, pp48-55
- [24] 조상명, 김기정, 이병우, 아연도금강판에 대한 중첩펄스 MIG 용접에서의 파형제어와 기공 발생 특성, *Journal of KWS*, Vol. 23, No. 1, February, 2005 69-76
- [25] 김희진, 김남훈, 유희수, 고진현, (2003). [기술보고] 가스메탈아크용접에서 콘택트팁의 신뢰성, *대한용접·접합학회지*, 21(7), 9-17
- [26] Uwe REISGEN, Markus SCHLESER, Oleg MOKROV, Alexander ZABIROV, Virtual welding equipment for simulation of GMAW process with integration of power source regulation, *Frontiers of Materials Scienc*, 2011, Vol.5 No.2, pp79-89
- [27] 용접·접합 편람 3편 공정 및 열가공, *대한용접·접합학회*, pp46
- [28] Paul Kah, Hamidreza Latifi, Raimo Suoranta, Jukka Martikainen and Markku Pirinen, Usability of arc types in industrial welding, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering(online)*, 2014
- [29] Hyoung Jin Park, Sehun Rhee, Mun Jin Kang and Dong Cheol Kim, Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding, *MATERIALS TRANSACTIONS*, 2009, Vol.50 No.9, pp2314-2317

- [30] Degala Venkata Kiran, Jason Cheon, Nabeel Arif, Hyun Chung and Suck-Joo Na, Three-dimensional finite element modeling of pulsed AC gas metal arc welding process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, Vol.86 No.5, pp1453-1474
- [31] 조상명, 김태진, 이창주, 임성룡, 공현상, 김기정, 박판 AI MIG 용접용 AC 펄스 전류 파형의 설계 및 출력특성, 대한용접·접합학회지, 2003, Vol.21 No.2, pp187-193
- [32] Masao Ushio, Improve Sheet Metal Welding Quality & Productivity with AC Pulsed Welding System, IIW Doc, XII-1629-00
- [33] 김태진, MIG 아크용접에서의 교류중첩펄스를 이용한 용접성능향상, 조명·전기설비학회논문지, 2008, Vol.22 No.10,
- [34] Y. Kim, K. Y. Park and S. B. Kwak : Mechanical fastening and joining technologies to using multi mixed materials of car body, Journal of Welding and Joining, Vol.33 No.3(2015) pp12-18
- [35] 용접·접합 편람 1편 철강 및 비철재료, 대한용접·접합학회, pp305-308
- [36] Adeel Ikram and 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, 2017, Vol.7 No.3
- [37] Ali Mehrani Milani, Moslem Paidar, Alireza Khodabandeh and Saeed Nategh, Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding-brazing of automotive galvanized steel/5754 aluminum alloy in a lap joint configuration, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, Vol.82 No.9, pp1495-1506
- [38] Belinga Mvola and Paul Kah, Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, Vol.88 No.9, pp2369-2387

감사의 글

학위논문이 완성되기까지 많은 분들의 도움을 받았습니다. 이 자리를 빌어 감사의 인사를 드리고자 합니다. 2년간 대학원 생활을 하면서, 늘 초심을 잃지 않으려고 노력했지만 많이 부족했습니다. 제가 흔들릴 때마다 따끔한 충고로 채찍질 해주신 방한서 교수님께 감사드립니다. 교수님께 받은 가르침을 가슴에 새기고 엔지니어의 길을 걷도록 하겠습니다. 항상 아낌없는 조언과, 꼼꼼하게 저를 돌아주신 방희선 교수님께도 감사의 인사를 전합니다. 순탄하지 못했던 졸업과정 속에서, 매사 조급하고, 신중함이 부족했던 저에게 언제나 연구에 몰두 할 수 있도록 기회를 만들어주셨습니다. 학위논문이 모든 과정을 세세하게 검토해주신 덕분에 졸업을 할 수 있게 되었습니다. 정말 감사드립니다.

앞서 졸업한 우리 동기들에게 감사의 인사를 전합니다. 항상 든든하게 부장님 자리에 앉아 근엄한 자세로 우리를 돌아주신 재호형!, 형에게서 인생을 배웠습니다. 광주에 오셔서 고생 많이 하셨지만, 열심히 일하시는 모습 부럽고 보기 좋습니다. 가끔은 충동적이고 즉흥적이었던 우리 막내 승지, 조금만 더 차분하게 생각하고 행동하면 넌 완벽한 사람이 되는 거야, 형들 대접해주느라 고생했어. 나와 핸드폰 뒷자리가 똑같은 섹시가가이 우리 성민이, 넌 뭘 해도 될 놈이야. 늘 노력했던 모습 그대로 일본에서 열심히 하면 분명 좋은 결과 있을 거야, 같이 파이팅하자!, 누구보다 바쁘게 일하며 중간에서 조율하느라 고생 많이 한 우리 재용이, 부산으로 돌아가서도 열심히 노력하는 모습, 부럽다 임마! 너의 프로페셔널 한 자세는 동생이지만 본받고 싶을 때가 많았어, 꼭 성공해서 만나자. 그리고 많은 대학원생들 하나하나 다 챙겨주고 분위기 이끌어간 리더십 있는 나의 친구 종희야 정말 고맙다. 네 덕분에 대학원에 입학해서 많은걸 배웠어. 어깨가 무거운 텐데 우리까지 보살피느라 너무 고생했다. 앞으로 몸 관리 좀 잘하고 예전처럼 에너지 넘치는 모습 보여줘라 친구야. 벌써 4학기가 코앞인 성한아! 실험 도와주느라 매번 고생하고 너무 고맙다. 천천히 준비하되 마음만 먹으면 실험도 잘되고, 논문도 잘 써질 거야. 걱정하지 말고 늘 하던 대로 열심히 해! 파이팅해라. 무뚝뚝하고, 말

수 없는 우리 범수야! 형 도와주느라 많이 힘들었지? 내 부족한 모습을 너무 많이 보여줘서 미안하다. 형 노릇 하기가 쉽지 않더라고, 넌 항상 묵묵히 내가 해야 할 일 잘해나가는 타입 이니까, 네가 좋아하는 수치해석에 최선을 다해주길 바라, 마지막까지 너무 고맙다 범수야. 너무 어려서 말하기가 조심스러웠던 헤슬아! 넌 똑똑한 아이니깐, 어떤 어려운 일이든지 잘 해쳐나갈 수 있을 거라고 믿어. 힘내라.

대학원 입학 때부터 졸업까지 2년 6개월 동안 기다려준 사랑하는 나의 여자친구 설혜에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 힘든 일 있을 때 마다 든든하게 내 곁을 지켜주었고, 나태해진 나를 정신 바짝 차릴 수 있도록 삶의 원동력이 되어준 네 모습이 큰 힘이 되었어! 앞으로 내가 더 노력하고 행복하게 해줄게 사랑해.

끝으로, 저의 학부생활과 대학원 생활에 큰 버팀목이 되어 보살펴주신 사랑하는 우리 아버지, 어머니, 그리고 동생 지훈이에게 감사의 인사를 보내고자 합니다. 두 분의 따뜻하고 진심어린 가르침 덕분에 올바르게 자라 무사히 대학원 생활을 마칠 수 있었습니다. 아버지, 어머니의 든든한 큰 아들이자, 우리 지훈이의 형으로서, 늘 겸손하고 낮은 자세로 사회생활에 임하고자 합니다. 우리 가족 모두 감사하고 사랑합니다.

저를 아끼고 격려해 주셨던 모든 분들에게 진심으로 감사하다는 말씀을 드리며 이 논문을 바치고자 합니다. 감사합니다.

2019년 6월
최 솔 올림