



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2021년 2월

석사학위 논문

수치해석에 의한 이종재 알루미늄
합금과 용융아연도금강의 AC 펄스 MIG
용접부의 금속간화합물 예측

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

윤혜슬

수치해석에 의한 이종재 알루미늄
합금과 용융아연도금강의 AC 펄스 MIG
용접부의 금속간화합물 예측

Prediction of Intermetallic Compound in AC Pulse MIG
brazing Joints of Dissimilar Materials between
Aluminium Alloy and Galvanized Steel
by Numerical Analysis

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

윤혜슬

수치해석에 의한 이종재 알루미늄
합금과 용융아연도금강의 AC 펄스 MIG
용접부의 금속간화합물 예측

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

윤 혜 슬

윤혜슬의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 조교수 손윤철 (인)

위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)

위 원 조선대학교 조교수 박철호 (인)

2020년 11월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	V
Abstract	VI
1장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내·외 연구 동향	3
1.3 AC 펄스 MIG 용접 및 소재 특성	5
1.3.1 AC 펄스 MIG 용접의 특성	5
가. EN 비율에 따른 용접 특성	7
1.3.2 알루미늄 소재 특성	9
1.3.3 용융아연도금강 소재 특성	10
2장. 연구 방법	12
2.1 실험방법 및 용접조건	12
2.1.1 사용소재 및 용접법	12
2.1.2 용접장비 및 용접조건	15
2.1.3 용접부 특성 평가 방법	18
2.2 Al6061-T6/GI steel의 AC Pulse MIG 용접부의 금속간화합물 수치해석	20

2.2.1 3차원 열전도 이론	20
가. 비정상 열전도의 유한요소 해석 이론	20
나. 금속간화합물 예측 이론	23
2.2.2 입열 방정식	24
2.2.3 해석모델 및 조건	25
3장 . 연구 결과	27
3.1 용접공정변수에 따른 용접 특성	27
3.1.1 와이어 위치의 영향	27
3.1.2 전류별 EN 비율의 영향	30
가. 용접부 비드 특성	30
나. 인장-전단강도 특성	34
3.1.3 금속간화합물 두께 및 EDS 분석	36
가. 금속간화합물 두께	36
나. EDS 분석	38
3.2 수치해석에 의한 용접부 금속간화합물 예측	40
3.2.1 온도분포	40
3.2.2 금속간화합물 예측	43
4장 . 결론	46
참고문헌	47

List of Figures

Fig. 1.1 Globally, The goal for the CO2 emission regulation	2
Fig. 1.2 The trend of the Aluminium usage for the weight reduction of vehicles in North America	2
Fig. 1.3 Schematic illustration of AC pulse MIG current waveform	6
Fig. 1.4 Relationship between wire melting rate and welding current with respect to EN ratio	8
Fig. 1.5 Comparison schematics of GMAW polarity	8
Fig. 2.1 Schematic of Al6061-T6 and GI Steel welded joints specimen	14
Fig. 2.2 AC pulse MIG welding machine and 6 axis welding robot	16
Fig. 2.3 Schematic of wire positions	16
Fig. 2.4 Schematic of wetting angle and wetting length	18
Fig. 2.5 Schematic of tensile-shear test specimen	19
Fig. 2.6 Temperature measurement position of welded joints by k-type thermocouple	19
Fig. 2.7 Temperature depending of material properties of Al alloy	25
Fig. 2.8 Temperature depending of material properties of GI steel	26
Fig. 2.9 Configuration and mesh division of FE analysis model	26
Fig. 3.1.1 Bead appearance in welded joints for various wire positions	28
Fig. 3.1.2 Leg length and tensile-shear load in welded joints for various wire positions	29
Fig. 3.2.2 Wetting length and Wetting angle of welded joints with EN ratio for various currents	32
Fig. 3.2.3 Welded specimen fractured after tensile-shear load test	34
Fig. 3.2.4 Tensile-shear load of welded joints with EN ratio for various currents	35
Fig. 3.3.1 Thickness of IMC of welded joints for various currents in EN ratio 0%	36

Fig. 3.3.2 Thickness of IMC of welded joints for various EN ratios in 70 A current 37
 Fig. 3.3.3 EDS analysis of IMC of welded joints for various currents in EN ratio 0% 39
 Fig. 3.3.4 EDS analysis of IMC of welded joints for various EN ratios in 70A current 39
 Fig. 3.9.1 Temperature distribution of welded joints for various currents 41
 Fig. 3.9.2 Temperature distribution of cross section of welded joints for various currents 42
 Fig. 3.9.3 Comparison of temperature histories in welded joints between numerical analysis and measurement 43
 Fig. 3.9.4 Comparison of IMC layer thickness between numerical analysis and measurement 45

List of Table

Table. 1.1 Characteristics and classification of aluminium alloy	10
Table. 1.2 Classification of zinc coated steel sheet	11
Table. 2.1 The chemical composition of Al6061-T6 (Wt%)	13
Table. 2.2 The chemical composition of GI steel (Wt%)	13
Table. 2.3 The chemical composition of ER4047 (Wt%)	13
Table. 2.4 Mechanical properties of base materials	13
Table. 2.5 Welding condition of Al6061-T6 and GI Steel	17
Table. 3.1.1 Cross section, leg length and wetting length in welded joints for various wire positions	29
Table. 3.2.1 Bead appearance of welded joints with current for various EN ratio	30
Table. 3.2.1 Cross section of welded joints with EN ratio for various currents	31
Table. 3.2.2 Root part of welded joints with EN ratio for various current by EN ratio	33
Table. 3.3.1 Element content and possible phase of welded joints for various currents in EN ratio 0%	39
Table. 3.3.2 Element content and possible phase of welded joints for various EN ratios in 70 A current	39
Table. 3.6 Thickness of intermetallic compound in welded joints	44

ABSTRACT

Prediction of Intermetallic Compound in AC Pulse MIG Joints of Dissimilar Materials between Aluminium Alloy and Galvanized Steel by Numerical Analysis

Yoon Hye Seul

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

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

This study, intended to investigate the weldability and intermetallic compound production in Al6061-T6 and Gavanized steel welded joint by AC pulse MIG welding according to welding process parameters such as wire position, current and EN ratio.

The results showed that as EN ratio increased, the amount of metal deposition increased as well, and a stable bead was formed. Moreover the wetting length of 6.6 ~ 8.4 mm, and the size of the wetting angle increased 31.2° ~ 67.6°. In addition, it was found that the highest tensile-shear load of 8.8kN with current 70A and 20% EN ratio. From the results of numerical analysis, the thickness of IMC was approximately 1.4 ~ 3.39 μm at current 50 ~ 70A. And the thickness measured to approximately 0.8 ~ 2.6 μm .

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

자동차 산업의 환경 변화로 인해 CO2 배출가스 규제가 엄격해짐에 따라서 연비 효율 향상이 필요한데, 연비 효율 향상을 위한 방안으로 경량 소재 사용이 있다. Al만으로 접합을 하게 되면 경제성이나 여러 가지 문제로 인해 Al과 Steel간의 용접이 불가피하게 필요하다. 이종재 Al 합금과 Steel 접합 시 문제점은 취성적인 금속간화합물($FeAl_2$, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$) 생성으로 이는 강도를 저하시키기 때문에 최소화 시켜야한다. 따라서 최소화 시키기 위해 저입열 공정이 필요한데, 이를 위한 공정인 AC 펄스 MIG를 적용하여 이종소재 알루미늄 합금과 용융아연도금강의 용접 기술 개발을 연구하고자 하였다.

저입열 공정인 AC 펄스 MIG 용접을 사용하면 DC 펄스 MIG 용접보다 금속간화합물의 형성을 줄일 수 있다. AC 펄스 MIG 용접은 주파수에 따라 극성이 바뀌기 때문에 역극성 특성과 정극성 특성이 반복된다. 그러므로 역극성과 정극성의 시간을 변화시키면서 극성에 따라 모재와 용접봉에 발생하는 입열량을 제어하면서 산화막을 제거하는 청정효과도 얻을 수 있다. 아울러 저입열을 통해 금속간화합물의 생성을 적게 시킬 수 있다는 장점이 있다. [1]

따라서 본 연구에서는 AC 펄스 MIG 용접을 이용하여 알루미늄 합금과 용융아연도금강의 겹침 이음부에 대한 용접공정변수의 입열량에 따른 용접성 및 금속간화합물의 특성을 고찰하고자 하였다. 이를 위해 먼저 실험을 통해 용접부 비드 특성과 인장-전단강도와 아울러 금속간화합물 생성 특성도 고찰하였다. 또한, 수치해석을 통해 용접부에 대한 금속간화합물을 예측함으로써 입열량과 금속간화합물의 관계에 대해 규명하였다.

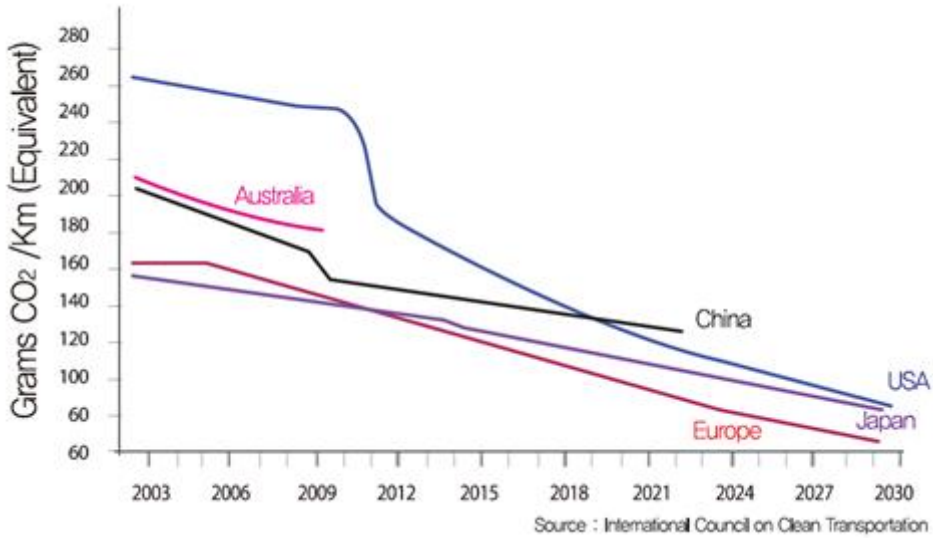


Fig. 1.1 Globally, The goal for the CO₂ emission regulation

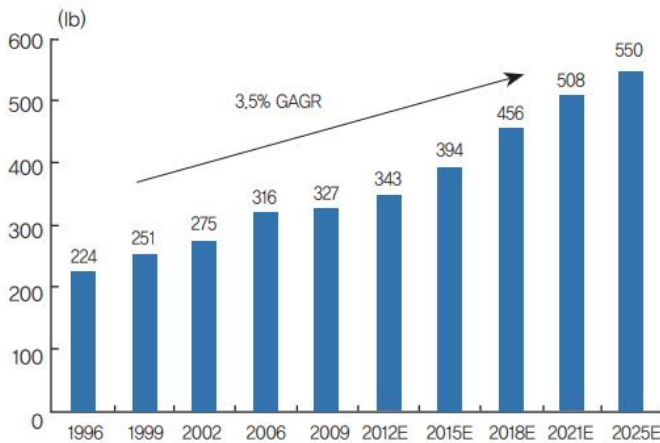


Fig. 1.2 The trend of the Aluminium usage for the weight reduction of vehicles in North America

1.2 국내·외 연구 동향

현재 알루미늄 합금과 용융아연도금강 간의 용접에 대한 저입열 공정인 마찰교반용접(Friction Stir Welding; FSW), 초음파 용접, AC pulse MIG 용접 등을 적용한 연구가 진행되고 있다. 이종재 접합 시 생성되는 금속간화합물의 성질 중 취성적인 역할을 억제하기 위한 연구가 진행되고 있으며, H.T. Zhang 등은 저입열과 고입열의 조건에서 알루미늄과 아연도금강판의 접합 후 인장-전단강도와 금속간화합물의 성장에 대해 비교하였으며 입열량과 금속간화합물의 관계에 대해 규명하였다.[2]

L. Shao 등은 금속간화합물의 형성은 온도와 시간의 함수로 입열량에 따라 성장한다고 하였으며, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$ 로 구성되어있다고 말한다. Krishna P. Yagati 등은 Fe-Al계의 금속간화합물 형성이 접합부에 취성적이며, 두께는 $10\mu m$ 이하로 되어야한다고 주장한다.[3][4]

조상명 등은 AC 펄스 MIG 용접을 이용한 브레이징 시 EN 비율에 따른 접합 특성을 연구하였으며, EN 비율이 증가할수록 모재에 입열이 줄어들어 변형이 적어지고, EN 비율이 40%에서도 안정된 비드가 형성되었으며 용락이 일어나지 않고 아연도금 층의 손상도 적게 일어났다. 공현상 등은 알루미늄 박판을 AC 펄스 MIG를 적용할 때 갭(Gap)을 1.5mm를 주고 EN 비율을 40% 주었을 때 용락이 발생하지 않아 양호한 용접부를 얻었다.[5][6]

아연도금 층의 손상으로 인한 발생하는 문제로는 아연(Zn) 증기가 빠져나가지 못하고 비드와 루트부에 잔류하여 기공이 생성되는 것을 볼 수 있다. Shanglu Yang 등은 시편 사이에 갭(Gap)을 주어 아연(Zn) 증기가 빠져나갈 수 있는 통로를 만들어 주면 기공의 생성량이 줄어들며, 인장강도 또한 증가한다고 주장한다.[7]

배재용은 AC 펄스 MIG 브레이징을 이용하여 알루미늄 합금과 스테인레스강의 용접성을 평가하였다. 이처럼 실험적인 연구는 활발하게 이루어지고 있으나, 수치해

석을 통한 연구는 Marcin Kubiak등과 A. Das등의 연구가 있지만 EN 비율 즉, 입열량과 금속간화합물의 관계에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있다.[8][9][10]

1.3 AC 펄스 MIG 용접 및 소재 특성

1.3.1 AC 펄스 MIG 용접의 특성

MIG 용접은 대부분 직류 역극성(DCEP)를 사용하는데 AC 펄스 MIG 용접은 극성이 주기적으로 EP와 EN이 교차하며 바뀌는데 알루미늄을 용접할 때 보호가스를 Ar 가스를 사용하면 청정효과가 일어난다.[26]

역극성에서 청정효과가 일어나는 이유는 모재의 극성이 (-)이기에 이때 아크가 일어나면 전자가 산화막과 반응을 하게 되고 아크가 산화막에 집중이 되어 산화피막을 파괴하게 된다.[27]

와이어의 극성이 주기적으로 반복하며 와이어가 (+)이고, 모재가 (-)일 때 전자가 모재에서 와이어로 이동을 하여 열을 발생시켜 와이어의 용융이 많이 일어나며, 반대로 와이어가 (-)이고, 모재가 (+)일 때 전자가 와이어에서 모재로 열을 발생시켜 모재에 입열이 많이 발생하게 되어 깊은 용입을 얻을 수 있다.

AC 펄스 MIG 용접 시 펄스와 펄스 사이에 용융 풀이 안정이 되어 가스의 자연방출이 일어나기 쉬워 용접 기공의 감소가 일어난다.

AC 펄스 MIG 용접은 DCEP 극성과 DCEN 극성을 두 구간을 주기적으로 반복을 하며, EN 극성 비율에 따라 DCEP 극성과 DCEN 극성의 각각의 장점을 효과적으로 동시에 얻을 수 있는 용접방법이다.[28]

다음으로 Fig. 1.3은 AC 펄스 MIG 용접의 전류 파형을 나타내며 AC 펄스 MIG 용접의 전류파 형은 식 (1.1) 과와 같이 EN 극성 비율로 표현된다. 여기서, I_{EP} 는 EP 구간의 평균 전류(A), I_{EN} 는 EN 구간의 평균 전류(A), T_{EP} 는 EP 구간의 시간(sec), T_{EN} 는 EN 구간의 시간(sec)을 나타낸다.[28]

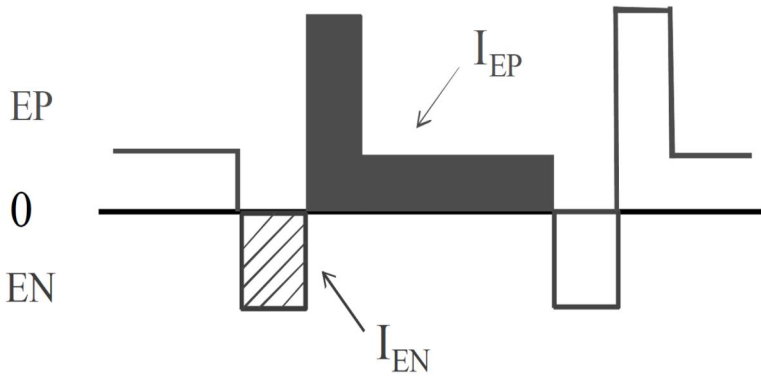


Fig. 1.3 Schematic illustration of AC pulse MIG current waveform

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

I_{EP} : EP 구간의 평균전류 (A)

I_{EN} : EN 구간의 평균전류 (A)

T_{EP} : EP 구간의 시간 (sec)

T_{EN} : EN 구간의 시간 (sec)

가. EN 비율에 따른 AC 펄스 MIG 용접의 특성

Fig. 1.4는 EN 비율이 증가할수록 용접전류와 와이어가 용해율에 대한 관계를 그래프로 나타내었다. 와이어 용융 속도가 높아지고, 일정한 와이어를 용융시키는 데 필요한 용접전류도 증가하는 것을 볼 수 있다.[11]

EN 극성비에 따라 와이어의 용융 속도가 달라지며, EN 구간에서 용적은 균일하고 용적 위에서 음극점이 형성되어 아크열이 와이어를 녹이는 데 효과적으로 사용되면 와이어의 용융 속도가 빠르다. EP 구간에서 아크는 용적 아랫부분에 집중되어 용적 아랫부분이 과열되고 그 결과 아크열이 와이어를 용융시키는 데 효과적으로 사용되지 못하여 와이어의 용융 속도가 느리다.[6]

EN 비율이 증가함에 따라 실제로 사용이 되는 용접전류는 낮아지고, 비드 폭도 감소하게 되어 비드의 높이는 증가하게 된다. 용착량이 증가할수록 고속 용접이 가능하게 되어 EN 비율이 증가에 따라 와이어 송급속도는 올라가고 용접전류는 감소하여 낮은 입열을 얻을 수 있다.

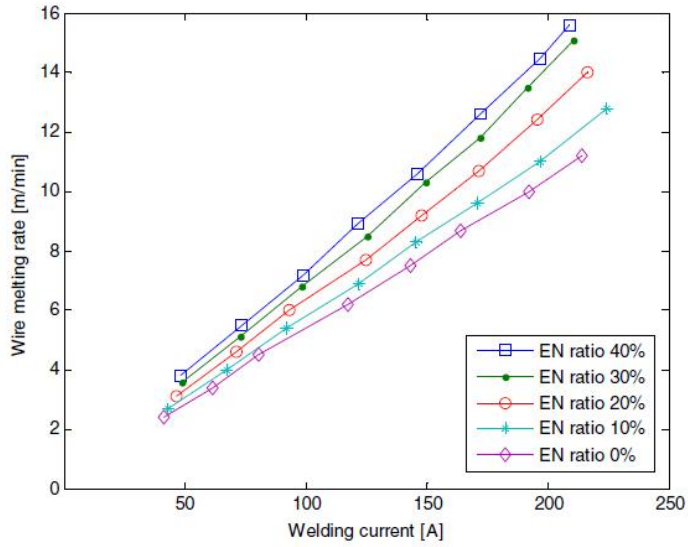


Fig. 1.4 Relationship between wire melting rate and welding current with respect to EN ratio

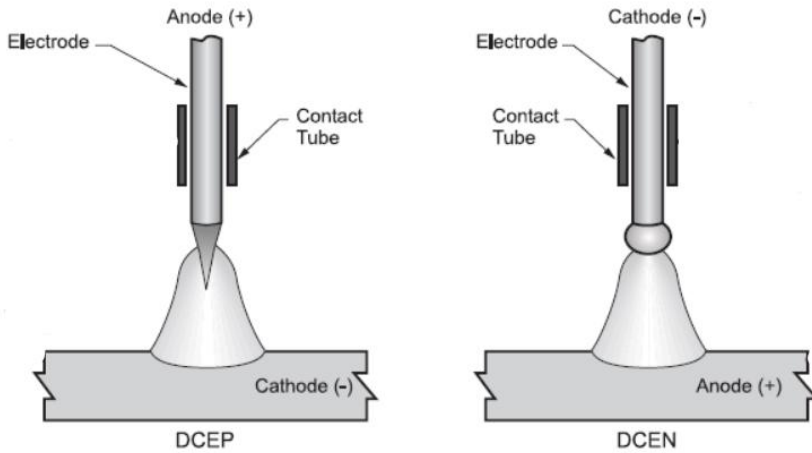


Fig. 1.5 Comparison schematics of GMAW polarity

1.3.2 알루미늄 소재 특성

알루미늄(Al) 합금은 일반 공업용 차량, 건축, 조선 등 많은 분야에 널리 사용이 되고 있다. 열처리하여 사용하는 열처리 합금과 열처리를 하지 않은 비열처리 합금으로 나뉜다.[23][24]

알루미늄은 표면에 산소와 반응하여 산화피막을 형성하게 되고 이 산화피막이 더 이상의 산소와 알루미늄의 반응을 억제하며, 산화피막이 있어 표면을 보호해 내식성은 우수하나 이온화 경향이 커서 부식 환경에서는 부식이 쉽게 일어난다. 알루미늄은 재활용성이 우수하여 알루미늄 합금 약 85% 이상이 재활용이 가능한 것으로 알려져 있다.

알루미늄의 무게는 강에 비해 1/3 수준의 무게이며, 열전도도는 강의 4~5배가 되어 국부가열이 곤란하다. 선팅창계수는 강의 약 2배 정도로 높아 용접 후 냉각 시 구조물의 변형을 일으키며, 용접균열 발생의 원인이 되기도 한다.

본 연구에 사용된 소재 Al6061-T6는 고용화 처리 후 인공시효가 이루어진 열처리 합금으로 성형 가공성, 강도, 내식성이 우수하며, 양호한 용접성을 가지고 있어 구조물에 널리 적용이 이루어지고 있다. 하지만 열처리가 된 합금으로써 다시 용접열에 의해 연화되는 단점을 가지고 있다.

Table. 1.1 Characteristics and classification of aluminium alloy

구분	합금명	특성
비열처리형 (고용 경화)	1XXX(pure Al)	내식성, 도전성, 성형가공성 우수
	3XXX(Al-Mn계)	용접성, 내식성, 성형가공성 우수
	4XXX(Al-Si계)	내마모성, 내열성
	5XXX(Al-Mg계)	용접성 양호, 내식성 우수
열처리형 (석출 경화)	2XXX(Al-Cu-Mg계)	기계적 성질, 절삭성 우수, 고강도
	6XXX(Al-Mg-Si계)	용접성, 내식성 양호
	7XXX(Al-Zn-Mg계)	용접성 우수, 고강도

1.3.3 용융아연도금강 소재의 특징

아연도금강판(Zinc coated steel sheet)은 아연을 도금한 강판을 말하는 것으로 용융아연도금강판(Hot dipped galvanized-Iron)과 전기아연도금강판(Electrolytic galvanized-Iron)으로 나뉜다. Table. 1.2에서 나타내었다.


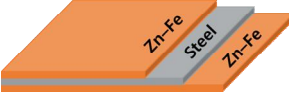
용융아연도금강은 표면처리 강으로 아연도금계인 Galvanized steel (GI steel), 용융아연을 도금한 후 열처리에 의해 Fe-Zn 합금을 형성시키는 Galvannealed Steel (GA steel)으로 나뉜다. Table. 1.2에서 GI steel과 GA steel의 특징을 나타내었

다. 성형성이 좋고 부식 방지 관련 수명이 길며, 양호한 용접성 및 인발 가공성을 갖고 있기 때문에 경량의 고강도 철강재를 사용하는 차량 모델에 적합하다.

GI steel은 내식성과 내구성이 우수하며, 도장성은 열처리한 GA steel보다는 떨어진다. GI Steel을 GMAW에 적용시키면, 차체와 배기계용 부품과 연료탱크에 적용이 가능하다.

일반 강의 용접 후 부식성에 대한 우려를 아연도금을 함으로써 부식을 방지하는데 효과적이다. 아연도금강의 부식되는 순서는 먼저 도금된 아연(Zn)이 부식이 되고, 그다음으로 철(Fe)이 부식되는 원리이다. 이로써 높은 내식성과 부식 방지 효과가 우수하여 자동차 산업에 많이 쓰이고 있다.

Table. 1.2 Classification of zinc coated steel sheet

분류	도금층 구조	특징	용도
GI (Galvanized steel)		판 표면에서 용융상태의 아연이 응고하는 동안, 아연 결정의 성장을 억제시켜 미세한 결정립이 형성되고 표면이 균일	건축자재 자동차 내·외판 금속가구 가전제품 내·외판
GA (Galvannealed steel)		스틸과 아연이 열에 의해 확산하여 합금화된 도금층이 형성되어 도장성이 우수하고 합금층에 의해 내식성이 우수함	자동차 내·외판 가전제품 내·외판

제 2 장 연구 방법

2.1 실험방법 및 용접조건

2.1.1 사용소재 및 용접법

본 연구에서는 이종재 알루미늄 합금과 용융아연도금강을 AC 펄스 MIG 용접을 사용하여 겹침 이음 용접 시 각 전류별 EN 비율에 따른 용접부 비드 특성과 인장-전단강도와 아울러 금속간화합물 생성 특성도 고찰하고자 하였다.

연구에 사용한 판재는 열처리형 알루미늄 합금인 Al6061-T6(두께 : 2 mm)와 아연도금이 된 용융아연도금강 GI steel(두께 : 2 mm)로, 실험에 사용한 재료의 화학적 조성은 Table. 2.1과 Table. 2.2에, 기계적 물성은 Table. 2.1에 각각 나타내었다. 또한 AC 펄스 MIG 용접 시 사용된 와이어는 용접성을 좋게 해주는 즉, 젖음성을 높여주는 Si 성분 함량이 높은 ER4047 와이어를 사용하였으며, 실험에 사용된 와이어의 화학적 조성은 Table. 2.3에 나타내었다.[29]

실험에 사용된 시험편은 Al6061-T6와 GI steel의 제원은 모두 길이 (L)=200 mm, 폭(W)=100 mm, 두께(t)=2 mm이다.

Fig.2.4에 나타낸 모식도와 같이 용접 진행은 상판을 Al6061-T6로, 하판은 GI steel로 20 mm 겹쳐 AC 펄스 MIG 용접을 실시하였다.

Table. 2.1 The chemical composition of Al6061-T6 (Wt%)

Composition	Al	Fe	Si	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Cr
Al6061-T6	Bal.	0.7	0.4 ~0.8	0.15	0.8 ~1.2	0.15 ~0.4	0.25	0.15	0.04 ~0.35

Table. 2.2 The chemical composition of GI steel (Wt%)

Composition	Fe	Mn	C	Si	Ti	P	S
GI steel	Bal.	0.18	0.032	0.02	0.001	0.014	0.005

Table. 2.3 The chemical composition of ER4047 (Wt%)

Composition	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be
ER4047	Bal.	11 ~13	0.8	0.3	0.15	0.1	0.2	0.0003

Table. 2.4 Mechanical properties of base materials

Mechanical properties	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
Al6061-T6	331	301	10
GI steel	371	282	39

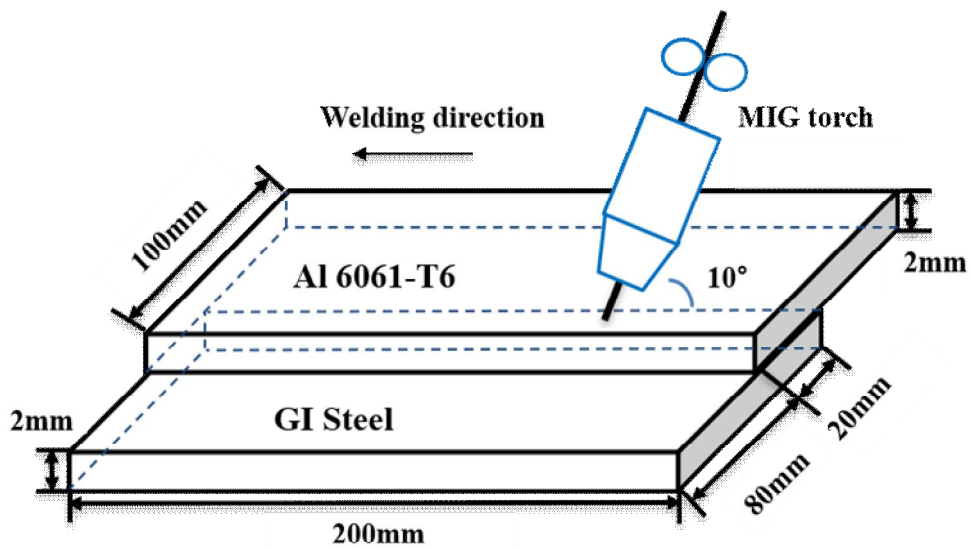


Fig. 2.1 Schematic of Al6061-T6 and GI Steel welded joints specimen

2.1.2 용접장비 및 용접조건

본 연구에서 사용된 AC 펄스 MIG 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. 2.5에 나타난 OTC社의 FD-V6을 사용하였다. FD-V6의 주요 사양은 최대 허용 기반 하중 6 kg의 수직다관절형 6축 로봇이다.

AC 펄스 MIG 용접으로 겹침 이음 용접을 하기 위한 용접공정변수로는 용접전류, 용접전압, EN 비율, 이송 속도, CTWD, 토치 각도, 보호가스 및 보호가스 유량, 와이어 위치 등이 있다.

본 연구에서는 Al6061-T6와 GI steel의 겹침 부 20 mm 겹침 이음 용접으로 갭 (Gap) 없이 진행하였으며, 이송 속도 8.33 mm/sec, 토치 각도(측면각 10°, 전진각 10°) 보호가스로는 Ar 가스를 사용하였으며, 보호가스의 유량 18 ℓ/min, CTWD는 15 mm로 고정하여 실험을 실시하였다.

특히, AC 펄스 MIG 용접 시 EN 비율의 증가함에 따라 전류가 일정할 때 용착금속량은 증가하지만, 입열량은 줄어들어 이종재 용접 시 시간에 따라서 온도변화로 인해 생성되는 금속간화합물(IMC)의 두께를 감소시킬 수 있기 때문에 주안점으로 전류별 EN 비율에 따른 즉, 입열량에 따른 비드 형성과 금속간화합물간의 상관관계를 고찰하고자 하였다.

먼저 와이어 위치를 선정하기 위해 전류 70A로 고정 후 와이어 위치를 Steel 측으로 1 mm 그리고 Steel과 Al 중앙, Al 측으로 1 mm, 2 mm 오프셋 한 경우 총 4가지 경우에 대해 적합한 용접 가능 와이어 위치를 고찰하였다. Fig. 2.3에서 와이어 위치 조건 선정에 대한 모식도를 나타내었다. 자세한 용접 조건은 Table. 2.5에 나타내었다.



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

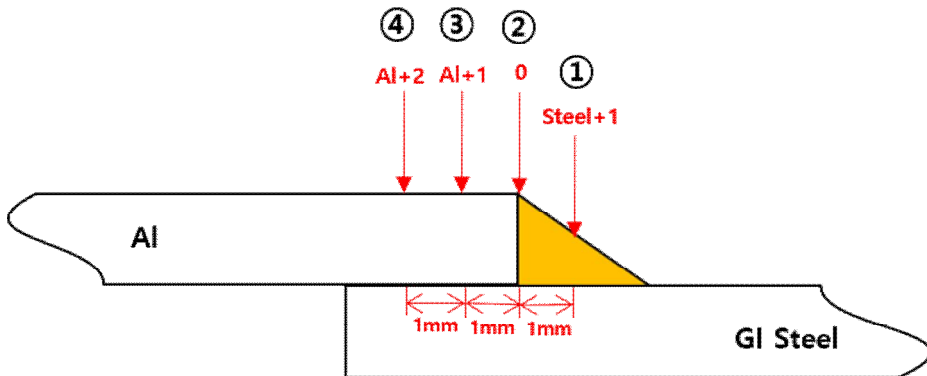


Fig. 2.3 Schematic of wire positions

Table. 2.5 Welding condition of Al6061-T6 and GI Steel

Electrode type	ER 4047
Type of joint	Lap Joint
Overlapping length (mm)	20
Welding process	AC Pulse MIG
Electrode diameter (mm)	1.2
Travel speed (mm/sec)	8.33
Torch angle (degree)	10
Gap (mm)	0
Shielding gas	Ar 99.9%
Shielding gas flow rate (ℓ/min)	18
Contact tip to work distance (mm)	15
EN ratio(%)	0, 10, 20
Current (A)	50, 60, 70
Electrode wire position (mm)	Steel 측 1 mm, Steel/Al 측 중앙, Al 측 1 mm, Al 측 2 mm

2.1.3 용접부 특성 평가 방법

(1) 용접부 외관 및 단면 분석

Al6061-T6와 GI steel의 겹침 이음 용접 시 도출된 최적의 와이어 위치로 용접전류(50 A, 60 A, 70 A) 별 EN 비율을 0%, 10%, 20%로 변화에 따른 용접부 외관 및 단면을 분석하였다. 이때 주안점으로 젖음길이(Wetting length)와 젖음각(Wetting angle), 루트부의 결함 유무 여부 관점에서 용접성을 평가하였다. 젖음길이와 젖음각 측정 방법에 대한 모식도를 Fig. 2.4에 나타내었다.

용접부 비드를 관찰하기 위해 용접부를 절단하여, Hot mounting, Polishing을 실시하였다. Hot mounting을 한 후 Sand paper를 사용하여 #400~#4000 순서로 Polishing하였으며, 아울러 세밀한 연마를 위하여 Diamond paste 9 μ m, 3 μ m, 1 μ m를 이용하여 미세연마를 실시하였다.

또한, Al6061-T6와 GI steel 계면의 금속간화합물의 두께를 측정하기 위하여 SEM-EDS 분석을 실시하였다. SEM-EDS 분석은 Hitachi社의 S-4800 Scanning Electron Microscope(SEM), Energy Dispersive Spectroscopy(EDS)를 이용하였다.

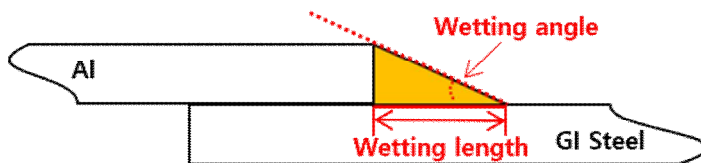


Fig. 2.4 Schematic of wetting angle and wetting length

(2) 인장-전단강도 시험

인장-전단강도를 평가하기 위해 각 조건별 3개씩 시험을 실시하고 평균값을 도출하였으며, 사용된 실험장비는 Shimadzu社의 만능재료시험기(UTM, Universal Testing Machine)를 사용하였다. 물림부는 40mm로 하였고, 인장-전단시험의 속도는 1 mm/min으로 진행하였으며, 시험편 규격은 Fig. 2.5에 나타내었다.

(3) 용접부 온도 측정

금속간화합물이 생성되는 용접계면에서의 온도이력을 측정하기 위해 K-type 열전대(Thermocouple)를 사용하여 온도 측정을 하였다. 열전대의 위치는 Steel의 용접계면을 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 2.6에 나타내었다.

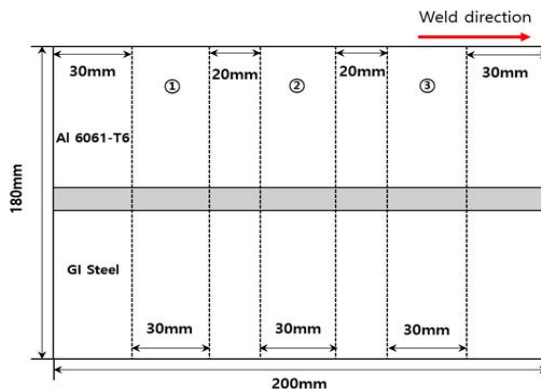


Fig. 2.5 Schematic of tensile-shear test specimen

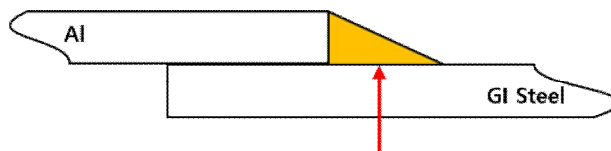


Fig. 2.6 Temperature measurement position of welded joints by k-type thermocouple

2.2 Al6061-T6/GI steel의 AC Pulse MIG 용접부의 금속간화합물 수치해석

2.2.1 3차원 열전도 이론

가. 비정상 열전도의 유한요소 해석 이론

재료가 등방성(Isotropic)일 때, 연속체의 3차원 비정상 열전도의 지배방정식(Governing equation)은 아래의 식과 같이 서술할 수 있다.[12][13]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (2.1)$$

이 식(2.1)을 3차원 직교좌표계로 기술하면 다음 식과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (2.2)$$

T : 온도 ($^{\circ}\text{C}$), c : 비열 ($\text{cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$), ρ : 밀도 (g/cm^3), t : 시간 (sec)

α : 열전도율 ($\text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$), \dot{Q} : 단위 시간 당 입열량 (cal/sec)

식 (2.2)를 Galerkin method로 적용하여 유한요소법을 정식화하기 위해 해석모델을 유한개의 요소로 분할하고, 한 요소 내의 온도분포는 아래와 같이 표현하였다.

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{ \phi(t) \} \quad (2.3)$$

T : 요소의 온도

$[N]$: 절점의 온도와 요소 내의 온도를 연결하는 형상함수 Matrix

ϕ : 시간 t 에 대한 요소의 절점 온도 Vector

식 (2.2)에 형상함수 $[N]$ 을 가중(Weighting)함수로 하여 Galerkin method을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_v [N]^T \left\{ \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dv = 0 \quad (2.4)$$

식 (2.4)에서 v 는 요소의 영역을 나타내며, 뒀 첨자 T 는 전치행렬을 나타낸다.

이 식을 Green-Gauss 정리를 이용하여 식을 전개하면 다음 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} & \int_v [N]^T \left\{ \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right\} dv = \\ & - \int_v \alpha \left\{ \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} dv \\ & + \int_s \alpha [N]^T \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) ds \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기서 s : 요소의 경계이다.

식 (2.5)를 물체 표면의 열적 경계조건을 Fourier법칙으로 정리한 식

$q = -\alpha \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -\frac{\partial T}{\partial n}$ 과 열전달의 식 $q = \alpha_c (T - T_c)$ 으로 정리하면 다음

과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned}
 & - \int_v \alpha \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dv \cdot \{\phi(t)\} \\
 & - \int_s \alpha_c [N]^T [N] ds \cdot \{\phi(t)\} + \int_s \alpha_c T_c [N]^T ds \\
 & + \int_v \dot{Q} [N]^T dv - \int_v \rho c [N]^T [N] dv \cdot \frac{\partial \{\phi(t)\}}{\partial t} = 0
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

위 식(2.6)에 3차원 비정상 열전도 식을 Matrix화 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K]\{\phi\} + [C]\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\} = \{F\} \tag{2.7}$$

$[K]$: 열전도 Matrix, $[C]$: 열용량 Matrix, $\{F\}$: 열유속 Vector

$$\begin{aligned}
 [K] &= \int_v \alpha \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dv \{\phi\} \\
 &+ \int_s \alpha [N]^T [N] ds \{\phi\}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

$$[C] = \int_v \rho c [N]^T [N] dv \tag{2.9}$$

$$\{F\} = \int_s \alpha_c T_c [N]^T ds + \int_v \dot{Q} [N]^T dv \tag{2.10}$$

식 (2.7)에는 ϕ , $\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\}$ 두 개의 미지수가 존재하여 풀이할 수가 없다.

시간 증분을 Δt 라하고 증분 전의 온도를 ϕ^B , 증분 후의 온도를 ϕ^A 그리고 그 중간의 온도를 ϕ^M 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi^A}{\partial t} = \frac{\phi^A - \phi^M}{(\Delta t/2)}, \quad \frac{\partial \phi^B}{\partial t} = \frac{\phi^M - \phi^B}{(\Delta t/2)} \tag{2.11}$$

식 (2.11)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi^A}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t}(\phi^A - \phi^B) - \frac{\partial \phi^B}{\partial t} \quad (2.12)$$

따라서 식(2.7)은 최종적으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta t}[C] \right) \{ \phi^A \} = [C] \left(\frac{2}{\Delta t} \{ \phi^B \} + \left\{ \frac{\partial \phi^B}{\partial t} \right\} \right) + \{ F \} \quad (2.13)$$

Δt : 시간증분, ϕ^B : 증분 전의 절점 온도, ϕ^A : 증분 후의 절점온도

$[K]$: 열전도 Matrix, $[C]$: 열용량 Matrix, $\{F\}$: 열 유속 Vector

나. 금속간화합물 예측 이론

이종 소재 간 접합이 이루어졌을 때 금속간화합물(Intermetallic Compound; IMC)의 생성되고, 이 금속간화합물은 원래의 기계적 성질을 변화시키고 소재에 따라 기계적 성질이 더 좋아지거나 나빠질 수 있다. Al 6061-T6와 GI steel의 금속간화합물은 Zn 도금이 되어 금속간화합물이 Al과 Zn의 화합물이 아닌 Al과 Fe의 화합물인 Fe/Al계의 금속간화합물이 생성된다. Fe/Al계의 IMC는 용접부의 취성을 일으키는 성질을 가지고 있어 금속간화합물의 양을 수치해석을 통해 미리 예측하고자 하였다.

금속간화합물은 시간에 따른 온도변화로 성장하기 때문에 아래 금속간화합물 예측 수식을 나타내었다.[14][15]

$$\lambda = \sqrt{kt} = \sqrt{k_0 \exp\left(-\frac{q}{RT}\right)t} \quad (2.14)$$

$$\lambda_n^2 = \lambda_{n-1}^2 + k_0 \cdot \exp\left[-\frac{q}{R\left(\frac{T_0 + T_1}{2}\right)}\right] \cdot (t_n - t_{n-1}) \quad (2.15)$$

$$\lambda_n = \sqrt{\lambda_{n-1}^2 + k_0 \cdot \exp\left[-\frac{q}{R\left(\frac{T_n + T_{n-1}}{2}\right)}\right] \cdot (t_n - t_{n-1})} \quad (2.16)$$

k_0 : 빈도인자(Preexponential factor, $1.32 \cdot 10^2 m^2/s$),

q : 용해열 ($190 \sim 240 kJ/mol$), R : 기체상수 ($8.314 J/molK$),

$t_n - t_{n-1}$: 시간 차이, $\frac{T_n + T_{n-1}}{2}$: 평균 온도

단위는 길이 단위 m이며, 금속간화합물은 식 (2.16)에 따라 성장을 예측할 수 있다.

2.2.2 입열 방정식

용접에서 입열은 중요한 인자이다. 따라서 유한요소 해석 중 입열량 계산은 중요한 요소이다. 식 (2.17)에서 요소의 표면으로 적용되는 가우시안 열원 분포 (Gaussian Heat Flux)을 나타낸 것이다.[16]

$$q_{surface} = \frac{dQ}{\pi r_{eff}^2} \exp\left(-d \frac{r^2}{r_{eff}^2}\right) \quad (2.17)$$

d : 에너지 분포 계수, r_{eff} : 아크 중심으로부터의 유효반경, r : 아크 반경 (mm)

2.2.3 해석모델 및 조건

본 연구에서는 이종재 Al6061-T6와 GI steel의 3차원 열전도 수치해석을 ANSYS Mechanical Product Launcher를 사용하여 실시하였다. 수치해석의 모델의 크기는 실제 시험편과 동일한 크기인 100 mm(W) × 200 mm(L) × 2 mm(t)로 모델링을 하였다.

용접 아크의 이송 속도에 따른 열원의 이동 효과를 고려하였고, 시간에 따라 온도가 변화하므로 온도 구간에 따른 비열, 밀도, 열전도율 등을 고려하였다. 수치해석에 사용된 물성치는 Fig 2.7과 Fig 2.8와 같으며, 모델링 형상과 요소분할 형상은 Fig 2.9에 나타내었다. 해석에 이용된 요소는 8Node Iso-parametric 요소로 총 요소의 수는 223,500개, 요소의 절점수는 242,905개이며 온도변화가 큰 용접부의 경우보다 더 세밀하게 요소분할을 하였다. 열적 경계조건으로 convection을 초기온도를 상온으로 300K으로 고려하였다. 금속간화합물의 두께는 용접면의 온도 이력을 추출하여 예측하였으며, 아울러 열전대를 이용하여 실측한 값과 비교함으로써 수치해석 값에 대한 타당성을 검증하였다.

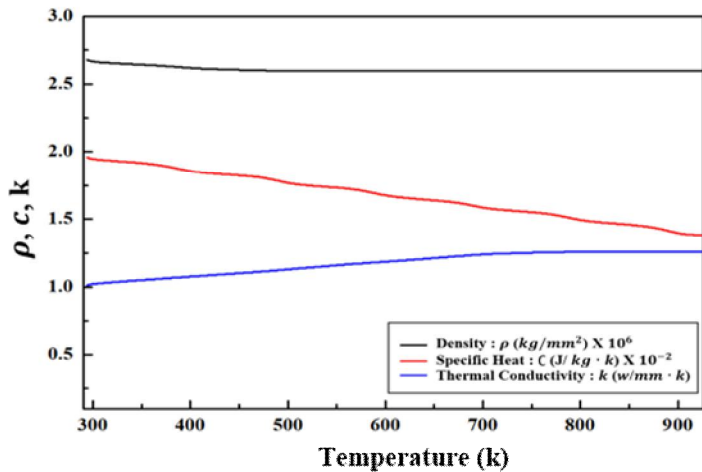


Fig. 2.7 Temperature depending of material properties of Al alloy

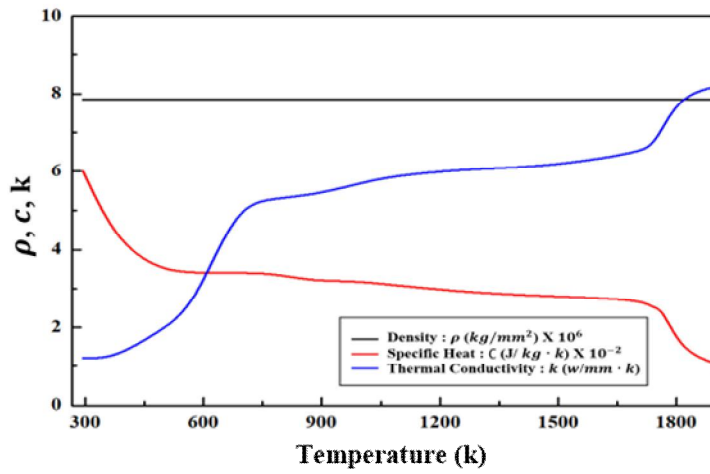
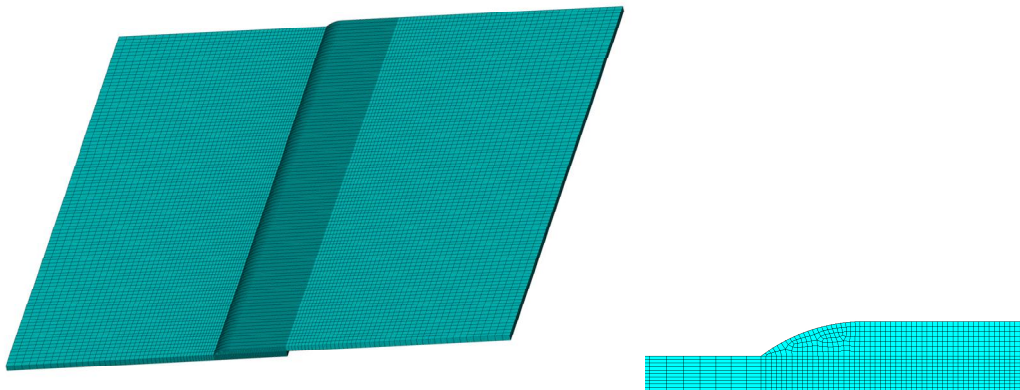


Fig. 2.8 Temperature depending of material properties of GI steel



(a) Analysis model

(b) Front view

Fig. 2.9 Configuration and mesh division of FE analysis model

제 3 장 연구 결과

3.1 용접공정변수에 따른 용접 특성

3.1.1 와이어 위치의 영향

와이어 위치 조건 선정을 위해, 전류 70A로 고정 후 와이어 위치를 Al과 Steel의 겹침 부 끝단부 인 지점 ①과 Steel 측으로 1mm 떨어진 지점 ②, Al 측으로 1mm ③, 2mm 떨어진 지점 ④으로 오프셋 시킨 총 4가지 경우에 대한 용접 가능 와이어 위치를 고찰해보았다.

Fig. 3.1.1은 와이어 위치별 용접부 비드 외관으로 (a)는 Steel 측으로 1mm 떨어진 지점, (b)는 겹침부 끝단 지점, (c)는 Al 측으로 1mm 떨어진 지점, (d)는 Al 측으로 2mm 떨어진 지점의 비드에 해당된다.

비드 외관을 고찰해 본 결과, 와이어 위치를 Steel 측으로 1mm 지점으로 오프셋 한 조건은 Al 측 모재와 용접이 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이는 와이어의 직경이 1.2 ϕ 이므로 Steel 측으로 1mm 오프셋 시킨 경우 Al 측 모재까지 용접이 되지 않았다고 생각된다.

Table. 3.1.1은 와이어 위치별 용접부 단면의 각장(Leg length), 젖음길이(Wetting length)를 나타내었다. 와이어의 위치를 Al 측으로 오프셋을 할수록 각장 길이는 길어지나, 젖음길이는 짧아진 것을 확인할 수 있었다. 이는 Al 모재와 용가재가 용융되어 Steel의 계면으로 용착이 되기 때문이라고 생각된다.

와이어 위치별 인장-전단강도 시험을 평가하기 위해 실시하였으며, Fig. 3.1.2 에 나타내었다. 인장-전단강도 시험 한 결과 Al 측으로 1, 2 mm 오프셋 시킨 조건 (8.1 kN, 8.3 kN)이 Al과 Steel의 중앙인 0 mm(6.3 kN)일 때 보다 약 29 ~ 32% 현저하게 높게 나타내었는데, 이는 각장의 길이가 증가함에 따라 전단 및 굽힘에 대한 저항성이 증가하여 인장-전단강도가 증가하는 것으로 생각되어진다.

따라서 본 연구는 와이어 위치 조건은 Al 측으로 2 mm 오프셋 시켜 실험을 진행하였다.

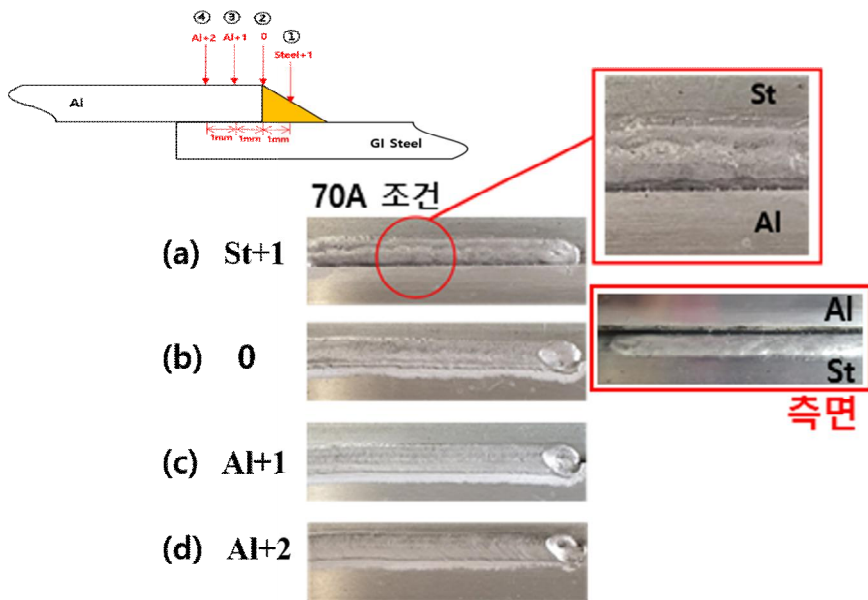





Fig. 3.1.1 Bead appearance in welded joints for various wire positions

Table. 3.1.1 Cross section, leg length and wetting length in welded joints for various wire positions

Wire position	0	Al+1	Al+2
Cross section			
Leg length (mm)	1.6	1.8	2.3
Wetting length (mm)	8.2	7.6	7.4

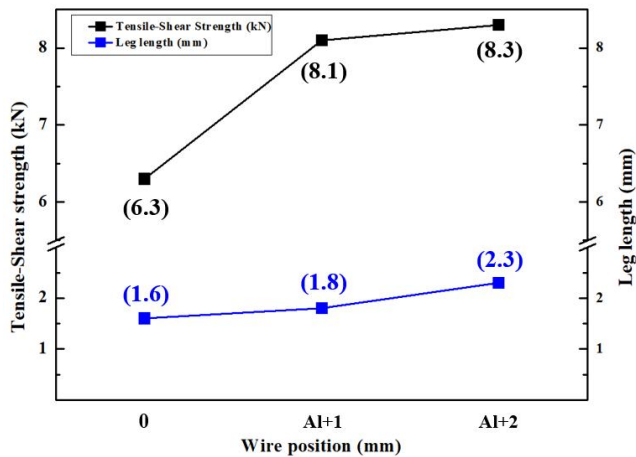


Fig. 3.1.2 Leg length and tensile-shear load in welded joints for various wire positions

3.1.2 전류별 EN 비율의 영향


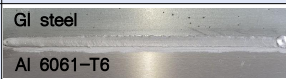


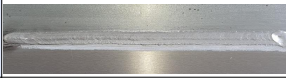


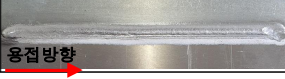


가. 용접부 비드 특성

Al6061-T6와 GI steel 겹침 이음부의 전류별 EN 비율에 따른 영향을 고찰하기 위해서 용접부의 비드 특성을 고찰하였다. 이를 위해 먼저 비드의 표면 및 단면에 대한 용접 결함 유무, 젓음각 및 젓음길이 등을 주안점으로 두어 생성 메커니즘을 살펴보았다.

(1) 젓음각 및 접합 계면 길이 특성

Al6061-T6와 GI steel 겹침 이음부의 전류별 EN 비율에서 비드 표면을 고찰하였으며, 이를 Table. 3.2.1에 나타내었다. 모든 조건에서 AI 모재와 용가재로부터 형성된 비드가 골고루 퍼지는 모습을 볼 수 있었다. 특히, 전류가 증가함에 따라 비드 폭이 넓어지는 것을 볼 수 있었으며 또한, EN 비율이 증가하게 되면 아크의 불안정함이 높아져 원활한 용적 이행을 방해하여 비드 표면에 Spatter가 많이 튀는 것을 확인할 수 있었다.

Table. 3.2.1 Bead appearance of welded joints with current for various EN ratio

EN ratio / Current (A)	0%	10%	20%
			
50			
60			
70			


용접 방향 

Table. 3.2.1은 Al6061-T6와 GI steel 겹침 이음부의 단면을 나타낸 표이다. 모든 조건에서 용접이 원활하게 이루어진 것을 볼 수 있다. 또한 같은 전류에서 EN 비율이 증가함에 따라 비드 표면이 볼록한 것을 확인할 수 있었는데 이는 EN 비율이 증가하면서 와이어의 송급 속도와 상관관계가 있으며 비율이 증가하면 와이어의 송급 속도 또한 올라가게 된다. 특히, 젖음각(Wetting angle)과 젖음길이(Wetting length)가 겹침 이음부에서는 강도에 중요한 역할을 한다. 따라서 이러한 관점에서 결과를 살펴보면 주목할 점은 50A일 때 EN 비율이 증가할수록 비드 단면 형상이 현저하게 볼록해짐으로써 젖음각이 크게 증가한 것이다. 이는 외부 응력이 가해졌을 때 젖음각이 클수록 응력이 루트부에 집중이 되어 젖음각이 작은 것 보다는 응력을 더 많이 견딜 수 없음을 의미한다.

Table. 3.2.1 Cross section of welded joints with EN ratio for various currents


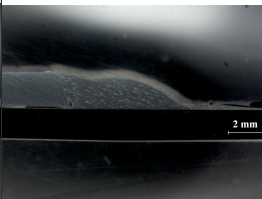


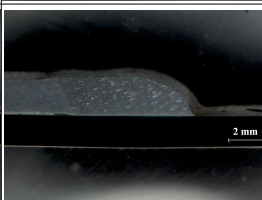



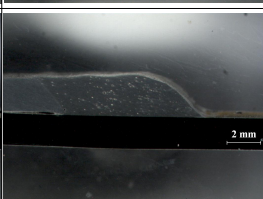
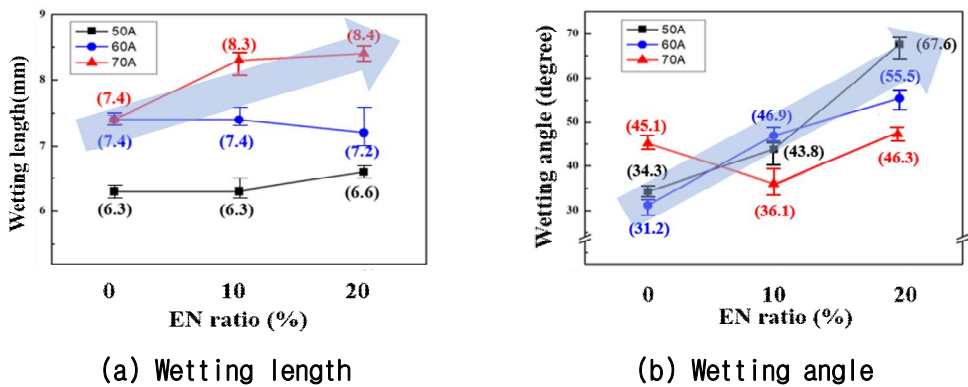
EN ratio (%)	Current (A)		
	50	60	70
0	 Al St 2 mm	 2 mm	 2 mm
10	 2 mm	 2 mm	 2 mm
20	 2 mm	 2 mm	 2 mm

Fig. 3.2.2는 용접부의 젖음길이와 젖음각을 측정한 결과이다. 먼저 전류별 EN 비율 변화에 따른 젖음길이를 살펴보면, 각 전류별 EN 비율이 증가함에 따라 젖음길이는 용가재와 AI 합금의 용융량이 Steel 계면으로 퍼짐에 따라 젖음길이가 증가하는 경향을 나타내었다.

또한 동일한 전류일 때 EN 비율이 증가함에 따라 젖음각의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었는데 이는 동일한 전류에서 EN 비율이 증가하면서 입열량은 줄어들고 와이어의 용융 속도는 증가하기 때문에 젖음각이 증가하는 것으로 판단된다.

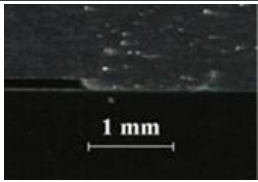
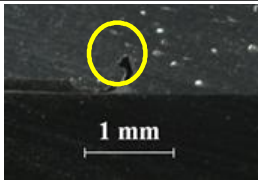
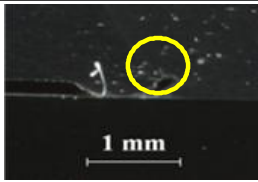
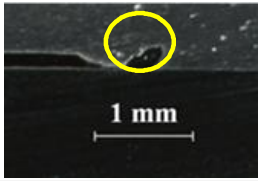
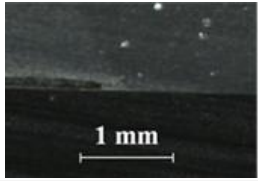
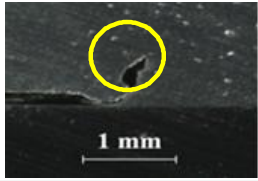
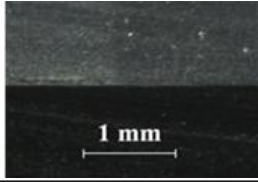
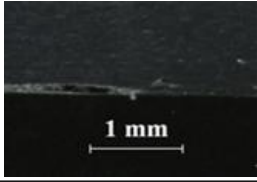
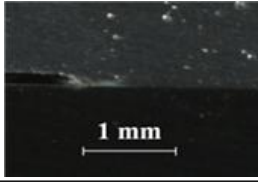


(a) Wetting length (b) Wetting angle
 Fig. 3.2.2 Wetting length and Wetting angle of welded joints with EN ratio for various currents

(2) 루트부 결함

겹치기 용접부에서의 인장-전단강도 시험 시 파단을 일으키는 주요 요인으로 루트부의 결함이 있기 때문에 루트부 결함을 고찰해보았다. Table. 3.2.2는 전류별 EN 비율 변화에 따른 일반적인 용접부의 루트부를 나타낸 것이다. 용접 시 알루미늄은 고온 상태에서 고온균열을 일으키는 경향이 있어 응고 균열이 발생하여 결정립을 따라 파단이 일어나며, GI steel은 표면이 아연 도금 처리가 되어있기 때문에 아연(Zn) 증기로 인해 루트부에 기공이 생겨 종종 파단이 발생하기 때문에 이에 대한 루트부에 결함 생성 여부를 확인하였다. 결과를 살펴보면 각 전류 50 ~ 70 A의 EN 비율 0, 10%일 때 기공이 관찰되었으나, EN 비율 20%에서 모든 전류 조건은 루트부에 기공이 발생하지 않았다. 이는 EN 비율이 증가함에 따라 입열량이 적어져 도금층인 Zn의 손상이 적어 기공이 발생 되지 않은 것으로 판단된다.

Table. 3.2.2 Root part of welded joints with EN ratio for various current by EN ratio

current (A) \ EN ratio (%)	50	60	70
0			
10			
20			

나. 인장-전단강도 특성

Al6061-T6와 GI steel 겹침 이음부에 대한 전류별 EN 비율 변화에 따른 용접부의 인장-전단 강도시험을 실시하였다. 모든 조건의 시험편에서 인장-전단 파단은 Fig. 3.2.3에서 나타낸 바와 같이 Al 측의 루트부의 기공 발생 위치 또는 용접계면의 끝단부에서 파단이 시작됨을 확인할 수 있었다.

인장-전단강도 시험 결과를 Fig. 3.2.4에 나타내었다. 전류별 EN 비율이 증가할 수록 인장-전단강도가 증가하는 경향을 나타내었고, 최대 인장-전단강도 값은 전류 70 A일 때 EN 비율 20% 조건에서 평균 8.8 kN을 나타내었다. 또한 동일한 전류일 때 EN 비율에 따라 인장-전단강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

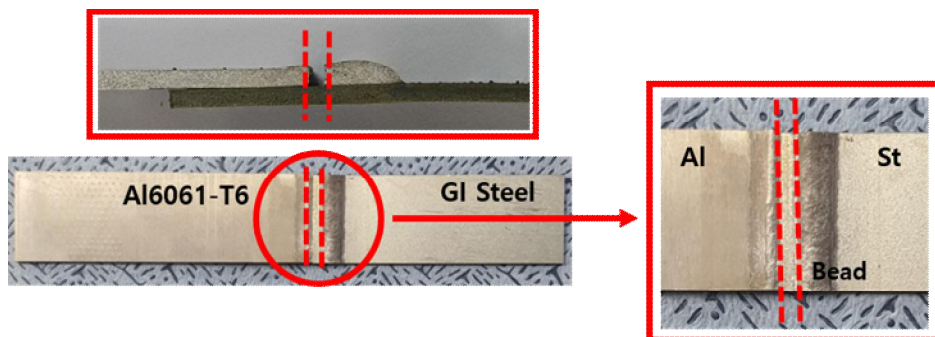


Fig. 3.2.3 Welded specimen fractured after tensile-shear load test

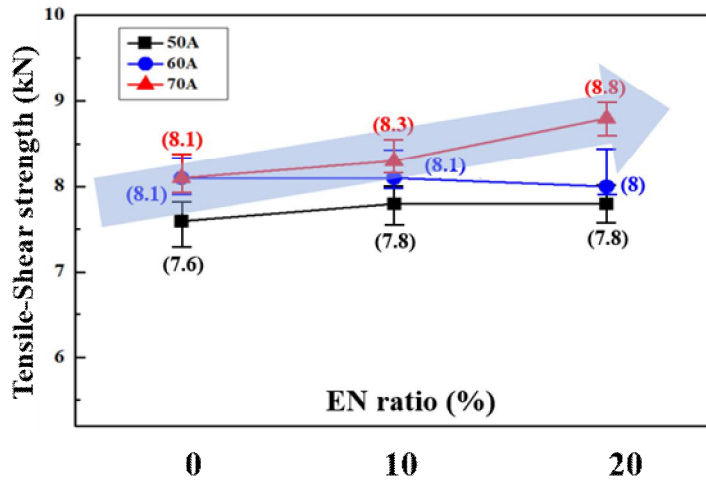


Fig. 3.2.4 Tensile-shear load of welded joints with EN ratio for various currents

각 전류별 EN 비율에 따라 인장-전단강도가 증가하고, EN 비율 20%에서 가장 높은 강도를 보이는데, 이는 겹침 이음부의 강도에 직접적 영향을 미치는 인자인 젓음길이가 길어지고 젓음각이 작아지기 때문에 강도가 향상된 것으로 판단된다.

특히, 전류 70 A, EN 비율 20%의 조건에서 최대 강도 값 8.8 kN을 보이는데, 이는 조건에서 루트부의 기공이 발견되지 않았을 뿐만 아니라 젓음각도 46.3°로 타 조건에 비해 작고 젓음길이는 8.4 mm로 길어 안정적인 비드를 형성했기 때문이라고 판단된다.

3.1.3 금속간화합물 두께 및 EDS 분석

가. 금속간화합물 두께

(1) 전류에 따른 금속간화합물 두께 변화

전류 50 ~ 70 A 변화에 따른 용접부의 금속간화합물 두께 변화를 고찰하기 위해 용접부 계면에 대한 SEM 분석을 실시하였다. Fig. 3.3.1에 1500배율과 5000배율로 찍은 SEM 사진을 나타내었다. 전류가 증가함에 따라 금속간화합물의 두께는 50 A일 때 $0.8\ \mu\text{m}$, 60 A일 때 $2.3\ \mu\text{m}$, 70 A일 때 $2.6\ \mu\text{m}$ 로 증가되었다. 금속간화합물은 시간에 따른 온도변화로 성장이 되기 때문에 전류가 증가하면 용융되는 용착금속량의 증가와 Steel에 입열되는 시간이 길어져 금속간화합물의 두께가 증가함을 확인할 수 있었다.

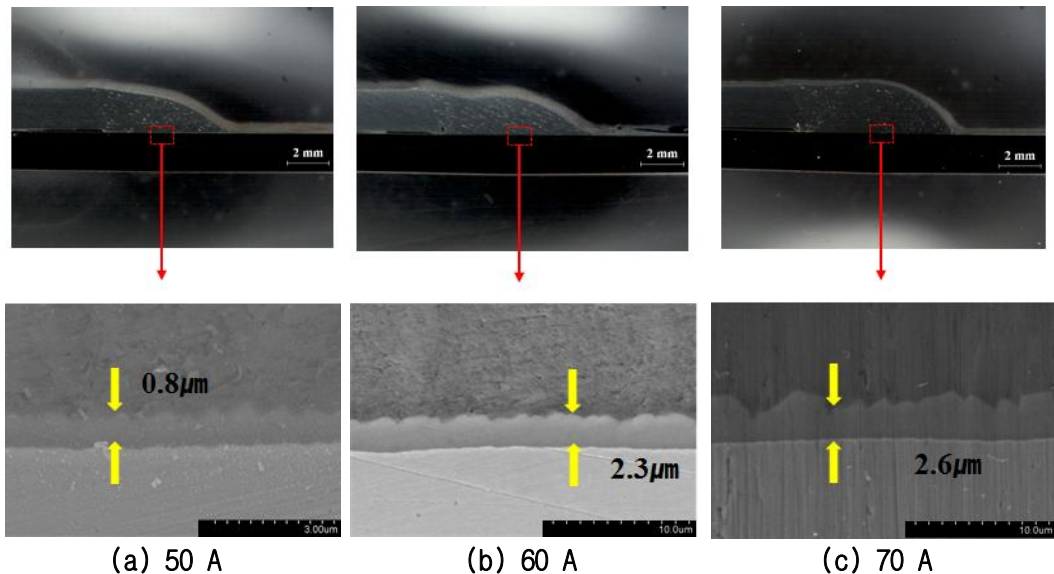


Fig. 3.3.1 Thickness of IMC of welded joints for various currents in EN ratio 0%

(2) EN 비율에 따른 금속간화합물 두께 변화

앞절에서 도출된 용접조건 중 비드형성이 영호한 조건 즉, 전류 70A일 때 EN 비율에 따른 금속간화합물 두께를 고찰하였다. Fig. 3.3.2에 5000배율로 찍은 용접부의 SEM 사진을 나타내었다. 금속간화합물의 두께는 EN 비율 0%일 때 $2.6\ \mu\text{m}$, EN 비율 10%일 때 $2.5\ \mu\text{m}$, EN 비율 20%일 때 $2.3\ \mu\text{m}$ 로 감소함을 확인할 수 있었다. EN 비율이 증가함에 따라 실효전류가 낮아지며, 와이어 송급 속도는 증가하여 용착금속이 Steel 계면에서 유지 시간이 적어지고 입열량은 낮아지기 때문이라고 판단된다. 즉, 금속간화합물의 성장은 입열량이 적은 EN 비율 20%에서 가장 얇은 두께를 형성시키는 것으로 생각되어진다.

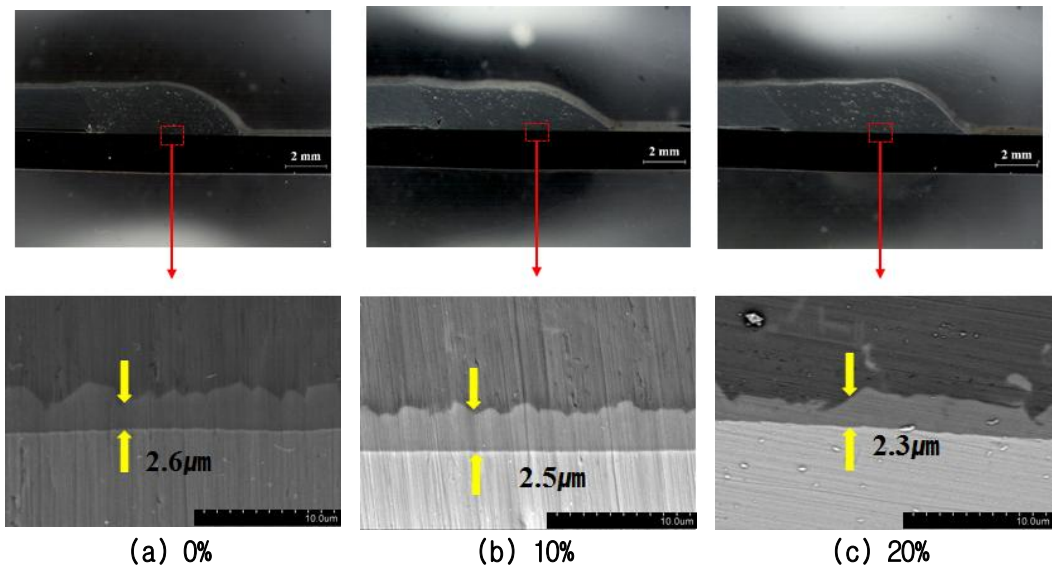


Fig. 3.3.2 Thickness of IMC of welded joints for various EN ratios in 70 A current

나. EDS 분석

Fe/Al 용접 시 생성되는 용접부 계면의 금속간화합물의 성분은 Fe/Al계로 취성의 성질을 띄어 용접부의 강도 저하를 일으키므로 전류별 EN 비율에 따른 용접부 금속간화합물 성분 함유량에 대한 EDS 점분석을 실시하였다.

EDS 분석은 전류 변화에 따른 특성을 보면 Fig. 3.3.3에 나타난 바와 같이 용접부 계면에서 실시하였으며, EN 비율 0% 조건에서 전류 50~70A 증가에 따라 Al 함유량이 66.16(at)%, 73.23(at)%, 75.06(at)%가 있는 것으로 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 3.3.4에 나타난 바와 같이 전류를 70 A조건에서 EN 비율이 증가시켰을 때 EN 비율이 증가에 따라 Al 함유량이 75.06(at)%, 76.44(at)%, 78.81(at)%가 있는 것으로 확인하였다. Table. 3.3.1과 Table. 3.3.2에는 EN 비율 0% 전류 변화에 따른 조건과 전류별 EN 비율 변화에 따른 EDS 성분분석을 나타내었다.

Fe/Al 이원상태도에 대입하여 얻은 상은 EN 비율 0% 조건에서 전류 50 ~ 70 A에 따른 금속간화합물 $FeAl_2$, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$ 로 추정된다. 또한, 전류 70 A 조건에서 EN 비율 변화 0 ~ 20%에 따라 금속간화합물은 $FeAl_3$ 로 모두 동일한 상으로 판단된다. EN 비율이 증가할수록 실효전류가 작아져 용적 아랫부분에 과열이 되어 아크 열이 와이어를 용융시키는데 효과적으로 사용되지 못하여 입열량 또한 적어진다. 따라서, 70 A일 때의 EN 비율 증가 시 알루미늄의 성분 함유량이 증가하는 것으로 판단된다.[6]

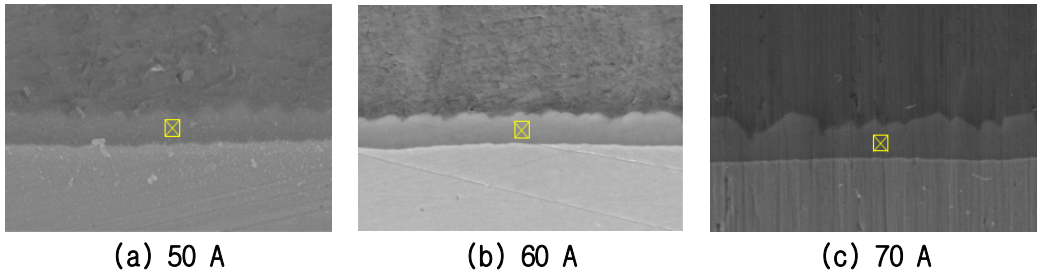


Fig. 3.3.3 EDS analysis of IMC of welded joints for various currents in EN ratio 0%

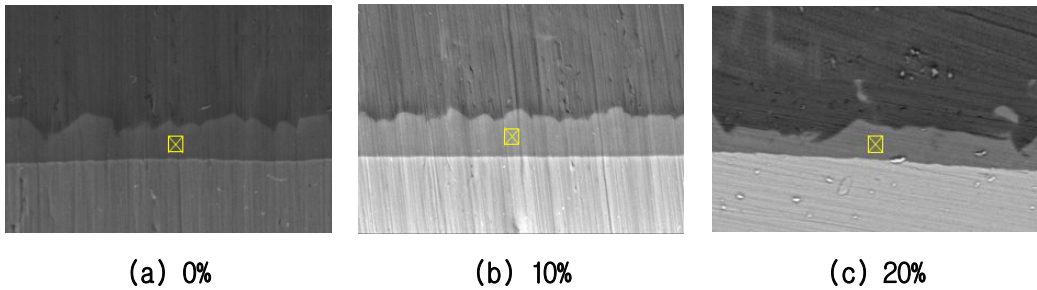


Fig. 3.3.4 EDS analysis of IMC of welded joints for various EN ratios in 70 A current

Table. 3.3.1 Element content and possible phase of welded joints for various currents in EN ratio 0%

Current	Al	Fe	Possible phase
50 A	66.16	33.84	FeAl ₂
60 A	73.23	26.77	Fe ₂ Al ₅
70 A	75.06	24.94	FeAl ₃

Table. 3.3.2 Element content and possible phase of welded joints for various EN ratios in 70A current

EN ratio	Al	Fe	Possible phase
0%	75.06	24.94	FeAl ₃
10%	76.44	23.56	FeAl ₃
20%	78.81	21.19	FeAl ₃

3.2 수치해석에 의한 용접부 금속간화합물 예측

3.2.1 온도분포

Al6061-T6와 GI steel의 AC 펄스 MIG 용접부에 대하여 온도분포 특성을 고찰하기 위하여, 앞절에서 도출된 용접 조건 용접속도(8.33 mm/sec), CTWD(15 mm), EN 비율 0%, 와이어 위치 AI 측으로 2 mm 오프셋 시킨 조건에서 전류 변화(50 ~ 70 A)에 따른 3차원 비정상 열전도해석을 실시하였다.

Fig. 3.9.1은 용접 시험편의 전류별(50 ~ 70 A) 온도분포도로, 용접 개시 후 12 초일 때의 온도분포이다. (a)는 50 A, (b)는 60 A, (c)는 70 A의 분포도이다. Fig. 3.9.2는 Fig. 3.9.1과 동일시간대의 용접부 단면의 온도분포도이다.

열적 특성을 살펴보면 50 A일 때 최고 온도 1043.96K, 60 A일 때 최고 온도 1167.97K 그리고 70 A일 때 최고 온도는 1295.19K로 전류가 증가할수록 입열량의 증가로 최대 온도가 약 120K 정도씩 차이가 남을 확인할 수 있었다.

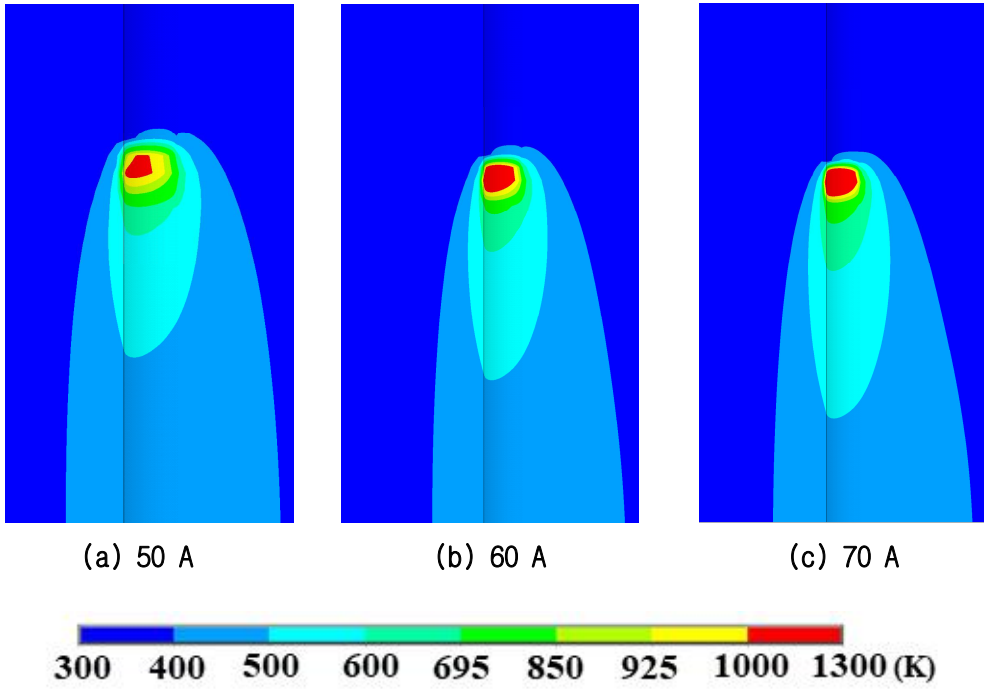
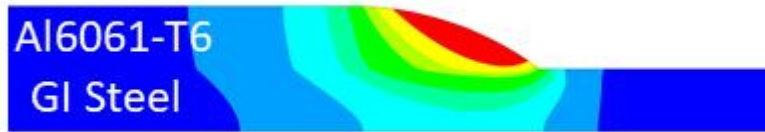


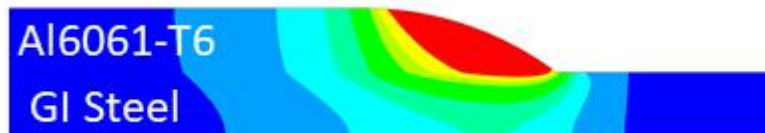
Fig. 3.9.1 Temperature distribution of welded joints for various currents



(a) 50 A



(b) 60 A



(c) 70 A



Fig. 3.9.2 Temperature distribution of cross section of welded joints for various currents

3.2.2 금속간화합물 예측

Al6061-T6와 GI steel 용접부의 금속간화합물 두께를 예측하기 위해서 계면에서의 각 전류별(50 ~ 70 A) 온도이력을 고찰하였다. 아울러 수치해석 값에 대한 타당성을 검증하기 위해서 K-Type 열전대를 이용하여 측정된 온도 실측 값과 비교하였으며, Fig. 3.9.3에 나타내었다.

수치해석 결과를 살펴보면 계면 최고 온도는 50 A일 때 772K, 60A일 때 최고 온도 848K 그리고 70 A일 때 최고 온도는 916K을 나타내었다. 그리고 실측값과 비교시 정략적인 측면에서 약 100~130K 정도 차이가 나지만, 정성적인 측면에서는 동일한 특성을 보임을 알 수 있다.

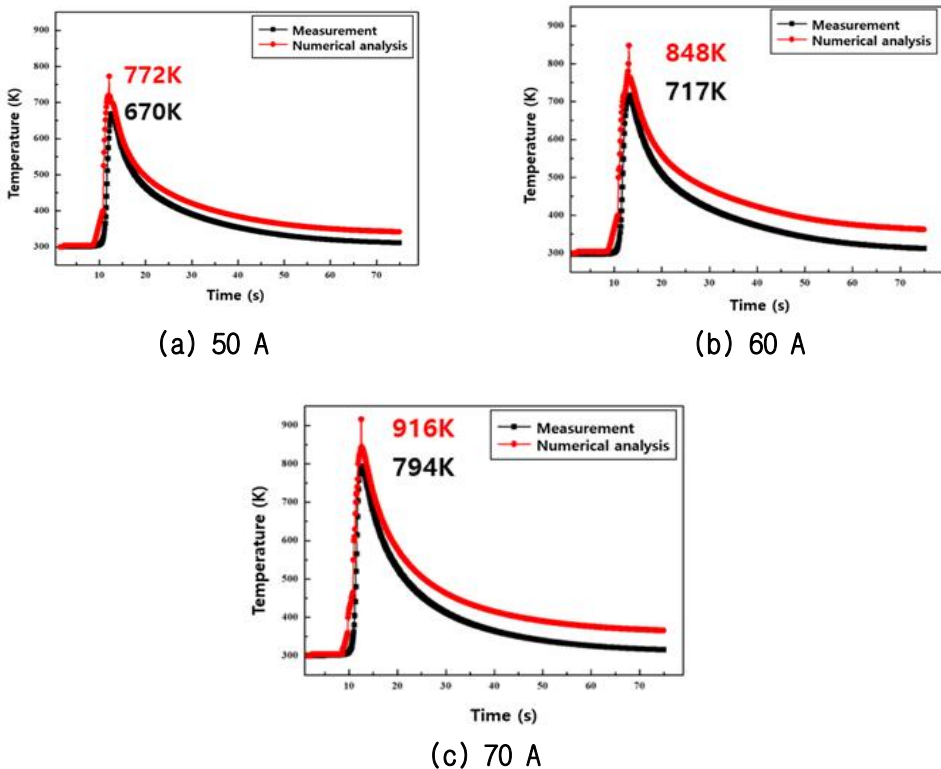


Fig. 3.9.3 Comparison of temperature histories in welded joints between numerical analysis and measurement

용접부의 금속간화합물을 예측하기 위해서, 금속간화합물(IMC)은 시간에 따른 온도변화로 성장을 하기 때문에 2장에서 Parabolic law of diffusion의 식(2.16)에 시간에 따른 온도를 대입하여 IMC 두께를 예측하였다. 예측값은 Table. 3.6에 나타내었다.

Fe/Al계의 금속간화합물($FeAl_2$, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$)은 취성의 성질을 띄어 용접부의 강도를 저하시키므로 적용 가능하기 위한 범위는 $10 \mu m$ 이하여야 한다. 예측된 금속간화합물의 두께는 모든 전류에서 만족했다.[4]

Table. 3.6의 전류별 IMC 두께를 살펴보면 50 A에서 70 A로 증가할수록 입열량 증가로 IMC 두께가 $1.4 \mu m \sim 3.39 \mu m$ 로 증가함을 보이는데 이는 모두 실제 적용 가능한 범위 $10 \mu m$ 이하로 발생함을 알 수 있다.

Table. 3.6 Thickness of intermetallic compound in welded joints

Current	IMC thickness (μm)
50 A	1.4
60 A	2.08
70 A	3.39

Al6061-T6와 GI steel 겹침 이음부에 대한 전류에 따른 열전도 수치해석을 통하여 금속간화합물의 두께를 예측하였다. 온도 이력으로부터 금속간화합물의 두께는 전류가 가장 높은 70 A에서 더 두껍게 생성되었으며, Table. 3.6에서 나타낸 바와 같이 금속간화합물의 두께 해석 값은 50 A에서 1.4 μm , 60 A에서 2.08 μm , 70 A에서 3.39 μm 로 예측되었다. SEM으로 금속간화합물의 두께를 측정하였으며, 해석 값과 실측 값을 비교를 Fig. 3.9에 나타내었다.

전류가 증가함에 따라 금속간화합물의 두께가 증가하였으며, 50 A의 오차는 0.6 μm , 60 A의 오차는 0.22 μm , 70 A의 오차는 0.79 μm 로 실측값과 비교 시 정량적으로는 약간 높게 나타나지만 그다지 차이가 나지 않았고, 정성적으로 동일한 특성을 보였다. 금속간화합물 두께의 오차가 1 μm 이하로 해석 결과의 신뢰성을 입증할 수 있다.

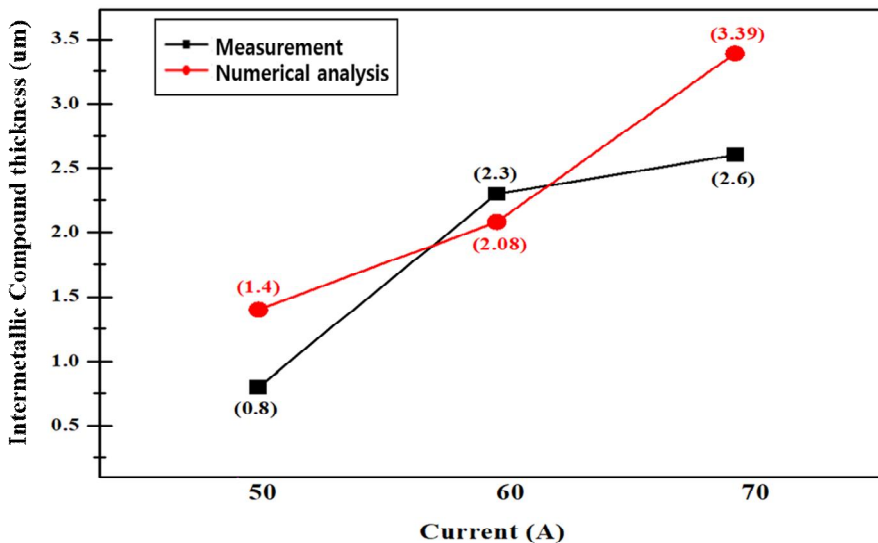


Fig. 3.9.4 Comparison of IMC layer thickness between numerical analysis and measurement

제 4 장 결 론

본 연구에서는 Al6061-T6와 GI steel의 AC 펄스 MIG 용접부의 용접공정변수(와이어 위치 선정, 전류, EN 비율)에 따른 용접성 및 금속간화합물의 특성을 고찰하고자 하였다.

1) 와이어 위치 변화에 따른 용접 가능한 최적의 조건을 고찰해 본 결과, Steel 측으로 1 mm 오프셋 조건은 용접이 되지 않았으며, Al 측으로 오프셋 길이가 커질수록 각장길이가 커짐에 따라 인장-전단강도 값이 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히, Al 측으로 2 mm 오프셋 시킨 조건에서 최대 각장길이 2.3 mm와 가장 높은 인장-전단강도 값 8.3 kN을 얻을 수 있었다.

2) 각 전류별 EN 비율이 0 ~ 20%로 증가함에 따라 안정된 비드가 형성이 되었으며, 젖음길이 6.6 ~ 8.4 mm와 젖음각의 크기 31.2° ~ 67.6°가 증가하고 안정된 비드 형성을 나타내었다. EN 비율 20% 조건에서는 루트부의 결함인 기공이 발견되지 않았는데, 이는 EN 비율이 증가함에 따라 입열량이 줄어들어 Zn 도금층의 손상을 줄여주어 루트부의 결함이 발견되지 않았다고 생각된다.

3) 각 전류별 EN 비율 변화에 따른 인장-전단강도는 EN 비율 증가함에 따라 향상되는 것을 확인하였는데 특히, 앞서 루트부에 기공이 발견되지 않고 안정된 비드 형성을 나타낸 젖음각이 46.3°로인 조건 EN 비율 20%의 전류 70 A 조건에서 최대 인장-전단강도 8.8 kN을 확보할 수 있었다

4) SEM-EDS 분석 결과 금속간화합물(IMC)의 성분은 Fe-Al계($FeAl_2$, $Fe_2 Al_5$, $FeAl_3$)로 확인하였으며, 수치해석에 의해 IMC 두께 예측 결과 전류 50 ~ 70 A일 때 각각 1.4 ~ 3.39 μm 를 나타내었고, 실측 값은 0.8 ~ 2.6 μm 로 나타내었다. 이는 수치 해석 값이 정량적인 측면에서 실측 값보다 미소하게 높으나 정성적인 측면에서 동일한 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 김동철, 박형진, 강문진, 교류 펄스 MIG 용접의 원리 및 특성, 대한용접·접합학회지, 2008, 26(6), pp. 548-551
- [2] 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 Characterization, 2007, 58(7), pp. 588-592
- [3] L. Shao, Y. Shi, J. K. Huang and S. J. Wu, Effect of joining parameters on microstructure of dissimilar metal joints between aluminum and galvanized steel, Materials & Design, 2015, 66, pp. 453-458
- [4] Krishna P. Yagati, Ravi N. Bathe, Koteswararao V. Rajulapati, K. Bhanu Sankara Rao and G. Padmanabham, Fluxless arc weld-brazing of aluminum alloy to steel, Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12), pp. 2949-2959
- [5] 조상명, 공현상, 극성가변 AC 펄스 MIG용접기를 이용한 아크 브레이징, 대한용접·접합학회지, 2003, 21(4), pp. 56-62
- [6] 공현상, 임성룡, 김기정, 김태진, 이현수, 이창주, 조상명, 박판 AI MIG 용접에서 용락에 미치는 AC 펄스 용접 극성비의 영향, 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, 2001, pp. 15-18
- [7] Shanglu Yang, Jing Zhang, Jin Lian, Yongpin Lei, Welding of aluminum alloy to zinc coated steel by cold metal transfer, Materials and Design, 2013, 49, pp. 602-612
- [8] 배재용, 알루미늄 합금과 스테인리스강의 AC 펄스 MIG 브레이징 시 와이어 위치에 따른 용접성 평가, 2018
- [9] Marcin Kubiak, Wiesława Piekarska, Zbigniew Saternus, Tomasz Domański, Numerical prediction of fusion zone and heat affected zone in hybrid Yb:YAG laser + GMAW welding process with experimental verification, Procedia Engineering, 2016, 136, pp. 88-94

- [10] A. Das, M. Shome, S.-F. Goecke, A. De, Numerical modelling of gas metal arc joining of aluminium alloy and galvanised steels in lap joint configuration, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016, 21(4), pp. 303-309
- [11] Hyung Jin Park, Dong Cheol Kim, Mun jin Kang, Sehun Rhee, The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW, *Journal International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66, pp. 867-875
- [12] V. Buchibab, G.M. Reddy, A. De, Probing torque, traverse force and tool durability in friction stir welding of aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 241, pp. 86-92
- [13] 방한서, 유한요소법에 의한 박판용접의 2차원비정상열전도 해석, *대한조선학회*, 1990, 27(4), pp. 43-50
- [14] S. Crucifix, C. van der Rest, N. Jimenez-Mena, P. J. Jacques and A. Simar, Modelling thermal cycles and intermetallic growth during friction melt bonding of ULC steel to aluminium alloy 2024-T3, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(4), pp. 319-324.
- [15] M. Kajihara, Quantitative evaluation of interdiffusion in Fe₂Al₅ during reactive diffusion in the binary Fe-Al system, *Materials Transactions*, 2006, 47(6), pp. 1480-1484.
- [16] S. Bag, A. De, Probing reliability of transport phenomena based heat transfer and fluid flow analysis in autogeneous fusion welding process. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2010, 41(9), pp. 2337-2347
- [17] Ryoichi Hatano, Tomo Ogura, Tomoki Matsuda, Tomokazu Sano and Akio Hirose, Relationship between intermetallic compound layer thickness with deviation and interfacial strength for dissimilar joints of aluminum alloy and stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, 2018, 735, pp. 361-366
- [18] Muralimohan Cheepu, B.Srinivas, Nalluri Abhishek, T.Ramachandraiah,

- Sivaji Karna and D.Venkateswarlu, Dissimilar Joining of Stainless Steel and 5083 Aluminum Alloy Sheets by Gas Tungsten Arc Welding–Brazing Process, *Materials Science and Engineering*, 2018, 330(1)
- [19] R.F.Qiu, C.Iwamoto and S.Satonaka, Interfacial reaction layer in resistance spot welded joint between aluminium alloy and austenitic stainless steel, *Materials Science and Technology*, 2010, 26(2), pp. 243–246
- [20] J.L.Song, S.B.Lin, C.L.Yang, G.C.Ma and H.Liu, Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding–brazing of aluminum alloy to stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, 2009, 509, pp. 31–40
- [21] Jianxiong Li, Huan Li, Huiliang Wei and Yanbing Ni, Effect of pulse on pulse frequency on welding process and welding quality of pulse on pulse MIG welding–brazing of aluminum alloys to stainless steel, *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, 87, pp. 51–63
- [22] 방한서, 고민성, 방희선, 유한요소법에 의한 평판의 용접 변형에 관한 기초적 연구, *한국해양공학회*, 1997, 11(4), pp. 1–6
- [23] 용접·접합 편람 1편 철강 및 비철재료, *대한용접접합학회*, pp110–130
- [24] 용접·접합 편람 1편 철강 및 비철재료, *대한용접접합학회*, pp305–308
- [25] 김태진, MIG 아크용접에서의 교류중첩펄스를 이용한 용접성능향상, *조명·전기설비학회논문지*, 2008, 22(10), pp. 141–149
- [26] Uwe REISGEN, Markus SCHLESER, Oleg MOKROV and Alexander ZABIROV, Virtual welding equipment for simulation of GMAW process with integration of power source regulation, *Frontiers of Materials Scienc*, 2011, 5(2), pp. 79–89
- [27] Hyong 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, 50(9), pp. 2314–2317
- [28] 조상명, 김태진, 이창주, 임성룡, 공현상, 김기정, 박판 Al MIG 용접용 AC

펄스 전류 파형의 설계 및 출력특성, 대한접합학회지, 2003, 21(2), pp. 187-193

- [29] San-bao LIN , Jian-ling SONG, Guang-chao MA, Chun-li YANG, Dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to galvanized steel, Frontiers of Materials Science in China, 2009, 3(1):78-83