아크 열원을 이용한 스틸과 알루미늄의 이종접합에 관한 연구(Ⅱ)

- 이종접합 메커니즘 고찰 -

김 용*[†] · 박 기 영* · 이 보 영**

*고등기술연구원 로봇생산기술센터

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

A Study on the Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel Using the Arc Heat Source (Ⅱ)

- Mechanism of Dissimilar Metal Joining -

Yong Kim*[†], Ki-Young Park*, and Bo-Young Lee**

*Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Engineering, Yongin, 17180, Korea

**Dept. of Aerospace and Mechanical Eng. Korea Aerospace University, Goyang, 10540, Korea

[†]Corresponding author : welding@iae.re.kr

(Received June 12, 2018 ; Revised July 19, 2018 ; Accepted August 20, 2018)

Abstract

As a result of studying the research trends of dissimilar metal joining using the arc heat source, the process parameters that determine the quality of the joints can be classified into the filler metal, type of coating, heat input energy and joint conditions such as the gap. Among these parameters, the joining mechanism has already been identified by many researchers from the metallurgical point of view such as the kind of the filler and the characteristics according to the heat input. Therefore, in this study, we tried to understand the joining mechanism related to kind of coating and wettability through high speed camera observation. We also studied the effect of not only the various coating but also the thickness of coating layer. As a result, there was a large difference in bonding property depend on the type of coating in the joint. In case of galva-annealed steel, the coating layer was not sufficiently melted due to a higher melting point compare with galvanized steel, so that a large amount of spatter was generated and no wetting occurred under any conditions. Also we cannot found the relationship between the thickness of the coating layer and the generation of the intermetallic compound. However, the difference about the quality of the joints is evident because the amount of Zn vaporized under the same heat input condition is increased.

Key Words : Dissimilar metal joining, Intermetallic compound, CMT, Zinc coating, Galvanized, Wetting

1. 서 론

아크 열원을 사용한 스틸과 알루미늄 간 이종접합은 에너지밀도가 낮고 국부적인 영역에 입열 제어가 어려워 발생하는 금속간화합물의 형성과 그로 인한 기계적 물성저하 때문에 그동안 큰 주목을 받지 못하였다. 이전에는 주로 TIG 아크 열원을 사용한 이종접합 결과¹⁻³⁾가 몇몇 발표되었는데, 대량 생산을 추구하는 자동차산업의 공정 특성 상 생산성의 문제 또한 고려되어야 한

다. 그러나 2005년 새로 개발된 CMT 시스템을 통해 이종접합에 대한 적용 가능성이 Bruckner⁴⁾에 의해 발표되면서부터 본격적인 연구가 시작되었다.

첫째로 Zhang⁵⁾은 고입열 및 저입열 조건에서 이종접합 후 인장강도 및 금속간화합물의 성장 비교를 통해 입열량과 금속간화합물간의 관계에 대해 고찰하였으며, 그의 후속 논문⁶⁾에서는 고속촬영과 파형 측정을 통해 CMT 시스템에서의 입열 제어에 관해 설명하였다. 그는 또한 스테인리스강에 각각 알루미늄과 Zn로 코팅을 하여 알루미늄과 이종접합한 뒤 금속간화합물의 형성에

관해 비교분석하는 연구를 진행하였으며 알루미늄 코팅은 용가재의 젖음성에 도움을 주지 못한다고 하였다⁷⁾.

이후 공정변수와 접합부의 품질에 대한 상관관계를 밝히기 위한 연구가 많이 진행되었는데, 초기에 발표된 대부분의 연구는 금속간화합물의 형성에 대한 Si의 역할에 대한 것이다. Dong³⁾은 TIG 열원을 사용하여 Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu 및 Al-Zn 용가재로 각각 스틸과 알루미늄 간 이종접합을 실시한 뒤 금속간화합물의 형상 및 두께를 비교하였으며, 용가재에 포함된 Si가 스틸 모재로부터 용접부로 Fe가 확산되는 것을 제한시키고 이로 인해 금속간화합물의 전체적인 두께가 감소된다고 보고하였다. Su⁸⁾는 교류펄스아크용접을 이용하고 순수 Al, AlSi5, AlSi12 및 AlMg4.5의 서로 다른 Si 함량을 갖는 용가재를 사용하여 용접 후 그 특성을 비교하였으며, 그 결과는 Dong³⁾의 연구결과와 매우 일치한다. 나아가 Shao⁹⁾는 Fe_2Al_5 및 $FeAl_3$ 로 구성된 금속간화합물의 형성 메커니즘에 대해 설명하였으며 금속간화합물의 형성은 온도와 시간의 함수로써 입열량에 의해 그 두께가 결정된다고 하였다. 이러한 금속간화합물의 형성 메커니즘은 레이저 이종접합에 대해 연구한 Jia¹⁰⁾의 주장과도 거의 일치한다.

Niu¹¹⁾는 본격적으로 AlSi5 및 AlSi12 용가재를 사용하여 동일 조건에서 용접 후 비드형상과 접합강도를 비교하였다. 그는 입열량 증가에 따라 용가재의 유동성이 증가하기 때문에 젖음각이 감소하고 접합길이가 증가한다고 주장하였는데 여기서는 동일조건에서 AlSi5의 접합길이가 더 우수하며 모재 대비 89%의 강도를 확보하였다고 하였다. 그러나 상식적으로 Si 함량 증가에 따라 용융풀의 유동성이 증가하므로 젖음각 및 강도에 대한 그의 주장은 좀 더 검토되어야 한다. 마지막으로 용가재 내에 함유된 Si의 역할에 대해서는 Milani¹²⁾의 연구에서도 보고되었다. 그는 Niu¹¹⁾의 주장과 달리 AlSi12의 젖음성이 더욱 좋게 나타났다고 하였으며, 이는 Si 함량 증가에 따른 용가재의 용점과 점성이 감소하고 용가재의 유동성이 좋아지기 때문이라고 분석하였다.

한편 용가재의 젖음성을 용이하게 해주는 도금층과 접합 메커니즘을 규명한 연구 결과도 다수 발표되었다. Yagati¹³⁾는 펄스 GMA용접을 사용하여 각각 GA (Galvaannealed), GI (Galvanized) 강판 및 일반 냉연강판(CR, cold rolled)과 알루미늄 간 이종접합 결과에 대해 발표하였으며, GA 및 CR 강판에서도 접합을 실시하여 인장시험 결과를 제시하였다. 반면 Cao¹⁴⁾는 보론강판에 동일한 도금 소재를 사용하여 이종접합 후 그 용접성에 대해 분석하였으며, Yagati¹³⁾의 주장과는

달리 GA 강판의 경우 Fe-Zn 합금 도금된 코팅층이 완전히 녹지 않아 용가재의 젖음성이 나빠서 접합이 이루어지지 않는다고 하였다. 또한 그는 스틸과 알루미늄을 연결하기 위해서는 Fe/Al 상의 형성이 필수적이지만, 많은 양의 Fe/Al 금속간화합물 층은 접합부의 취성으로 인해 좋지 않으며 그 두께는 10 μm 이하로 되어야 한다고 하였으며, 그의 주장은 이전의 다른 연구결과⁴⁻⁵⁾와도 잘 일치한다. 비슷한 시기에 Zhou¹⁵⁾는 GI 강판에서의 젖음성 거동에 대해 연구하였는데 Al, Fe 및 Zn의 상대적 엔탈피의 차이를 가지고 접합 메커니즘을 설명하였다. 그의 주장에 따르면 Al, Fe 및 Zn의 상대적 엔탈피 중 Fe-Al간 엔탈피가 가장 낮기 때문에 가장 먼저 반응을 나타내게 되며, 도금되어 있는 Zn의 일부는 기화되고 일부 존재하고 있는 액상상태의 Zn는 끝 쪽으로 이동하여 용접 토우부에 Zn 집중부(Zn-rich zone)를 형성한다고 하였다.

마지막으로 아크열원을 이용한 접합 시 용접 루트부에 발생하는 기공 및 이의 저감 방안에 대한 연구도 있다. Liu¹⁶⁾는 GMA용접에 비해 비교적 낮은 용접속도를 갖는 TIG 용접공정에서 기공의 발생이 보다 적게 발생한다고 보고하였으며, Su¹⁷⁾는 Al 동종소재 용접과 Fe/Al 이종접합 시 후자의 경우에서 기공발생이 더욱 많이 발생하는 사실을 밝혔다. 또한 그는 직류펄스, 교류펄스 및 교류 이종펄스 용접방식으로 각각 용접 후 기공 발생률을 정량적으로 비교하여 교류의 경우 극성변화, 충격에 의한 버블의 분해, 아크 압력에 의한 난류 유동 등의 원인으로 많은 가스가 빠져나오지 못하고 용접 중앙부에 위치한다고 하였으며, 직류를 사용한 경우에는 이와 같은 유동 변화가 상대적으로 적으므로 상부 쪽에 기공이 분포된다고 하였다. 그러나 그의 논문에서는 루트부에 위치한 기공 및 기공 발생 정도와 강도와의 상관관계 등에 대한 언급은 없었다. 이에 반해 Yang¹⁸⁾은 루트부에 발생하는 기공과 이의 저감 방안에 대해 연구하였다. 그는 인위적인 갭을 주어 시편 사이에 Zn 기화 통로를 만들어주면 기공의 발생이 현저히 줄어들며, 갭의 증가에 따라 인장강도가 증가된다고 발표하였다.

그 동안의 연구 동향을 검토한 결과 접합부의 품질을 결정짓는 공정변수는 크게 용가재의 종류, 도금 종류 및 상태, 입열량 그리고 마지막으로 갭 등의 이음부 조건으로 구분할 수 있다. 이러한 변수 중 용가재의 종류나 입열량에 따른 특성 등은 금속학적인 관점에서 이미 많은 연구자들에 의해 접합 메커니즘이 규명되었다. 그러나 아직까지 도금의 종류나 도금층의 역할 등에 대한 명확한 연구결과는 발표되지 않았다. 이에 본 연구에서는 CMT 프로세스에서의 용적이행 현상 및 도금 종류

에 따른 차이를 보다 정성적으로 확인하기 위해 초고속 카메라를 이용하여 접합부 형성과정을 관찰하였다. 또한 도금의 종류뿐만 아니라 도금 두께가 접합 품질에 미치는 영향에 대한 연구도 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 재료

그 동안 이종접합에 대한 많은 연구 사례를 분석한 결과, 다양한 조합의 스틸과 알루미늄 소재가 사용된 것으로 나타났다. 그러나 대부분 소재의 적용 두께는 1.0~2.0 mm 이내로 이는 일반적으로 차체 소재에 적용되는 두께이다. 특히 차체 소재로 사용되는 알루미늄의 경우 대표적으로 가공경화형 합금인 Al5052 및 열처리형 합금인 Al6061이 실험 소재로 채택되어 연구되었으며, 스틸의 경우 다양한 강도 범위의 소재가 연구되었으나 일반적으로 300~600 MPa의 인장강도를 갖는 것으로 확인되었다. 이에 따라 본 연구에서도 가장 일반적으로 사용되는 1.2 mm의 두께의 DP590 고강도 강판 소재와 Al5052 소재를 기본으로 사용하였으며, 이종접합 특성을 확인하기 위해 필요에 따라 Al6061 소재를 사용하거나 소재의 두께를 달리하여 실험하였다. 본 실험에 사용된 소재의 화학조성 및 기계적 성질은 각각 Table 1과 2에 나타내었다.

또한 스틸과 알루미늄 간 이종소재 용접 시 도금 중

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of DP590 steel

Chemical composition (wt.%)				
C	Si	Mn	P	S
0.09	0.28	1.01	0.012	0.005
Mechanical properties				
Young's Modulus	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Poisson-ratio
210GPa	420MPa	620MPa	27%	0.3

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of Al5052 H32

Chemical composition (wt.%)					
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0.088	0.311	0.015	0.057	2.33	0.008
Mechanical properties					
Young's Modulus	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Poisson ratio	
72GPa	185MPa	230MPa	14%	0.33

Fig. 1 Coating condition compared with GA and GI steel

Fig. 2 Results of the composition analyses of coating layer for GA and GI steel respectively

류에 따른 용접성을 확인하기 위해 GA, GI 및 CR 강판에 대해 각각 이종접합을 실시하고 그 품질을 평가하였다. 본 연구에 사용된 GA 및 GI 강판의 도금 상태는 Fig. 1에 제시하였다. 도금 두께는 측정위치에 따른 편차가 다소 있으나 대체적으로 GA와 GI 각각 14 μ m, 11 μ m으로 측정되었다. 도금층의 주요 성분을 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM) 및 x-선 분광분석(EDS) 결과는 Fig. 2에 제시하였다. 분석결과 GA의 경우 앞서 연구된 바와 같이 약 12%의 Fe와 88%의 Zn으로 이루어진 Fe-Zn 합금 도금층으로 나타났다¹⁴⁾. 반면 GI의 경우 거의 100%의 순수 Zn 도금층으로 이루어진 것을 확인하였다.

한편 현재까지 발표된 연구에 의하면 도금 두께와 접합 품질 간 관계에 대해 언급된 사례는 찾아볼 수 없었다. 이에 따라 추가적으로 도금 두께가 미치는 영향에 대해 확인하기 위해 욕(Bath) 온도 460℃ 정도에 시편을 침적 시킨 후 침적 시간 조절을 통해 도금 두께를 조절할 수 있는 비교적 간단한 용융아연도금(Hot dip galvanizing) 방식으로 도금 두께를 달리하여 4단계로 제작하였다. 제작 결과는 Fig. 3과 같이 최소 도금두께인 약 2 μ m부터 32 μ m까지 준비하였다.

2.2 실험 장치 및 방법

Fe/Al 이종 소재의 접합에서의 핵심은 금속간화합물의 형성을 얼마나 제어할 수 있는냐에 따라 품질이 결

Fig. 3 Various galvanized coating thickness of the specimens

정되며 이러한 금속간화합물의 형성 정도는 온도와 시간에 비례하여 증가하게 된다. 이에 따라 그동안 아크열원을 이용한 이중접합은 큰 주목을 받지 못하였으나 CMT 용접 시스템의 출현으로 인해 입열 제어가 가능해짐으로서 아크열원을 이용한 이중접합이 실현되었고, 본 연구에서도 이에 따라 CMT 용접전원(TPS3200)을 사용하였다.

용접조인트는 Fig. 4와 같이 필렛 조인트로 하였으며 알루미늄 합금을 상판에 배치하였다. 시험편의 크기는 알루미늄과 스틸 모두 100×200 mm로 하고 용접 길이는 180 mm로 하여 동일 시험편에서 3개의 인장시험편과 1개의 단면을 채취하였다. 소재의 두께는 스틸과 알루미늄 모두 1.2 mm로 하였으며, 중첩 겹침 길이는 25 mm로 하였다. 기본적인 티칭 위치는 알루미늄 상판 모서리에 위치시켰다. 또한 필렛 조인트 용접을 위한 토치의 기울기는 20°, 전진각은 10°로 설정하고 CTWD는 14 mm로 하였다. 보호가스로는 Ar을 사용하였으며, 유량은 15LPM으로 고정하여 공급하였다. 토글 클램핑 지그를 사용하였고 상/하판 사이의 갭 조절 영향을 위해 일정 두께의 칩을 배치하고 클램핑하는 방식으로 하여 인위적인 갭을 인가하였다.

이중접합 후 각 시험편의 단면분석을 위해 시험편 채취

Fig. 4 Schematic of the welding configuration

Fig. 5 Experimental set-up for high speed camera measurement

및 마운팅 후 폴리싱하여 분석 목적에 따라 4% 나이탈(Nital) 용액 또는 Keller 용액(HNO_3 : 25 mL, HCl : 15 mL, H_2O : 50 mL, HF : 10 mL)를 사용하였으며, 상온에서 에칭 후 관찰하였다. 금속학적 분석을 위하여 광학현미경, SEM, EDS, EPMA 및 X-ray 검사기 등의 장비를 사용하였고 경도는 마이크로 비커스 경도계를 사용하였다. 조건별 접합강도를 비교 평가하기 위하여 25 mm 폭으로 시험편을 가공하여 3 mm/min의 인장속도로 시험을 진행하였다. 이때 파단 강도는 인장응력(MPa)으로 나타냈으며, 그 면적은 파단 위치(계면 or 용접부)에 상관없이 알루미늄 시험편 소재의 단면적으로 정의하였다.

마지막으로 도금에 따른 이중접합 시 나타나는 현상을 확인하기 위해 고속카메라를 사용하여 이중접합 이행현상을 관찰하였다. 이 때 사용된 장비는 Photoron사(일본)의 FASTCAM SA-1이다. 본 장비는 초당 18,000프레임까지 촬영이 가능한 카메라이며, 본 실험에서는 초당 4,000프레임으로 측정하였다. 아크 빛을 최대한 차단하고 용접현상을 명확히 관찰하기 위해 ND4 필터 및 250W급의 메탈 램프(Metal halide lamp) 조명 두 개를 사용하였다. 고속카메라 배치 모습은 Fig. 5에 나타내었다.

3. 실험결과와 고찰

3.1 도금 종류에 따른 접합특성 관찰

내부식성 향상을 목적으로 차체 강판에 사용되는 도금강판은 크게 Fe-Zn 합금으로 구성된 합금화아연도금강판(GA)과 순수 Zn로 구성된 용융아연도금강판(GI)이 주로 사용되고 있다. 또한 Al-Si로 구성된 용융알루미늄 도금의 경우 주로 배기계 파이프나 머플러 쪽에

사용되었으나 최근 핫스탬핑강 제작 과정에서 산화방지를 목적으로 비중있게 적용되고 있다. 실제 차체 조립 공정은 대부분 저항점용접이 적용되고 있는데, GI 강판의 경우 순수 아연 도금층의 존재에 따라 전류 밀도의 하락 및 전기전도도의 향상으로 발열량이 부족하게 되어 Fe-Zn 합금화도금인 GA 강판이 주로 사용되고 있다. 이에 따라 선행연구로서 우선적으로 GA 강판과 아무런 도금처리가 되어 있지 않은 CR 강판에 대해 AlSi3Mn 용가제로 다양한 입열 범위에서 BOP (Bead-on-plate) 접합 및 알루미늄과의 겹치기 이종접합을 실시하였다.

선행 시험결과 Fig. 6과 같이 GA 강판 및 CR 강판은 어떠한 입열 범위 및 공정변수 조절을 통해서도 BOP 및 겹치기 용접에서 건전한 접합부를 얻을 수 없었다. 특히 GA 강판의 경우 저전류 조건에서 전류를 증가시킬수록 다량의 스파터가 그에 비례하여 발생하였으며, 불규칙적인 비드가 형성될 뿐만 아니라 일부 용접 후 냉각과정에서 비드가 강판과 분리되는 현상도 나타났다. 한편 강판에 어떠한 도금도 되어있지 않은 CR 강판의 경우 비드가 넓게 퍼지지 못하고 냉접 형태의 결합이 발생되었으며 겹치기 용접 시에도 스틸 표면에 전혀 용착되지 못하고 비드가 알루미늄 쪽으로 치우치는 현상을 발견할 수 있었다. 기존에 발표된 일부 연구 결과^{13,19,20)}에서는 비록 접합강도는 낮지만 펄스 아크의 형태 조절을 통해 GA 강판과 알루미늄 간 이종접합에 성공했다고 발표하였지만, 계면 확산에 의한 이종접합 메커니즘과 본 실험 결과를 종합적으로 고려할 때 실제 접합 가능성에 의문이 든다.

반면 GI 강판에 Al 용가제로 BOP 용접을 실시한 실험에서는 Fig. 7과 같이 적정 입열 조건에서 스파터의 발생없이 안정적인 아크를 유지하며 양호한 비드를 얻을 수 있었다. 이때 적용된 용접조건은 전류 55 A, 전

Fig. 7 Results of the bead appearance, cross-section and intermetallic layer for BOP test on GI steel

압 6.9 V에 용접속도는 0.6 m/min이다. 접합부 후면에서는 도금층 일부가 부풀어 오르는 현상이 나타났는데, 이는 용접 시 후면까지의 열전달로 인해 기화점이 낮은 표면의 아연 도금 일부가 기화됨에 따라 발생한 것이다. 접합부의 단면을 살펴보면 알루미늄 용가제는 용융되는 반면 스틸은 녹지 않아 서로 계면접합이 이뤄진 것을 확인할 수 있다. 이러한 계면은 Fe/Al 금속간 화합물로 그 두께가 10 μm를 초과하게 되면 접합강도에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으나^{5,14,21)}, 본 실험에서는 그 두께가 약 3 μm 정도로 매우 양호한 계면접합부를 형성하였다.

3.2 초고속카메라를 통한 접합메커니즘 고찰

본 연구에서는 CMT 프로세스에서의 용적이행현상 및 도금 종류에 따른 차이를 보다 정성적으로 확인하기 위해 초고속카메라를 이용하여 관찰하였다. CMT 프로세스는 기본적으로 용적이 모재의 용융풀과 접촉하여 이행되는 저전류 영역의 단락이행 모드를 기본으로 한다. 이러한 단락이행 모드는 기본적으로 단락에 의한 아크의 소멸과 재발생이 반복적으로 발생되므로 용접 전류와 전압이 매 순간 급격하게 변화되며, 이에 따라 스파터가 항상 발생된다²²⁾. 특히 일반적인 단락이행 모드에서는 용적이 용융풀에 접촉하는 순간에 전기적으로 단락이 되므로 아크가 소멸하게 되고 이에 따른 아크의 저항이 없어지므로 용접전류가 급격히 증가하게 된다. 용접 전류는 단락이 유지되는 동안 중력과 용융지로부터의 표면장력에 의해 용융지로 이동하게 되는데, 단락 말기에는 단면적이 적어지면서 전류 밀도가 증가하여 저항열에 의한 단락부의 온도 상승과 전자기력에 의한 핀치효과(Pinch effect)가 추가되어 용융금속의 이행이

Fig. 6 Bead appearance of GMA brazed joint according to coating and joint type

Fig. 8 Schematic of welding current and voltage during metal transfer in CMT process

더욱 촉진되며 결국 용접재료와 용융지는 분리(단락부의 파단)가 된다. CMT 프로세스는 이와 같이 단락 순간에 전류를 낮추고 단락 종료 시 기계적으로 와이어를 당겨서 접촉부를 기계적으로 파단시킴으로서 스파터와 입열량을 줄이는 원리를 기본으로 한다. 이러한 기계적 파단을 유도하기 위해 CMT 프로세스에서는 메인 송급 장치와 서보송급 장치 사이에 버퍼(Buffer)를 두어 푸쉬-풀 송급이 가능한 형태로 제작되었으며 그 주기는 약 100 Hz 정도이다.

Fig. 8은 실제 GI 강판에 Al 용가재를 사용하여 BOP 용접을 하며 고속카메라로 측정한 결과로서 CMT 프로세스에서 각 단계별 단락이행과 전류 전압 변화 곡선에 대해서 도식화하였다. 한편 Fig. 9는 한 사이클에서의 단락이행 과정을 단계별로 보여주고 있다. 여기서 알루미늄 용가재는 용접이 이루어지고 스틸 판재는 브레이징 된다. 용가재는 단락이 유지되는 동안 용융되고 스틸의 도금층과 반응하여 젖음 반응(Wetting)이 일어나 넓게 퍼지게 된다. 단락 말기에는 용가재가 기계적으로 후진되어 접촉부가 강제 파단되며 이렇게 파단된 용적은 표면장력에 의해 용융지로 넓게 퍼진다. 전 주기에서 스파터의 발생은 없었으며 용융지의 유동 또한 안정화되어 있는 모습이 관찰되었다.

Fig. 9 High speed camera image of the one cycle metal transfer for BOP welding of GI steel sheet with aluminum filler wire

반면 GA 강판 및 CR 강판에서는 앞선 실험결과와 같이 어떠한 공정조건에서도 접합이 불가함을 확인하였으며, 이에 대한 BOP 고속카메라 관찰 결과는 각각 Fig. 10 및 Fig. 11에 제시하였다. 일단 GA강판의 BOP 용접 결과는 Fig. 10 (1)과 같이 단락이 유지되는 동안 용적의 부피가 매우 커지게 되며 기계적으로 단락을 종료시키는 순간(2)에 용융 용가재는 용융지로 이동되어야 하나 젖음성 부족으로 쉽게 용융지를 형성하지 못하고 용가재를 따라 같이 상승하게 된다. 이후 용가재와 모재 간 분리에 따라 다시 아크가 점화되면 (3, 4) 아크의 반발력으로 인해 용가재에서 분리가 되고(5), 이렇게 강제적으로 분리된 용적은 결국 다량의 스파터로 발생(6)되는 결과로 이어진다. 반면 CR 강판의 경우에는 스파터 발생의 문제보다는 스틸과 알루미늄 간 계면반응을 도와주는 매개체가 존재하지 않아 용접 후 Fig. 6과 같이 냉접(Cold weld) 형태의 비드가 형성된 것을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 11의 고속촬영 결과에서도 동일하게 나타난다. CR 강판 표면에 용융된 알루미늄 용가재는 스틸과 아무런 반응없이 용가재의 표면장력에 의해 큰 젖음각을 가지고 형성되며 결과적으로 매우 볼록한 비드를 형성하게 된다.

Fig. 10 High speed camera image of the one cycle metal transfer for BOP welding of GA steel sheet with aluminum filler wire

Fig. 11 High speed camera image of the one cycle metal transfer for BOP welding of CR steel sheet with aluminum filler wire

Fig. 12 Comparison of the Fe/Al dissimilar metal lap joint welding-brazing result depend on coating type

앞선 BOP 용접에서의 용적이행 현상은 Fe/Al 겹치기 용접에서도 동일한 결과로 나타난다. Fig. 12는 GI 및 GA 강판에서 동일한 용접 조건으로 겹치기 용접 시 나타나는 현상을 고속 촬영한 결과를 보여준다. GI 강판과 알루미늄 겹치기 용접의 경우는 일단 알루미늄 모재와 용가재로 인해 형성된 용융지가 강판 계면의 Zn로 인해 젖음성이 향상되면서 스틸 쪽으로 고루 퍼지는 형태를 나타낸다. 반면에 GA 강판의 경우 스틸 쪽에 젖음 반응이 일어나지 않아 다량의 스패터를 발생하며 용융풀이 모두 용융지의 표면장력만으로 인해 알루미늄 쪽으로 몰리게 되어 결국 스틸 표면과는 접합이 되지 않는다. 이와 같이 스틸과 알루미늄 간 이종접합은 도금 조건에 따른 제한이 있으며 성공적인 접합을 위한 적절한 매개체가 존재하여야 함을 고속카메라 관찰을 통해 확인하였다.

이상과 같은 실험을 통해 이종접합은 결국 스틸 표면의 코팅층이 일차적인 역할을 한다는 것을 확인할 수 있다. Agodo²³⁾는 Zn는 스틸 표면에서 용가재와 용융 알루미늄의 젖음성을 향상시킨다고 보고하였으며, 이러한 주장은 Cao¹⁴⁾ 및 Zhou¹⁵⁾의 연구결과로 이미 증명되었다. 일반적으로 젖음성을 결정짓는 요인으로는 표면의 계면에너지, 액상온도, 점성, 표면기질의 거칠기, 원자간 반응성 등 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 Fe-Zn 합금 도금층과 순수 Zn 도금층 그리고 아무런 도금이 되지 않은 CR 강판의 이종접합 특성이 각각 비교되었다. 앞서 각 소재의 도금 성분비에 대한 EDS 분석결과는 Fig. 2와 같이 GA 강판의 경우 12%의 Fe와 88%의 Zn으로 이루어졌으며, GI 강판은 거의 Zn 도금만 검출되었다. Fig. 13에 제시된 Fe-Zn 이원계상 태도에 의하면 GA 도금층의 용점은 약 930°C인 반면에 GI 도금층은 420°C에 불과하며, 특히 Zn의 경우 910°C 부근에서 기화가 이뤄진다. Zn의 낮은 용점과 기화점에 의해 알루미늄 용가재가 용융 시 Zn 코팅층은 높은 증기압을 가지며 기화되며, 일부는 용융상태로 표면에 남게 된다. 이때 기화되는 Zn는 아크의 잠열(Latent heat)을 빼앗아 보다 낮은 입열이 모재에 전

Fig. 13 Fe-Zn binary phase diagram

달되고 이는 결론적으로 낮은 반응온도와 시간으로 인해 금속간화합물 층의 확산을 최소화하게 되는 역할을 한다¹³⁾. 또한 기화 과정에서 모재 표면의 산화막은 제거되고 활성화된 금속 표면이 노출되어 모재에 대한 젖음성 및 유동성이 더욱 촉진된다. 한편 기화되지 않고 일부 액막(Liquid film) 형태로 남아있던 Zn는 용융 용가재에 의해 용해된다. 이렇게 용해된 Zn는 용융풀의 표면장력을 감소시키며 결과적으로 젖음성 향상과 함께 용접 토우부 양 끝단으로 넓게 퍼지게 된다.

반면 GA 도금층은 Fe-Zn 합금으로 구성되어 있으며 그 용점은 순수 Zn 도금에 비해 훨씬 높은 온도를 요구한다. 이에 따라 동일 입열 조건에서 접합 시 코팅층이 완전히 용융되지 않고 또한 산화막의 제거가 불충분하여 결과적으로 젖음성을 저해하는 요인이 된다. 용융되지 않고 남아있는 Fe-Zn 합금은 다량의 스패터를 유발한다.

마지막으로 아무런 도금이 되어있지 않은 CR 강판의 경우 또한 젖음성을 도와주는 매개체가 존재하지 않아 용가재의 퍼짐성이 극히 제한된다. 용융 알루미늄은 표면장력을 직접적으로 낮춰주는 Zn가 존재하지 않아 불룩한 비드가 형성되며, 이는 Fig. 11의 고속카메라 결과에서도 확인된다. 용융된 알루미늄은 스틸 표면과 직접적으로 접촉하게 되며 재료 상호간 열팽창계수 및 응고속도의 차이로 인해 응고 중 계면부 균열이 발생하게 되어 CR 강판 또한 결론적으로 이종접합이 불가하다.

3.3 Zn 도금 두께에 따른 영향

앞서 많은 연구자들이 도금층이 스틸과 알루미늄 간 이종접합에서 미치는 영향에 대해 연구하였으며, GI 강판이 이종접합에 적합한 도금으로 보고하였으나 아직 도금두께가 접합품질에 미치는 영향에 대한 연구 결과

는 없었다. 실제 이중접합에 관해 발표된 많은 문헌들은 단지 도금의 종류만 언급되었을 뿐 도금 두께까지 명시된 경우는 거의 없다. 도금층과 젖음성의 상관관계를 통해 접합 메커니즘을 규명한 일부 연구¹²⁻¹⁴⁾ 및 이중접합부의 부식 특성에 관한 연구 논문²⁴⁾에서만 실험에 사용된 강판 도금의 두께가 간략히 명시되었는데 공교롭게도 그 두께는 각각 $5.3\ \mu\text{m}$ ¹⁴⁾, $10\ \mu\text{m}$ ¹³⁾, $10\sim 15\ \mu\text{m}$ ²⁴⁾ 및 $13\sim 16\ \mu\text{m}$ ¹²⁾으로 모두 일정치 않았다. 이에 따라 본 실험에서는 도금 두께가 스틸과 알루미늄 간 접합부의 품질에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Fig. 3과 같이 도금 두께를 $2\sim 32\ \mu\text{m}$ 범위에서 4단계로 달리하여 제작한 후 접합부 품질에 대한 기계금속학적 특성을 분석하였다.

우선 동일한 용접조건에서 도금두께만 달리한 시편 위에 AlSi3Mn 용가재를 사용하여 BOP 시험을 실시하여 외관 및 단면을 관찰하였다. 실험 결과 $2\ \mu\text{m}$ 으로 가장 얇게 도금된 시료는 정상적인 BOP 용접이 이뤄지지 않았는데, 이는 아크열에 의해 기화되고 일부 용융 상태로 남아있는 Zn의 양이 너무 적어 용융지의 표면장력을 감소시키지 못하는 불충분하기 때문으로 사료된다. 반면 $11\ \mu\text{m}$ 이상의 두께를 갖는 시료에서는 모두 외관상 양호한 용접비드를 얻을 수 있었으며, 도금 두께에 따른 단면, 금속간화합물 층의 두께 및 스틸 이면부의 모습은 Fig. 14에 제시하였다. 우선 본 실험에 앞서 도금의 두께가 금속간화합물 층의 형성에 영향을 미칠 것으로 예상하였으나, 실제 분석결과 그 두께는 모두 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 범위로 측정되어 특별한 상관관계를 찾기에는 변별력이 부족하였다. 반면 단면 관찰 결과에서는

도금두께에 따라 용착금속의 면적 및 기공발생량에 의한 차이를 발견할 수 있었으며, 강판 이면부에서도 차이점을 발견하였다. 우선 각각의 알루미늄 용착금속 면적을 측정된 결과 $11\ \mu\text{m}$ 에서는 $4.88\ \text{mm}^2$, $20\ \mu\text{m}$ 에서는 $4.67\ \text{mm}^2$ 그리고 $32\ \mu\text{m}$ 에서는 $4.10\ \text{mm}^2$ 으로 도금 두께가 증가할수록 최대 15% 정도 용착금속 면적이 감소되는 것을 확인하였다. 이렇게 용착금속의 양이 줄어든 이유는 앞서 3.2절에서 언급한 아크 입열 공정 중 Zn의 거동을 통해 설명할 수 있다. 동일한 입열 조건에서 기화되는 Zn의 양이 많을수록 열에너지는 Zn에 의해 손실되고 이는 결국 전체적으로 용가재 용융량의 감소를 가져온다. 또한 고상 상태의 Zn가 순식간에 기화될 경우 나타나는 강한 증기압은 일부 빠져나가지 못하고 용착금속 내부의 기공으로 남게 된다. 이러한 이유로 동일 입열 조건에서도 용착금속과 기공 발생률에 대한 차이가 발생하는 것이며, 실제 BOP 단면에서의 기공률을 이미지분석기로 측정 결과 각각 3.69%, 4.49% 및 7.31%로 최대 2배 이상 나타났다. 또한 접합부 이면부에서도 도금층 부풀어 오름 현상 정도에 대한 차이가 명확하게 나타나는데 아크열이 이면부까지 열전달이 되며 기화점이 낮은 아연도금의 일부 기화로 인한 것이다.

접지기 용접 결과 또한 BOP와 유사한 결과를 보여 준다. 각각의 도금 두께에서 동일 입열로 용접 시 용융되는 용착금속의 양은 Fig. 15 및 Fig. 16과 같이 도금 두께가 두꺼워질수록 최대 5% 정도 감소된다. 또한 인장전단강도 또한 25% 이상 저하되는데 그 이유는 파단면 관찰을 통해 설명할 수 있다. 인장전단 시험 후 파단면에 존재하는 내부 기공의 양은 확연하게 차이가

Fig. 14 Effects of weldability and intermetallic layer growth depend on coating thickness at same welding condition of BOP test

Fig. 15 Variation of melting area and fracture section depend on coating thickness of the steel base metal

Fig. 16 Variation of joint strength depend on coating thickness of the steel base metal

난다. 여기서 발생된 내부 기공은 일반적으로 알루미늄 용접에서 수소의 흡착에 의해 발생되는 미세한 기공과 기화된 Zn가 응고 시 용융지 표면으로 방출되지 못하여 용착금속 내에 잔류하여 발생된 기공이 복합적으로 작용되어 인장강도가 저하되는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 아크 열원을 이용한 스틸과 알루미늄 간의 이종접합에 대해 연구하였으며, 도금에 따른 차이점과 젖음성과 관련된 접합메커니즘을 고속카메라 관찰을 통해 규명하고자 하였다. 또한 도금의 종류뿐만 아니라 두께가 접합 품질에 미치는 영향에 대한 연구도 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Fe/Al 소재 간 이종접합에서 스틸 도금 종류에 따라 접합성에 큰 차이를 나타냈는데 이는 도금층의 용점에 기인한다. GA 강판의 경우 도금층의 용점이 930℃로

420℃에 불과한 GI에 비해 보다 높은 용점으로 인해 도금층이 충분히 용융되지 않아 젖음성이 저하되어 다량의 스패터 발생과 함께 어떠한 조건에서도 접합이 이루어지지 않았다.

2) 도금층의 두께에 따른 접합성을 검토한 결과, 11 μm 이상의 두께를 갖는 시료에서는 모두 외관상 양호한 용접비드를 얻을 수 있었으며 금속간화합물 층의 두께는 모두 2~3 μm 범위로 측정되어 특별한 상관관계를 찾을 수 없었다.

3) Zn 도금층의 두께가 두꺼워질수록 용착금속의 양은 최대 5% 정도 감소되며 인장전단강도 또한 25% 이상 저하되었다. 이는 도금 두께가 두꺼울수록 Zn로 인한 내부 잔류 기공의 발생이 많아지기 때문이며, Zn 기화에 의해 손실된 열에너지 차이로 인해 전체적으로 용가재의 용융량은 감소된다.

ORCID: Yong Kim: <https://orcid.org/0000-0002-7181-5851>

References

1. D. Achar, J. Ruge and S. Sundaresan, Joining aluminum to steel, with particular reference to welding, *Aluminum-Verlag*, (1980), 4
2. S.B. Lin, J.L. Song, C.L. Yang, C.L. Fan and D.W. Zhang, Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler wire, *Materials & Design*, 31(5) (2010), 2637-2642
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.005>
3. Honggang Dong, Wenjin Hu, Yuping Duan, Xudong Wang and Chuang Dong, Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al filler wires, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2) (2012), 458-464
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.009>
4. J. Bruckner, Cold metal transfer has a future joining steel to aluminum, *Welding Journal*, 84(6) (2005), 38-40
5. H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl, Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminum zinc coated steel joints made by modified metal inert gas welding-brazing process, *Materials Characterization*, 58(7) (2007), 588-592
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.07.008>
6. H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He, B.B. Zhang, J.M. Chen and L. Wang, The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminum to zinc-coated steel, *Materials Science and Engineering A*, 499(1-2) (2009), 111-113
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.124>
7. Hongtao Zhang and Jiakun Liu, Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy / stainless steel lap joints fabricated by MIG welding -

- brazing process, *Materials Science and Engineering, A* 528(19-20) (2011), 6179-6185
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.039>
8. Yongchao Su, Xueming Hua and Yixiong Wu, Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum-steel lap joint made by gas metal arc welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4) (2014) 750-755
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.11.022>
 9. 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*, 66 (2015), 453-458
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.026>
 10. Liu Jia, Jiang Shichun, Shi Yan, Ni Cong, Chen Junke and Huang Genzhe, Effects of zinc on the laser welding of an aluminum alloy and galvanized steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 224 (2015), 49-59
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.017>
 11. Song Niu, Su Chen, Honggang Dong, Dongsheng Zhao, Xiaosheng Zhang, Xin Guo and Guoqiang Wang, Microstructure and properties of lap joint between aluminum alloy and galvanized steel by CMT, *Journal of Material Engineering and Performance*, 25(5) (2016), 1839-1847
<https://doi.org/10.1007/s11665-016-2035-2>
 12. 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, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9-12) (2016), 1495-1506
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7505-4>
 13. 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*, 214(12) (2014), 2949-2959
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.017>
 14. R. Cao, Gang Yu, J.H. Chen and Pei-Chung Wang, Cold metal transfer joining aluminum alloys to galvanized mild steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(10) (2013), 1753-1763
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.004>
 15. Yanlin Zhou and Qiaoli Lin, Wetting of galvanized steel by Al4043 alloys in the first cycle of CMT process, *Journal of Alloys and Compounds*, 589(2014), 307-313
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.177>
 16. Yao Liu, Wenjing Wang, Jijia Xie, Shouguang Sun, Liang Wang, Ye Qian, Yuan Meng and Yujie Wei, Microstructure and mechanical properties of aluminum 5083 weldments by gas tungsten arc and gas metal arc welding, *Materials Science and Engineering, A* 549 (2012), 7-13
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.108>
 17. Yongchao Su, 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(1) (2014), 81-86
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.002>
 18. Shanglu Yang, Jing Zhang, Jin Lian and Yongpin Lei, Welding of aluminum alloy to zinc coated steel by cold metal transfer, *Materials & Design*, 49 (2013), 602-612
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.045>
 19. Hyoungho Jin Park, Sehun Rhee, Mun Jin Kang and Dong Cheol Kim, Joining of steel to aluminum alloy by AC pulse MIG welding, *Material Transactions*, 50(9) (2009), 2314-2317
<https://doi.org/10.2320/matertrans.m2009105>
 20. A. Das, M. Shome, C. R. Das, Sven-F Goecke and A. De, Joining of galva-annealed steel and aluminum alloy using controlled short circuiting gas metal arc welding process, *Science and Technology of Welding and Joining*, 20(5) (2015), 402-408
<https://doi.org/10.1179/1362171815y.00000000032>
 21. H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl, Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminum zinc coated steel joints made by a modified metal inert gas welding - brazing process, *Material Characterization*, 58(7) (2007), 588-592
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.07.008>
 22. 유중돈, 나석주, 아크 용접, 대한용접접합학회 (2011) 129
 23. Leonardo Agudo, Dominique Eyidi, Christian H. Schmaranzer, Enno Arenholz, Nasrin Jank, Jürgen Bruckner and Anke R. Pyzalla, Intermetallic Fe_xAl_y-phases in a steel/Al alloy fusion weld, *Journal of Material Science*, 42 (2007), 4205-4214
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0644-0>
 24. Minjung Kang and Cheolhee Kim, Joining Al5052 alloy to aluminized steel sheet using cold metal transfer process, *Materials & Design*, 81 (2015) 95-103
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.035>