

1000MPa급 DP강 MIG 아크 브레이징 접합부의 기계적 성질에 미치는 브레이징 전류의 영향

조옥제* · 윤태진**,† · 곽승윤*** · 이재형*** · 강정윤***,†

*현대머티리얼 환경사업팀

**부산대학교 소재기술연구소

***부산대학교 재료공학과

Effects of Brazing Current on Mechanical Properties of Gas Metal Arc Brazed Joint of 1000MPa Grade DP Steels

Wook-Je Cho*, Tae-Jin Yoon**,†, Sung-Yun Kwak***, Jae-Hyeong Lee***
and Chung-Yun Kang***,†

*Hyundai materials, business environment team, Ulsan 44781, Korea

**Institute of materials technology, Pusan National University, Busan 46241, Korea

***Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr, tjyoon@pusan.ac.kr

(Received November 22, 2016 ; Revised February 2, 2017 ; Accepted February 15, 2017)

Abstract

Mechanical properties and hardness distributions in arc brazed joints of Dual phase steel using Cu-Al insert metal were investigated. The maximum tensile shear load was 10.4kN at the highest brazing current. It was about 54% compared to tensile load of base metal. This joint efficiency is higher than that of joint of DP steel using Cu-based filler metals which are Cu-Si, Cu-Sn. Fracture positions can be divided into two types. Crack initiation commonly occurred at three point junction among upper sheet, lower sheet and the fusion zone. However crack propagations were different with increasing the brazing current. In case of the lower current, it instantaneously propagated along with the interface between fusion zone and upper base material. On the other hand, in case of higher current, a crack propagation occurred through fusion zone. When the brazing current is low (60, 70A), the interface shape is flat type. However the interface shape is rough type, when the brazing current is high (80A). It is thought that the interface shapes were the reason why the crack propagations were different with brazing current. The interface was the intermetallic compounds which consisted of $(Fe,Al)_{0.85}Cu_{0.15}$ IMC formed by crystallization at 1200°C during cooling. Therefore the maximum tensile shear load and the fracture behavior were determined by a interface shape and effective sheet thickness of the fracture position.

Key Words : DP steel, Gas Metal Arc brazing, Cu-Si filler metal, Microstructure, Tensile shear test

1. 서 론

최근 자동차 차체 부품의 접합 방법으로 아크브레이징(Arc Brazing)에 대한 관심이 높아지고 있다¹⁾. 독일 용접 협회(German Welding Association, DVS)는 아

크 브레이징의 원리를 다음과 같이 정의하고 있다. 피접합재 보다 낮은 용점의 삽입금속과 피접합재 사이에 Metal inert gas(MIG), Metal active gas(MAG), Gas tungsten arc(TIG) 용접장치를 이용하여 아크를 발생시킨다. 이 때 아크에 의하여 상대적으로 용점이 낮은 삽입금속만 먼저 용융되고, 용융된 삽입금속과 모

재와의 상호확산(Diffusion)에 의한 반응 및 용융된 삽입금속이 모세관 현상에 의하여 모재의 틈을 채워 접합이 되는 원리이다²⁾. 아크브레이징의 차체 적용 사례는 자동차 산업에 아크브레이징 개념이 소개되기 전인 1970년대 초반 폭스바겐(Volkswagen)사의 비틀(Beetle) 모델에 화염(Oxy fuel gas flame)을 이용하여 처음 적용이 되었다고 알려진다³⁾. 그 후 MIG 아크 브레이징 개념이 정립되었고 오늘날 자동차 회사들은 자동차 후면 패널의 일부 부분에 Metal shielding gas(MSG) 브레이징과 플라즈마(Plasma) 브레이징을 산업용 로봇을 이용하여 적용하고 있다⁴⁾.

아크브레이징의 장점은 접합 시 모재가 녹지 않을 정도로 입열량이 낮기 때문에 열영향부가 작고, 낮은 온도로 접합이 가능하기 때문에 용접 시 아연의 증발에 의한 결함이 많이 발생하는 아연도금소재에도 적용이 가능하고^{5),6)}, 열팽창계수가 달라서 용접이 어려웠던 이종소재에도 적용이 가능하다^{7,8)}. 또한 모재 용융에 의한 변형, 기공, 크랙과 같은 용접결함 및 스파터 또는 흠 등의 환경문제 유발물질의 발생이 적은 장점을 가지고 있다⁹⁾.

아크브레이징 관련 선행연구는 주로 알루미늄-스틸 이종소재 또는 아연도금강판¹⁰⁾, Transformation Induced Plasticity(TRIP)강¹¹⁾, Dual Phase(DP)^{12,13)} 강판에 적용한 것이 주를 이루고 있다. 자동차용 DP 강판에 아크브레이징을 적용한 경우, 접합부를 형성하는 삽입금속의 합금성분에 따라서 접합부 강도가 결정되며, 삽입금속은 Cu-x%Sn¹²⁾, Cu-x%Si¹³⁾ 이 사용되고 있으나, Cu-x%Sn 과 Cu-x%Si 삽입금속을 적용할 경우 접합부의 강도가 각각 모재 대비 약 30%, 37%로 아주 낮은 문제점이 보고되고 있다.

본 연구에서는 자동차 차체용 소재로 적용되고 있는 1000MPa급 DP강에 Cu-Al 삽입금속을 이용한 아크브레이징을 적용하여 접합부의 기계적 성질에 미치는 브레이징 전류조건에 영향을 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 소재는 두께 1.4 mm의 Dual Phase(DP)강이며, 화학조성과 기계적 성질은 Table 1에 나타낸다. Fig. 1은 아크 브레이징 장치를 설명하는 모식도를 나타낸다. 시험편은 200(L)×100(W)mm으로 가공하였고, 접합부의 길이는 시험편의 길이를 모두 활용하여 약 200mm로 하였다. 아크 브레이징은 GMAW 자동 용접기를 사용하여 실시하였다. 아크가 삽입금속과 모재의 사이에서 발생 될 수 있도록 토치는 상편과 15° 로 기울

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of raw materials(wt%)

C	Mn	Si	Mo	N	Nb	Ti	Fe
0.108	3.187	0.167	0.008	0.009	0.05	0.013	Bal.

Hardness(Hv)	Y.S(Mpa)	T.S(Mpa)	El(%)
340	728	1040	17.65

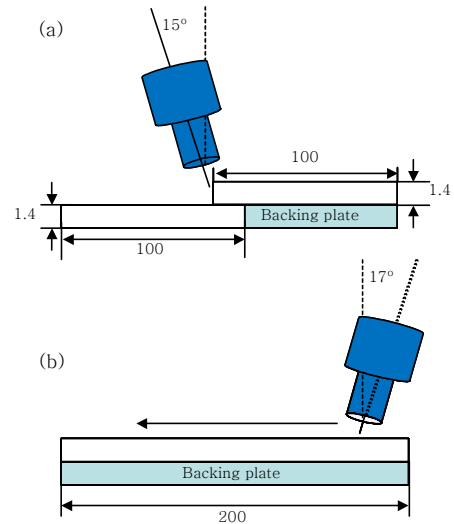


Fig. 1 Schematic drawings of experimental procedure (a) front view,(b) side view

였고, 모재와 전극간의 거리(Contact to Work Distance : CTWD)는 10mm 으로 고정하였다. 브레이징 속도는 800mm/min, 질량은 아르곤가스를 20 l/min의 속도로 하였다. 아크브레이징 시 전류의 영향을 알아보기 위하여 전류값은 60, 70, 80A 세 조건으로 변화하였다.

아크 브레이징한 접합부의 미세조직 관찰은 접합부의 수직방향으로 절단한 시험편의 단면을 마운팅 한 후, 자동 연마기(Multiprep 4™ auto-polisher, Allied High Tech.)와 1 μm 다이아몬드연마제를 이용하여 경면 연마한 후, 나이탈(HNO₃ 2ml+C₂H₅OH 98ml) 용액으로 수초간 부식시켜, 광학현미경(Olympus-BX51M, Nikon ECLIPSE 모델의 Optical microscopy:OM)과 주사식 전자현미경(Hitachi S-4800 모델의 Scanning Electron Microscope:SEM) 으로 관찰하였다

접합부의 기계적성질은 경도와 인장전단시험으로 평가하였다. 접합부와 모재의 경도분포는 비커스경도시험기(Mitutoyo, mvk-H100)를 사용하여 하중(load)은 300 gf, 유지시간은 10 초로 하여 측정하였다. 인장전단 시험은 만능시험기(Instron universal testing machine)를 이용하여 ASTM A370의 인장시험 규격으로 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 아크 브레이징 접합부의 외관 및 단면

Fig. 2(a-c)는 아크 브레이징한 접합부의 브레이징 전류에 따른 비드의 표면 사진을 나타낸 것이고, Fig. 2(d-f)는 접합부 단면의 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. Fig. 2(a-c)의 비드 표면 사진으로부터 시작부 부터 종료부 까지 비드형상이 안정하며, 기공, 크랙 등의 표면결함이 없는 것을 알 수 있다. Fig. 2(d-f)의 접합부 단면 사진으로부터, 삽입금속 내부의 기공 및 불완전 용입 등의 내부 결함이 발생하지 않았다.

3.2 브레이징 전류에 따른 인장하중 및 파단 위치 분석

브레이징한 시편은 표면 육안 검사 시 결함이 관찰되지 않았기 때문에 접합부의 강도를 알기 위하여 인장전단시험을 실시하였다. Fig. 3은 브레이징 전류에 따른 인장전단하중을 나타낸 것이다. 최대인장전단하중은 브레이징 전류가 증가함에 따라 10.9kN 까지 증가하는 것을 알 수 있다. 이때의 파단 형태를 알기 위하여 인장전단 시험 후 파단 된 시편을 분석하였다.

Fig. 4는 파단된 시편 단면의 OM사진을 나타낸 것이다. 이것으로부터 파단위치는 삽입금속의 용융부와 하판의 계면에서 파단되는 전단파단이 아닌 삽입금속의 용융부와 상판 사이의 임의의 지점에서 파단되는 인장파단인 것을 알 수 있다.

한편, 인장전단시험 시 얻어진 최대하중이 나타내는 모재대비 접합효율을 알기 위하여, 모재 인장시험을 실시하였다. 시험 후 얻어진 모재의 인장강도(MPa)는 인장전단시험의 하중(Load)과 비교 할 수 없기 때문에 모재 인장강도를 하중(Load)으로 환산하였다. 겹치기 이음부의 인장전단하중은 강도(σ)와 파단부 면적(A)의 곱으로 정의되므로¹⁴⁾ 모재강도에 단면적을 곱하여 계산

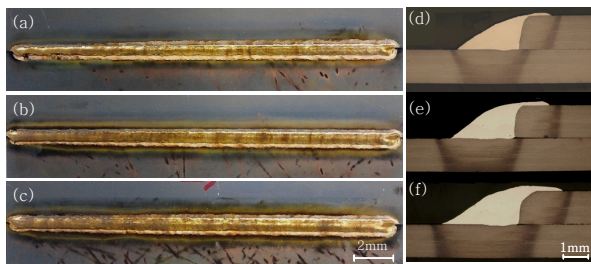


Fig. 2 Pictures of bead surface(a,b,c) and OM images of cross section(d,e,f) brazed specimens with brazing current: (a),(d) 60A. (b),(e) 70A and (c),(f) 80A

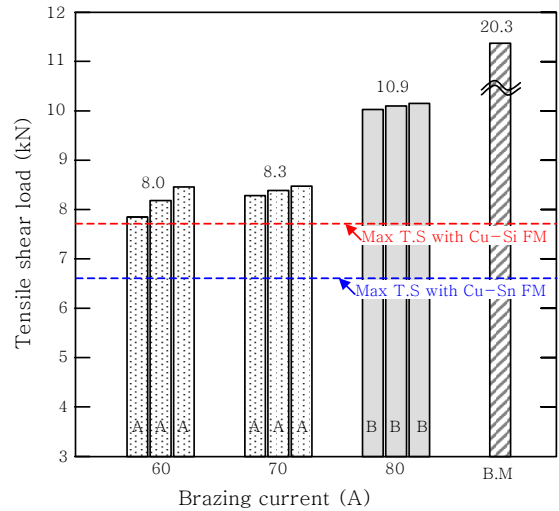


Fig. 3 Tensile load with brazing current as compared with the maximum load of base metal and literatures

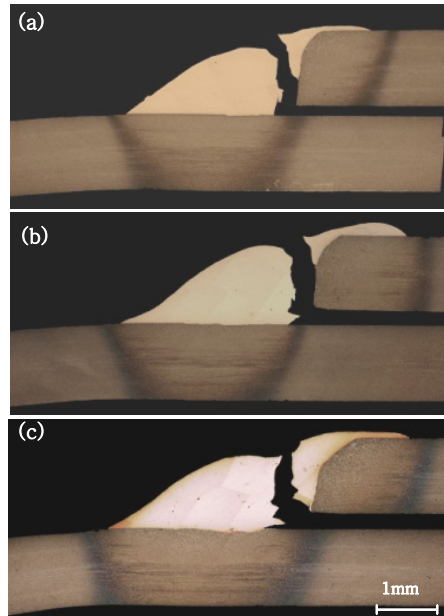


Fig. 4 OM images for cross section of fractured specimens with brazing current: (a) 60A, (b) 70A, (c) 80A

한 후 접합부의 최대 하중과 비교하였다. 이것으로부터 접합부의 접합효율은 모재 대비 약 39%~54% 수준인 것을 알 수 있다.

선행연구에 의하면 DP강에 다양한 Cu기 삽입금속을 이용하여 아크브레이징 한 접합부의 최대 접합효율은 Cu-Sn을 삽입금속으로 사용 할 경우 약 30% 미만¹²⁾, Cu-Si을 삽입금속으로 사용 할 경우 약 37%의 매우 낮은 값으로 보고¹³⁾되었으나, 본 연구에서 Cu-Al을 삽입금속으로 사용 시 접합효율은 기존 최대 접합효율 대비 약 97% 향상된 것을 알 수 있다.

3.3 접합부 파단원인 및 최대하중 저하 원인 분석

Fig. 4에서 모든 시험편의 파단위치가 접합부인 것을 알았다. 접합부에서 파단이 발생하는 이유를 분석하기 위하여, 접합부부터 모재까지 경도분포를 측정하여 보았다. Fig. 5는 브레이징 전류에 따른 접합부에서 모재까지의 연속적인 경도 분포를 나타낸 것이다. 접합부의 경도값이 가장 낮고, 접합부와 모재의 경계에서 최대 경도값을 나타내고, 모재 열영향부로 생각되는(-1.8~-2.4) 영역에서 경도값이 낮은 것을 알 수 있다.이것으로부터 Cu-Al 합금 용융부, HAZ, 모재의 경도값을 비교하였을 때, 접합부의 경도값이 HAZ 경도값보다 낮기 때문에, 접합부에서 파단이 발생한 것으로 생각된다.

인장전단 시험 후 시험편의 파단위치가 모두 접합부이지만, 인장전단하중의 차이가 생기는 것을 알기 위하여 파단위치를 자세히 조사하였다.

Fig. 6(a)와 (d)는 브레이징 전류 60A와 80A인 경우, 파단된 시험편의 파단기점부터 파단경로를 광학현미경으로 관찰한 사진을 각각 나타낸 것이고, Fig. 6(b), (e)는 Fig. 6(a),(d)의 단면을 예칭한 후 사각형으로 표시한 파단부의 계면부를 확대한 광학현미경 사진을 나타낸 것이고, Fig. 6(c),(f)는 파단발생 및 파단경로를 설명하는 모식도를 나타낸 것이다. 이것으로부터 파단 형상이 비슷하지만 브레이징 전류조건에 따라 파단 경로가 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 파단은 두 가지 형태로 분류 할 수 있다. 첫 번째 파단형태는 상판과 하판, 삽입금속의 3중점에서 균열이 최초 생성된 후 상판과 삽입금속사이 계면으로 균열이 전파되다가 일정위치에서 균열의 전파방향이 삽입금속 쪽으로 변하게 되며 최종적으로 삽입금속을 통해 파단이 완료된다. 두 번째 파단형태는 상판과 하판, 삽입금속의 3중점에

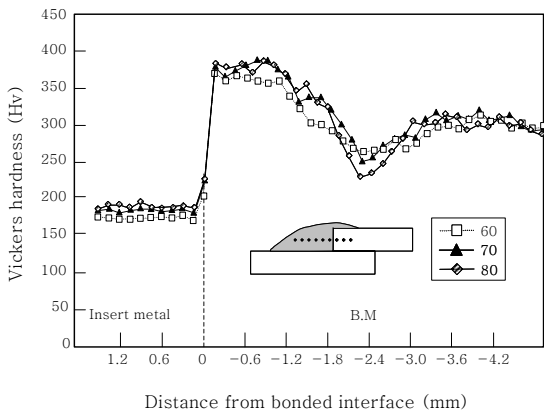


Fig. 5 Hardness distributions divided three different zones (ie the brazed zone, HAZ and base metal) with brazing current

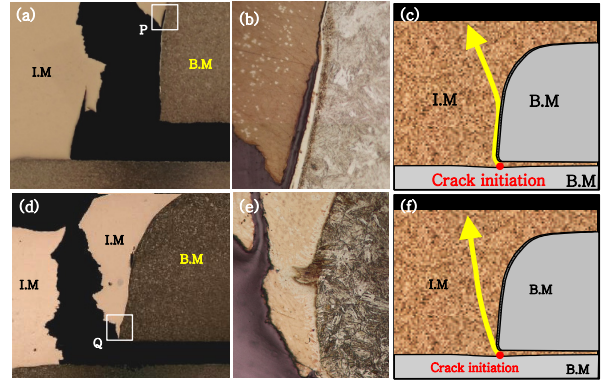


Fig. 6 Low magnification(a,d) and high magnification(b,e) of the fractured position and illustrations(c, f) with fractured types

서 균열이 발생하고 이 균열이 삽입금속을 통해서 전파된 후 최종적으로도 삽입금속을 통해서 파단이 완료된다.

파단형태와 인장전단하중을 비교할 때, Fig. 3에 나타낸 것과 같이 첫 번째 파단 형태와 두 번째 파단형태의 인장전단하중이 각각 약 8kN, 10.9kN으로 상이한 것을 알 수 있다. 이처럼 파단 형태가 나뉘는 이유는 Fig. 6(b,e)의 파단부 계면 확대 조직으로부터 용융삽입금속과 모재와의 접합계면에서의 반응층의 형상과 있을 것이라 생각하여, 접합계면을 자세히 관찰하였다.

Fig. 7은 파단 전 접합부의 계면을 확대한 SEM 사진을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 첫 번째 파단타입의 계면이고, Fig. 7(b)는 두 번째 파단타입의 계면이다. 이것으로부터 접합계면을 따라 연속적으로 파단된 첫 번째 타입은 밴드형상의 편평한 반응층이 접합계면에 생성되는 것이 특징이고, 접합부 내부로 파단된 두 번째 타입은 블록 블록한 형상의 반응층이 접합계면에 생성되는 것이 특징이다.

이와 같이 반응층이 일반적으로 나타나는 편평한 형상 (flat-joint)이 아니라, 울퉁불퉁한 형상(non-flat joint)으로 생기는 경우, 반응층의 요철작용에 의하여 응력이 분산되는 인터락킹(Interlocking)현상이 일어나기 때문에 파단은 접합계면을 따라서 발생하는 것이 아니라 접합부를 가로질러 발생하는 것으로 생각된다¹⁵⁾. 인터락킹 현상은 브레이징 전류가 증가하여, 입열량이 커짐

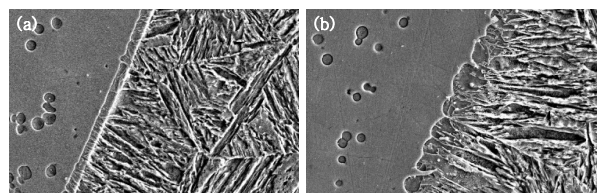


Fig. 7 Magnified SEM images at brazed interface showing the lower load(a) and higher load(b)

에 따라 삽입금속과 모재 간 접합계면의 반응량이 증가하여 생기는 현상이라 생각된다.

한편, 접합계면에 생성된 반응층의 종류를 분석하기 위하여 모재-삽입금속으로 이루어진 접합부를 전해추출 시험을 통하여 삽입금속부분만을 일부 녹여내었다. 추출된 시편은 SEM, EDX를 이용하여 분석하였고, 그 결과를 Fig. 8과 Table 2에 각각 나타낸다.

SEM 미세조직과 EDX 성분분석에서 확인 할 수 있듯이 삽입금속부와 모재부 사이에 수 um두께의 계면반응층이 존재하고 있음을 알 수 있으며, 그 조성은 (Fe,Al)_{0.85}Cu_{0.15} 상인 것을 알 수 있다.

반응층의 구성성분이 Fe, Al, Cu로 이루어져 있는 것으로 보아 아크브레이징 시, 모재의 용융에 의해 모재성분(Fe)이 삽입금속부내로 유입되어 삽입금속 성분과 반응하여 형성된 반응 생성물로 생각되어진다.

반응층의 형성 메커니즘을 고찰하기 위하여 열역학 시뮬레이션 소프트웨어인 Thermo-Calc.(TCW5)를 사용하여 상태를 계산하였다. 입력데이터는 삽입금속부의 저배율 EDX 성분 분석 결과를 이용하였고, 계산된 평형 상태를 Fig. 9에 나타낸다. 아크브레이징 과정에서 삽입금속과 모재의 일부가 용융되고, 냉각하면서(약 1200℃) BCC 결정구조를 가지는 (Fe,Al)_{0.85}Cu_{0.15} 상이 정출되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 (Fe,Al)_{0.85}Cu_{0.15} 상의 온도에 따른 Fe, Al, Cu 조성을 나타낸다. 완전 용융되어 액상이 되기 전까지 온도에 따라 다소 변화는 있지만 Fe:Al:Cu = 65:20:15 비율을 이루고 있는 것으로부터 (Fe,Al)_{0.85}Cu_{0.15} 상임을 확인 할 수 있다.

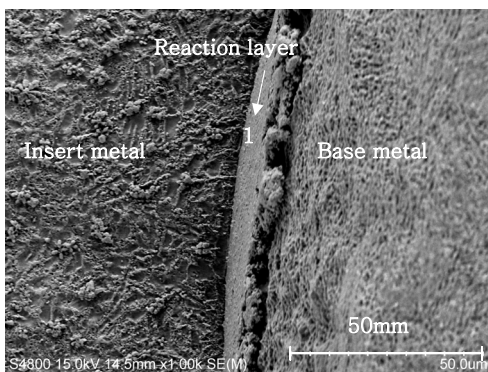


Fig. 8 SEM image of joint interface of the electro-extracted specimen

Table 2 EDX analysis results of arrow pointed Fig. 8 (at%)

Cu	Al	Fe	Mn
14.2	18.6	67.2	-

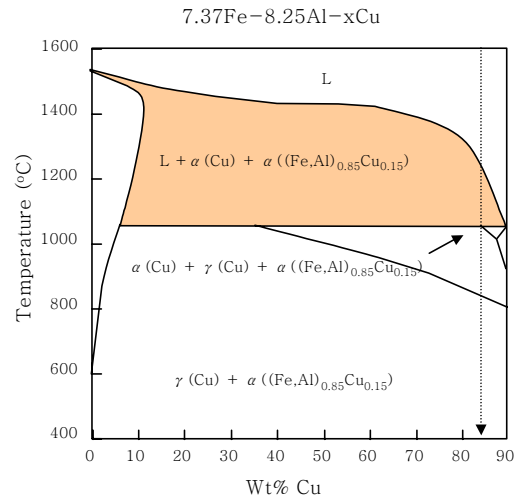


Fig. 9 Phase diagrams of binary system with the contents of Cu conducted by Thermo-Calc

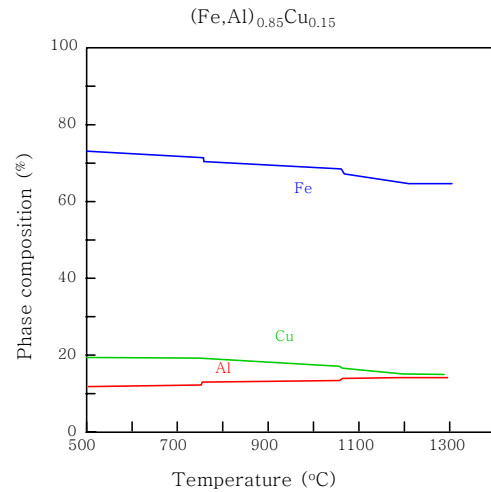


Fig. 10 Variations of phase composition with changing the temperature by Thermo-Calc

브레이징 전류에 따라 즉, 입열량에 따라 파단위치가 다른 이유는 계면 반응층의 형상이 다르기 때문이고, 이것은 입열량에 따른 모재용융량의 차이가 있을 것이라 생각하였다. 따라서 브레이징 전류에 따른 모재용융량을 정량화 하였다. 또한, 인장전단하중은 파단부 면적이 중요한 인자가 된다. 파단부의 면적은 인장시편의 폭(width)이 모두 동일하므로 파단면의 파단부 길이인 파단부의 유효두께(Effective Sheet Thickness, EST)로 비교하였다¹⁶⁾.

Fig. 11(a)는 파단위치의 유효두께와 브레이징 시 모재용융부(Length of insert metal:L_{IM})와 접합계면(Length of interface:L_{IF})을 정의한 모식도이고, Fig. 11(b),(c)는 Fig. 2에서 나타낸 브레이징 전류 60A와 80A 조건의 접합부 단면에 Fig. 11(a)의 정의된 영역을 표시한 모식도를 나타낸다.

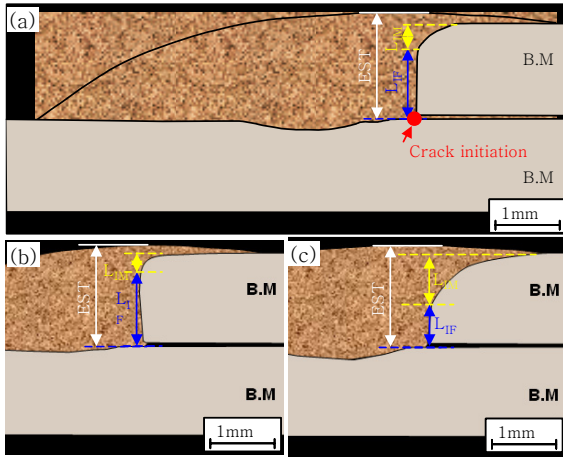


Fig. 11 (a) a schematic illustration describing the definition of effective sheet thickness(EST) and length of insert metal(L_{IM}) and interface(L_{IF}) and illustrations of joint interface: (b) lower current, (c) high current

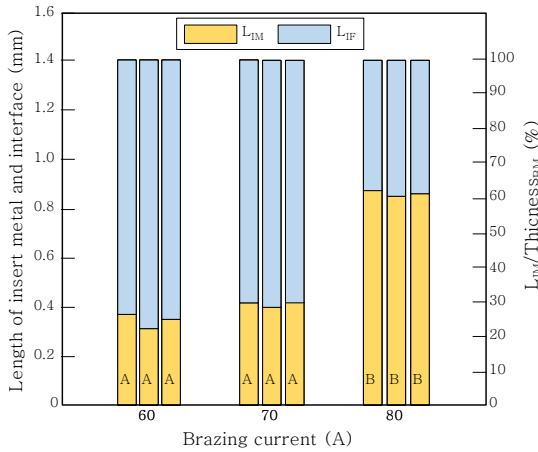


Fig. 12 Length of insert metal, interface and ratio between length of insert metal and thickness of base material with brazing current

Fig. 12와 Fig. 13은 브레이징 전류에 따른 모재용융부(L_{IM})와 접합계면(L_{IF})의 길이와 파단위치의 유효 두께와 인장전단하중과의 관계를 Fig. 11의 정의와 같이 측정하여 정량화 한 그래프이다. Fig. 12로부터 브레이징 전류가 증가함에 따라 모재용융부가 증가하는 경향을 나타내며, 모재 두께 대비 약 60% 이상 모재가 부분 용융될 경우 파단위치가 바뀌는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 13으로부터 첫 번째 파단형태(A), 두 번째 파단형태(B)의 인장전단하중은 유효두께와 직선적인 관계를 가지는 것을 알 수 있고, 두 번째 파단형태의 경우 (B) 유효두께가 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 브레이징 입열량이 클 경우, 삽입금속과 모재의 부분 용융량이 많아서 유효두께가 더 큰 것으로 생각된다.

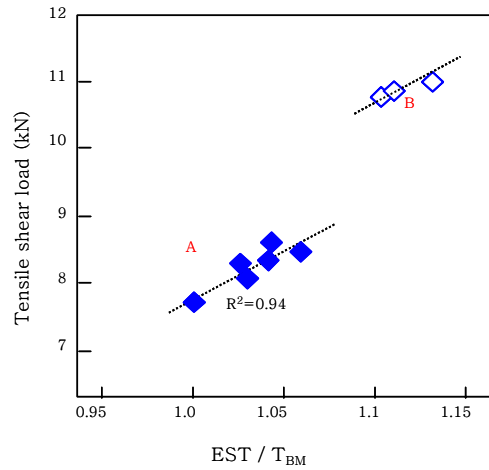


Fig. 13 Relationship between tensile load and EST/T_{BM}

4. 결 론

1000MPa급 DP강에 Cu-13.3wt%Al 삽입금속을 적용한 MIG 아크 브레이징 접합부의 기계적 성질에 미치는 브레이징 전류 조건의 영향에 대하여 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 브레이징 전류가 증가함에 따라 인장전단하중은 증가하였으며, 최대인장전단하중은 모재대비 약 54% 이었고, 모든 조건의 시편이 접합부에서 파단되었다.

2) 자세한 파단위치는 두 가지로 분류 된다. 저 전류인 경우, 상판과 하판, 삽입금속의 3중점에서 최초 균열이 발생하고 접합계면을 따라 연속적으로 파단이 발생하였고, 고 전류인 경우 삽입금속을 가로 질러 파단이 발생하였다. 후자인 경우 하중이 더 높았다.

3) 전류에 따라 파단위치가 다른 이유는 접합계면에서 생성되는 반응층의 형상 때문이었다. 저 전류인 경우 편평한 형상의 반응층이 생성되었고, 고 전류인 경우 울퉁불퉁한 형상의 반응층이 생성되어 반응층에 의한 락킹 현상으로 계면이 강화 되었다.

4) 계면에서 생성된 반응층은 $(Fe,Al)_{0.85}Cu_{0.15}$ 상 이었으며, 반응층의 구성성분이 Fe, Al, Cu인 것으로부터, 모재가 부분적으로 용융되어 모재성분이 삽입금속내로 유입되어 삽입금속 성분과 반응하여 형성된 반응 생성물로 생각된다.

5) 접합부의 경도는 모재와 HAZ의 경도값보다 낮기 때문에 용융부에서 파단이 발생하였고, 피크하중은 파단발생 지점의 반응층의 형상과 파단부의 유효두께에 따라 결정되었다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원

으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2012R1A5A1048294).

References

1. Guoliang Qin, Yuhu Su, Xiangmeng Meng, Banglong Fu, Numerical simulation on MIG arc brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel plate, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78 (9), (2015), 1917
2. German Welding Association (DVS), Arc Brazing - Principles and Requirements for System Technology - DVS-Verlag Düsseldorf, *Information Sheet 0938-1 September* (2001)
3. Norbert Knopp, Mündersbach and Robert Killing, Arc brazing - Innovative, safe and economical, *EWM HIGHTEC WELDING GmbH*, WM023401, 08.03 (2003), 1
4. Yajuan Jin, Ruifeng Li, Zhishui Yu, Yu Wang, Microstructure and Mechanical Properties of Plasma Arc Brazed AISI 304L Stainless Steel and Galvanized Steel Plates, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25 (4) (2016), 1327
5. Rui-feng LI, Zhi-shui YU, Kai QI, Interfacial structure and joint strengthening in arc brazed galvanized steels with copper based filler, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16 (2) (2006), 397
6. Zhi-shui YU, Rui-feng LI, Kai QI, Growth behavior of interfacial compounds in galvanized steel joints with CuSi3 filler under arc brazing, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16 (6) (2006), 1391
7. Hong Ma, Guoliang Qin, Xiaoyang Bai, Liyuan Wang, Zhida Liang, Effect of initial temperature on joint of aluminum alloy to galvanized steel welded by MIG arc brazing-fusion welding process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86 (9), (2016), 3135
8. Yufeng Zhang, Jihua Huang, Zhi Cheng, Zheng Ye, Hai Chi, Li Peng, Shuhai Chen, Study on MIG-TIG double-sided arc welding-brazing of aluminum and stainless steel, *Materials Letters*, 172 (1) (2016), 146
9. S. L. Yang and R. Kovacevic, Welding of Galvanized Dual-Phase 980 Steel in a Gap-Free Lap Joint Configuration, *Welding Journal*, 88 (2009), 168
10. P. Makwana, M. Shome, S.-F. Goecke, A. De, Wetting length in gas metal arc brazing of galvanized steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, (2016), 1
11. C. Chovet, S. Guiheux, Possibilities offered by MIG and TIG brazing of galvanized ultra high strength steels for automotive applications, *la metallurgia Italiana*, 7 (2006), 47
12. Wook-Je Cho, Young-Ho Cho, Jung-Gil Yun and Chung-Yun Kang, Microstructure and Tensile Strength Property of Arc Brazed DP steel using Cu-Sn Insert Metal, *Journal of KWJS*, 31 (1) (2013), 58 (in Korean)
13. Wook-Je Cho, Tae-Jin Yoon, Sung-Yun Kwak, Jae-Hyeong Lee, Chung-Yun Kang, Microstructure and Mechanical Properties of Gas Metal Arc Brazed Joint of DP Steel with Cu-Si Filler Metal, *Journal of KWJS*, 34 (5) (2016), 70 (in Korean)
14. Yasunobu MIYAZAKI, Seiji FURUSAKO, Tensile Shear Strength of Laser Welded Lap Joints, *NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT 95*, January (2007)
15. Babak Haghpanah, Shihung Chiu, Ashkan Vaziri, Adhesively bonded lap joints with extreme interface geometry, *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 48 (2014), 130
16. Tae-Jin Yoon, Byung-Ho Jung, Chung-Yun Kang, The quantitative investigation of mechanical properties and characterization of fractured position for friction stir lap welded A6111/A5023 Shear Strength of Laser Welded Lap Joints, *Materials & Design*, 83 (2015), 377