

Cu-Si 삽입금속을 이용한 DP강의 MIG 아크 브레이징 접합부의 미세조직과 기계적 성질

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

*현대머티리얼 환경사업팀

**부산대학교 소재기술연구소

***부산대학교 재료공학과

Microstructure and Mechanical Properties of Gas Metal Arc Brazed Joint of DP Steel with Cu-Si Filler Metal

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 September 27, 2016 ; Revised October 20, 2016 ; Accepted October 25, 2016)

Abstract

In this study, Microstructure and tensile properties in arc brazed joints of 1000MPa grade DP steel using Cu-Si insert metal were investigated. The fusion zone was composed of Cu phase which solidified a little Fe and Si. The former phase formed due to dilute the edge of base material by arc, although Fe was not solid solution in Cu at the room temperature. Cu₃Si particles formed by crystallization at 1100°C during faster cooling. After the tensile shear test, there are no differences between the brazed joint efficiencies.

The maximum joint efficient was about 37% compared to strength of base metal. It is better than that of arc brazed joint of DP steel using Cu-Sn filler metal. Fracture position of all brazing conditions was in the fusion zone. Crack initiation occurred at three junction point which was a stress singularity point of upper sheet, lower sheet and the fusion zone. And then crack propagated across the fusion zone. The reason why the fracture occurred at fusion zone was that the hardness of fusion zone was lower than that of base material and heat affected zone. The correlation among maximum load and hardness of fusion zone and EST at fractured position was $R^2=0.9338$. Therefore, this means that hardness and EST can have great impact on maximum load.

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

1. 서 론

Dual phase(이하 DP) 강은 마르텐사이트와 페라이트의 2상 조직으로 구성되어 있으며, 1980년대에 개발되어 유럽에서 자동차 산업에 적극적으로 적용되기 시작하였다. 국내에서도 자동차 차체의 트렁크리드(Trunk

lid), 사이드 필러 등에 주로 적용이 되고 있다^{1,2)}. 이러한 부분은 특히 외부에 노출되는 부분이기 때문에 미려한 용접, 접합부가 요구되고 있는 것이 특징이다. DP강을 비롯한 첨단고장력강관에 Gas metal arc welding(이하, GMAW), Gas tungsten arc welding(이하, GTAW)과 레이저 용접(Laser welding) 등의 용접 용접을 적용할 경우, 용접 시 과도한 입열로 인하여

모재가 심하게 변형되거나, 기공, 스패터 등과 같은 결함이 발생하여 용접부가 미려하지 않은 문제점이 발생한다³⁻⁵⁾.

한편 아크 브레이징은 GMA 또는 GTA 용접장치를 이용하여 삽입금속과 모재사이에 아크를 발생시킨다. 발생된 아크는 삽입금속을 먼저 녹이고, 용융된 삽입금속은 접합부에서 모세관 현상에 의하여 흐르게 되어 모재의 용융이 거의 없이 모재를 접합하는 공정이다.⁶⁾ 이 공정의 장점은 강판에 대한 열영향이 적고, 자동화가 용이하며, 또한 역극성 전원을 사용함에 따라 모재의 청정작용으로 플럭스 사용이 불필요하고, 스패터 또는 흠의 발생이 아주 적다는 장점을 가지고 있다^{7,8)}.

아크 브레이징에 관한 연구는 주로 Galvanized Transformation Induced Plasticity(TRIP)강, Galvanized DP강, Bare DP강에 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 DP강에 아크 브레이징을 적용한 연구를 살펴보면, Rangel 등은 Galvanized 강에 아크 브레이징을 적용하면 접합 시 낮은 입열에 의하여 Zn의 기화를 방지하여 미려한 접합부를 얻을 수 있다고 보고하였다.⁹⁾ 한편 Cho 등은 Cu-Sn 삽입금속을 이용하여 접합부의 미세조직과 기계적성질에 미치는 브레이징 전류의 영향을 조사하였다. 브레이징 전류가 증가함에 따라 접합부의 강도가 증가하였으나, 모재 대비 접합효율이 30% 미만으로 매우 낮았다¹⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 자동차 차체용 인장강도 1000MPa 급 DP강의 아크 브레이징 기술을 확립 및 기존과 다른 Cu-Si 삽입금속을 이용하여, 접합부의 기계적 성질과 미세조직의 변화를 브레이징 전류를 변화하여 검토하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 소재는 두께가 1.6 mm인 Dual Phase(DP)강이며, 화학조성과 기계적 성질을 Table 1에 나타낸다. 브레이징 시험편은 200x100 mm 크기로 미리 가공하였다. 가공된 시편은 아세톤으로 표면 탈지를 한 후 10 mm 를 겹쳐서 위치한 후 브레이징을 실시하였다. 브레이징은 GMAW 자동 용접기를 사용하

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	

였고, 이 때 직류전극 플러스(DCEP)와 펄스전원을 사용하였다. 토치는 하판과 75° 로 기울인 상태로 진행하였고, 모재와 전극간의 거리(CTWD)는 10 mm 으로 고정하였다. 브레이징 장치에 대한 자세한 그림과 브레이징 실험조건은 Fig. 1과 Table 1에 각각 나타내었다.

아크 브레이징한 시편의 미세조직은 2% 나이탈(HNO₃ 2ml+C₂H₅OH 98ml) 용액으로 2~10초간 부식시켜, 광학현미경(Optical microscopy, 이하 OM)과 주사식전자현미경(Scanning Electron Microscope, 이하 SEM)으로 관찰하였다.

접합부와 모재의 경도분포는 미소경도시험기를 사용하여 하중 (load) 은 300 gf, 유지시간은 10 초로 하여 측정하였다.

인장전단 시험은 박판소재 인장시험 규격인 ASTM A370을 사용하여 실시하였고, 인장시험 시 크로스헤드의 속도는 5mm/min로 고정하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 원소재의 미세조직

Fig. 2는 본 연구에 사용된 DP강 모재의 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 모재의 광학현미경 조직이고, Fig. 2(b)는 임이의 영역을 확대한 주사전자현미경 사진이다. 이것으로부터 모재 미세조직은 페라이트(F),

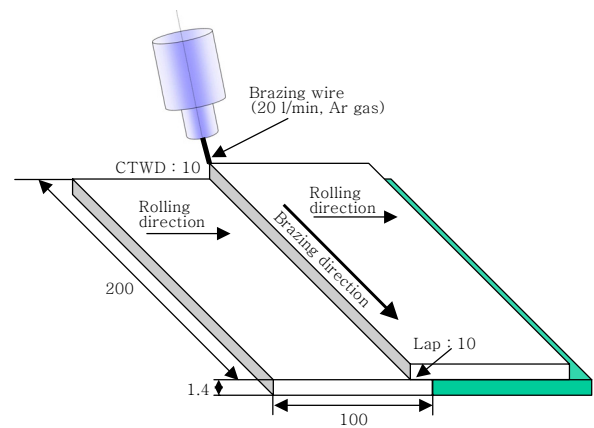


Fig. 1 Illustration for arc brazing process

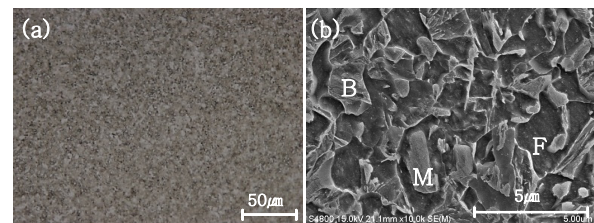


Fig. 2 Microstructure of the base metal

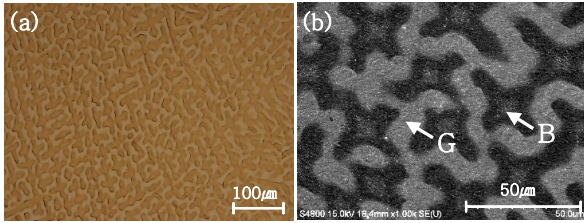


Fig. 3 Microstructure of the filler metal (a) OM image, (b) SEM image

Table 2 EDS results of phases denoted by B and G in (b) in Fig. 3

Color	Cu	Si	phase
Gray	93.7	6.8	Cu
Black	93.0	18.7	Cu ₃₃ Si ₇

마르텐사이트(M) 그리고 베이나이트(B) 3 상으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

본 연구에 사용된 Cu-Si 삽입금속 와이어의 원래의 응고조직을 관찰하기 위하여 와이어의 적당량을 세라믹 도가니에 넣은 후 고주파 용해로 응고시켜 미세조직을 관찰하였다.

Fig. 3은 용해 후 응고된 삽입금속의 광학현미경 사진(a) 및 SEM 사진(b)을 나타낸 것이다. 이것으로부터 삽입금속의 응고조직은 회색 상(Gray; G)과 흑색 상(Black; B)으로 이루어진 전형적인 텐드라이트 조직을 나타내는 것을 알 수 있다. 회색(G)과 흑색(B)의 구성원소를 알아보기 위하여 각 영역의 EDS 점 분석을 실시하였고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

이것으로부터 회색상(G)은 순수 Cu상이고, 흑색상(B)은 Cu-Si 화합물임을 알 수 있다. 이 화합물은 조성분석 결과와 Fig. 4에 나타낸 Cu-Si 2원계 평형상

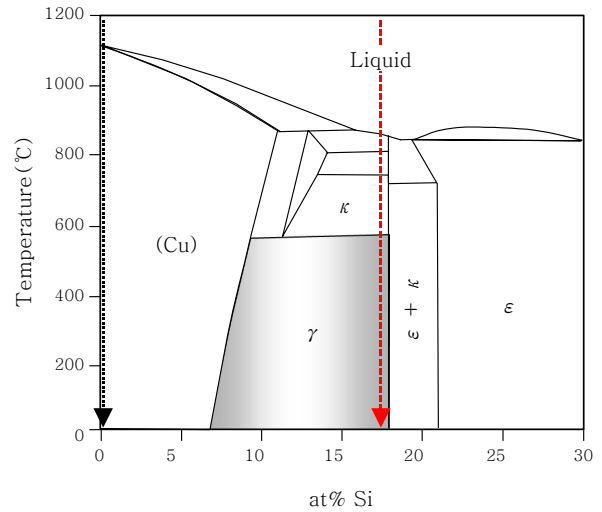


Fig. 4 Binary phase diagrams calculated by thermocalc

태도로부터 γ 영역의 Cu₃₃Si₇ 상인 것을 알 수 있다.

3.2 아크 브레이징부의 비드외관과 미세조직

Fig. 5는 아크 브레이징한 접합부의 비드 외관의 사진과 단면 거시조직의 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. Fig. 5(a-c)의 접합부 표면 사진으로부터, 비드 표면은 기공, 크랙 등의 표면결함이 없고, 시작부 부터 종료부 까지 안정한 것을 알 수 있다. Fig. 5(d-f)의 단면사진으로부터, 접합부 단면에서는 삽입금속이 용융, 응고되어 불록하게 접합부가 형성이 된 전형적인 겹치기 이음부의 형상인 것을 알 수 있고, 삽입금속의 내부에 기공, 크랙, 불완전용입 (Incomplete penetration) 과 같은 내부 결함이 없는 것을 알 수 있다.

선행연구 결과에 따르면 겹치기 아크 브레이징 접합부의 경우, 모재와 삽입금속의 계면에서 생성되는 계면 반응층이 인장성질에 큰 영향을 미치는 중요한 인자로

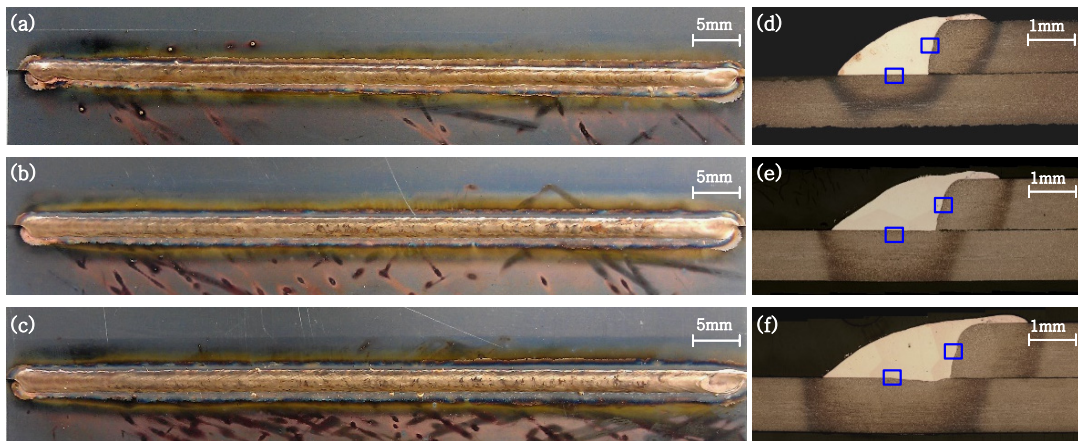


Fig. 5 Surface bead appearances (a-c) and cross sections (d-f), of brazed with brazing current; (a),(d) 60A, (b),(e) 70A, (c),(f) 80A

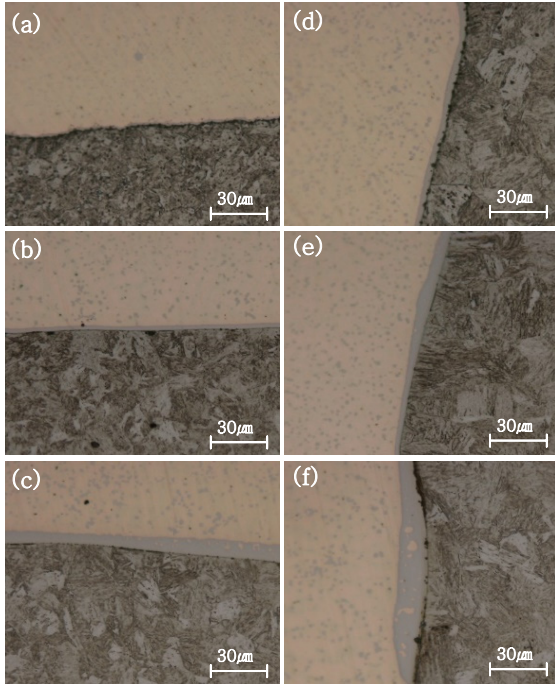


Fig. 6 OM images of bottom joint interface(a-c) and side joint interface(d-f) with brazing current (a),(d) 60A, (b),(e) 70A, (c),(f) 80A

보고되고 있다¹⁰⁾. 따라서 전류조건에 따른 삽입금속과 모재의 접합 계면부를 자세히 관찰하여 보았다.

Fig. 6은 Fig. 5의 (d-f)의 □로 표시한 영역인 삽입금속과 상판의 접합계면과 하판의 접합계면을 확대한 광학현미경 사진을 나타낸다.

이것으로부터 삽입금속-상판, 하판 간 각각의 접합계면에 수 um 두께의 회색층 형성되어있는 것을 알 수 있다. 그리고 위치와 전류에 따라 회색 층의 두께 차이가 약간 있음을 알 수 있다. 이 회색 층을 자세히 알아 보기 위하여 SEM을 이용하여 고배율에서 삽입금속과 모재 사이에 형성되는 회색층의 관찰하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이것으로부터 접합부 단면의 미

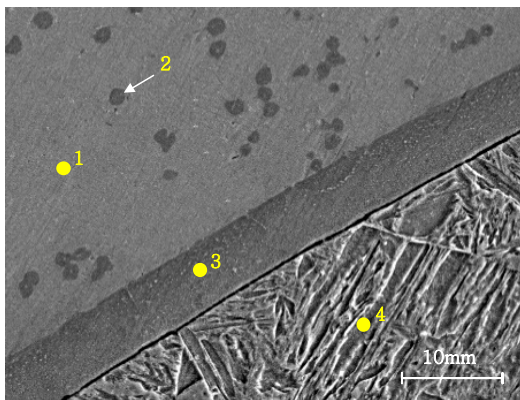


Fig. 7 SEM image marked rectangle area in Fig. 6(e)

Table 3 Point analysis by EDS. (1) Filler metal matrix, (2) particle in brazed zone, (3) joint interface and (4) base metal

No.	Cu	SI	Fe	Mn
1	90.2	4.6	5.2	-
2	-	27.2	72.8	-
3	-	24.4	75.6	-
4	-	-	97.4	2.6

세조직은 삽입금속부의 기지조직 (1), 삽입금속내부의 구상조직 (2)삽입금속과 모재 사이에 형성된 띠 층 (3), 그리고 모재 조직 (4)의 4 영역으로 이루어져있는 것을 알 수 있다. 이 4 영역의 성분분석을 위하여 EDS 점분석을 실시하였고 그 결과를 Table 3에 나타낸다. 이것으로부터 삽입금속부의 기지조직은 Fe와 Si를 다소 고용하고 있는 Cu 상이고, 삽입금속내부의 구상조직은 Fe-Si 이며, 삽입금속과 모재 사이에 형성된 띠 층은 구상조직과 동일한 성분을 보이므로 삽입금속부에 생성된 Fe-Si 과 같은 상으로 생각된다.

계면반응층의 정확한 분석을 위해서 접합부의 삽입금속부분만을 도려내어 전해추출을 실시하였고, 삽입금속부분만을 일부 녹여낸 시편을 SEM, EDS 분석을 실시하였다. Fig. 8(a)는 전해추출 후의 접합시편의 분석위

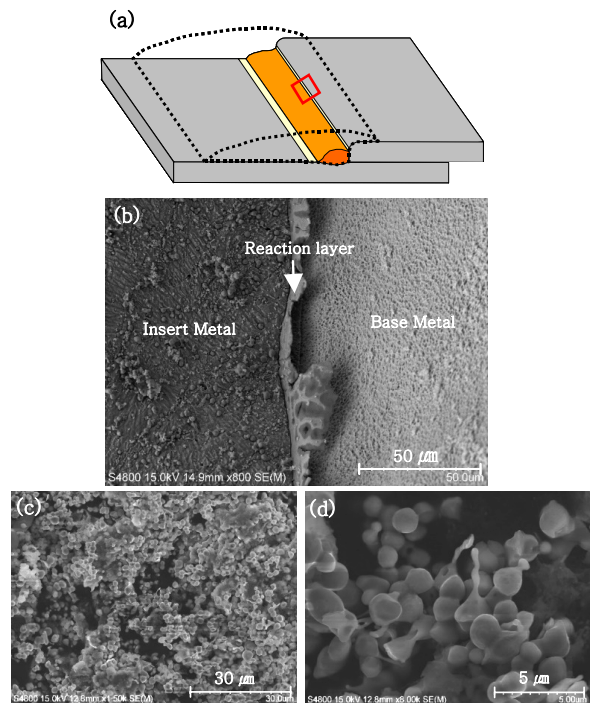


Fig. 8 (a) Illustration of specimen by electro extracted, (b) SEM image at interface denoted rectangle area in Fig.8(a), (c) SEM image of powder after extracted and filtered (d) High magnified SEM image of filtered powder

치를 나타낸 모식도이고, Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 □로 표시된 영역의 SEM 사진이다. 또한 Fig. 8(c)와 (d)는 삽입금속부분의 전해추출 한 용액을 메스로 걸러서 얻어진 잔사의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 이것으로부터 삽입금속부와 모재부 사이에 수 um두께의 계면 반응층이 존재하고 있음을 알 수 있으며, 삽입금속내부에서는 다량의 구상이 존재하는 것을 알 수 있다. 구상의 상동정을 위하여 XRD 분석을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이것으로부터 삽입금속과 모재 사이에 형성된 반응층과 삽입금속내부에서는 다량의 구상은 Fe₃Si 상인 것을 알 수 있다.

삽입금속부 내의 Fe₃Si 구형의 형성 기구를 고찰하기 위하여 열역학적 상태도 시뮬레이션 소프트웨어인 Thermo-Calc.(TCW5)를 사용하여 상태도를 예측하였고, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig.10에 나타낸 상태도의 데이터 입력값은 (Input data) 삽입금속부의 EDS 점분석 결과(3.83wt.%Fe, 3.18wt.%Si, 92.99wt.%Cu)를 이용하였다. 이것으로부터 상태도에 화살표로 표시한 92.99wt.%Cu 에서 Fe₃Si상이

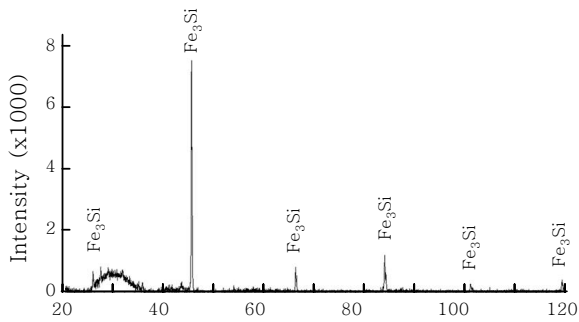


Fig. 9 X-ray diffraction pattern of particle by electro extraction

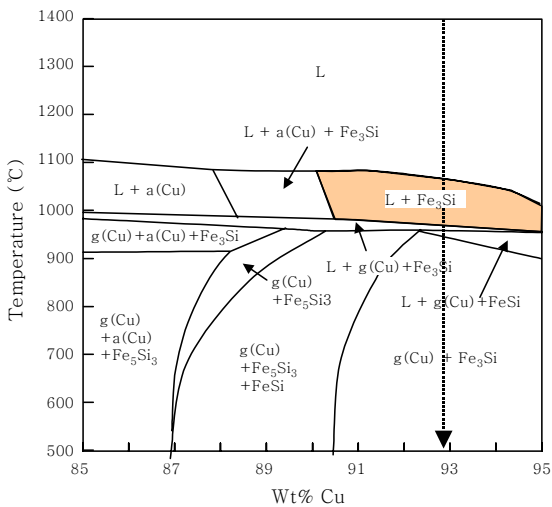


Fig. 10 Binary phase diagrams calculated by thermocalc

생성되는 것을 알 수 있고, 이것은 아크 브레이징 과정에서 삽입금속과 모재의 일부가 용융되고, 냉각하면서 정출 (약 1100°C 부근) 되는 것으로 생각된다.

3.3 기계적 성질

Fig. 11은 브레이징 전류에 따른 인장하중을 나타낸 것이고, Fig. 12는 파단된 시편의 단면 OM 사진을 나

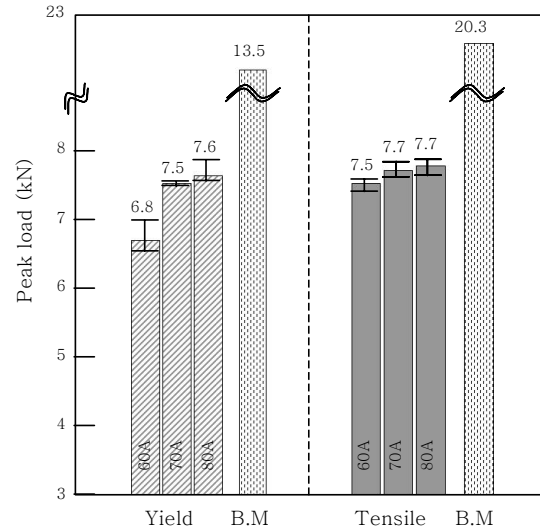


Fig. 11 Tensile and yield properties with brazing currents

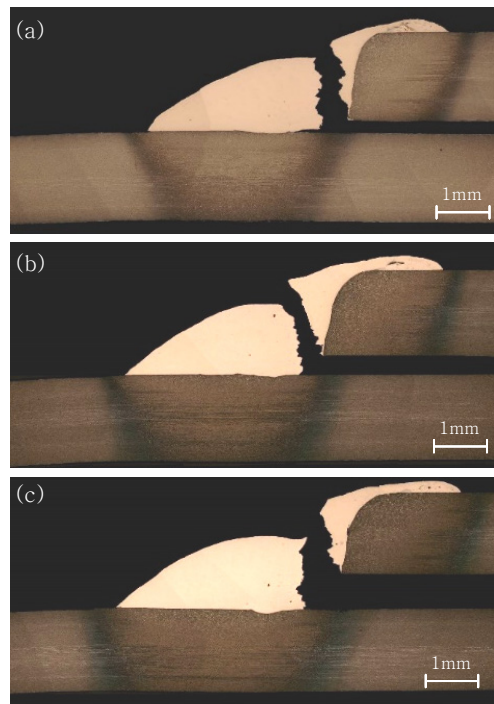


Fig. 12 Cross sections of fractured specimens((a)~(c)) and enlarged micro structures((d)~(f)) of zone denoted by □ in (a)~(c). (a), (d) : 60A, (b), (e) : 70A, (c), (f) : 80A

타낸 것이다. 접합시편의 크기로 모재를 인장한 경우, 인장하중은 약 20.3kN이었다. 인장하중 값은 약 200N 이내로 큰 차이를 보이지 않았으나, 브레이징전류가 증가함에 따라 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 최대 접합효율은 모재대비 약 37% 이었다. 이 때의 파단위치는 전단응력에 의한 상판과 하판의 모재의 계면에서 일어나는 계면파단이 아닌 Fig. 12와 같이 상판과 하판 그리고 삽입금속이 만나는 3 중점(Three point junction)에서 파단이 시작되어 삽입금속의 상부로 인장응력에 의하여 파단이 되었음을 알 수 있다.

모든 파단이 상, 하부판과 삽입금속이 만나는 3 중점에서 파단되는 이유를 알아보기 위하여 용융부에서 모재까지 경도분포를 조사하였고, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

한편 선행연구에서 DP강에 Cu-Sn 삽입금속을 적용한 아크 브레이징 접합부의 접합효율은 모재대비 약 30% 미만으로 아주 낮다고 보고되었는데, 이보다는 접합부의 강도가 다소 향상된 것을 알 수 있다. 이것으로부터 Cu-Si 합금 용융부의 경도값 (강도)은 모재인 DP강의 경도값 (강도) 및 HAZ부의 경도값 (강도)보다 낮기 때문에, 용융부에서 파단이 된 것으로 생각된다.

한편, 전류에 따라 접합부의 인장하중이 차이가 나는 이유를 파악하기 위하여, 파단부 단면을 자세히 검토하였다. 아크 브레이징 시 접합부에서 파단이 발생하는 경우, 접합부의 하중은 용융부의 강도와 파단부 유효두께 (Effective Sheet Thickness: EST)에 의하여 결정된다고 보고되었다¹¹⁾. 순수 용융부의 강도를 측정하는 것은 불가능하기 때문에, 강도와 비례관계가 있는¹²⁾ 용융부의 경도를 조사하였고, 그것의 평균 경도값을 Fig. 14에 나타내었다. 이것으로부터 전류값이 증가함에 따라 용융부의 경도가 약간 상승하는 경향이 있는 것을 알 수 있다. 전류값의 증가에 따라 용융부의 경도값이

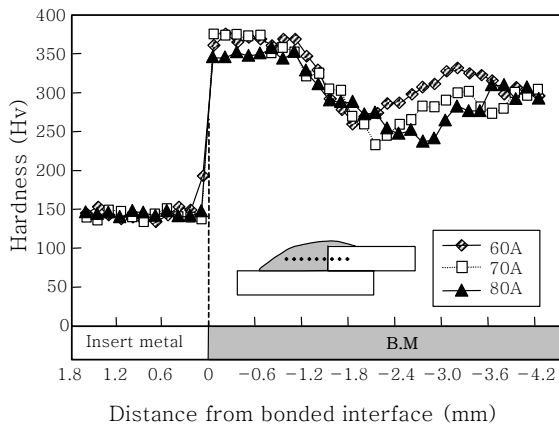


Fig. 13 Hardness distribution of Insert metal matrix with respect to brazing current

상승하는 이유는 Fig. 6에서 언급하였듯이 용융부 내부의 Fe₃Si 구상과 관련이 있을 것이라 생각하여 Fe₃Si 분률(Volume fraction)을 측정한 후 용융부의 경도값과의 상관관계를 조사하였고, 그 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 이것으로부터 브레이징 전류값이 증가함에 따라 용융부 평균 경도값이 커지는 이유는 용융부 내부에 Fe₃Si 구상의 분율이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

파단부 유효두께는 Fig. 12에서 나타난 것과 같이 3 중점에서 파단 종료지점의 두께로 정의하여 측정하였다. 측정된 결과를 이용하여 용융부의 경도값과 파단부 유효두께에 따른 인장하중과의 상관관계를 확인하기 위하여 선형 회귀분석(linear regression analysis)을 하였고, 그 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 실험의 독립변인은 용융부의 경도값과 파단부 유효두께의 측정값이고, 이에 따른 종속변인은 인장하중값이다. 이 결과로부터 용융부의 경도값 및 파단부의 유효두께와 인장하중값의 관계는 매우 높은 선형관계를 나타내었고, 이때의 상관계수는 0.9338 이었다.

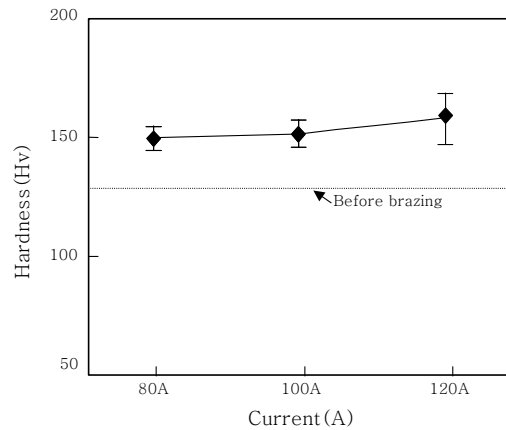


Fig. 14 Variations of average hardness with respect to brazing current

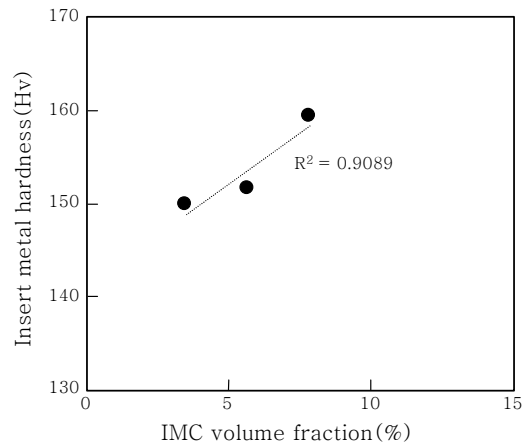


Fig. 15 Correlation between IMC volume fraction in insert metal matrix and hardness

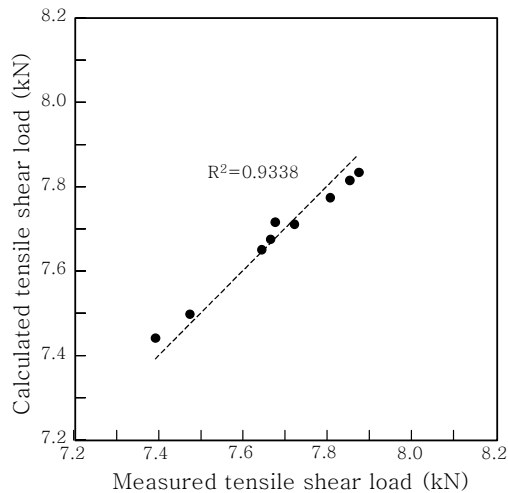


Fig. 16 Linear regression model with independent variables (EST and hardness) and dependent variable (tensile shear load)

4. 결 론

1000MPa급 DP강에 Cu-6.3wt%Si 삽입금속을 적용한 아크 브레이징 접합부의 미세조직과 기계적 성질에 대하여 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아크 브레이징 후 접합부의 표면 및 내부에 기공, 크랙, 불완전용입(Incomplete penetration)과 같은 내부 결함이 발생하지 않는 건전한 접합부를 얻었다.

2) 용융부의 기지조직은 Fe와 Si를 다소 고용하고 있는 Cu 상이고, 용융부 내부에 파티클 형상의 Cu₃Si 상으로 구성되어 있었다. Fe₃Si 상이 용융부에 생성되는 이유는 아크 브레이징 과정에서 삽입금속과 모재의 일부가 용융되고, 냉각하면서 약 1100°C 부근에서 정출되기 때문이다.

3) 전단인장 시험 시 피크하중은 모재대비 약 37%이었으며, 브레이징 전류 변화에도 약 200N 이내로 큰 차이를 보이지 않았고, 파단은 상부모재/하부모재/용융부와 만나는 3중점에서 최초 크랙이 발생하고, 용융부 내부로 전파되어 인장응력에 의하여 발생하였다.

4) 용융부의 경도(강도)는 모재와 HAZ의 경도값보다 낮기 때문에 용융부에서 파단이 발생하였고, 피크하중은 용융부의 경도(강도)와 파단부의 유효두께에 따라 결정되었다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No. 2012R1A5A1048294).

References

1. R. KUZIAK, R. KAWALLA, S. WAENGLER, Advanced high strength steels for automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(2), (2008), 103
2. Y. Sakuma, O. Matsumura and H. Takechi, Mechanical properties and retained austenite in intercritically heat-treated bainite-transformed, *Metallurgical Transactions A*, 22(2), (1991), 489
3. 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
4. Kim, C., Choi, W., Kim, J., and Rhee, S., Relationship between the weldability and the process parameters for laser-TIG hybrid welding of galvanized steel sheets, *Materials Transactions* 49(1), (2008), 179
5. Gualini, M. M. S., Iqbal, S., and Grassi, F., Modified dual-beam method for welding galvanized steel sheets in lap configuration, *Journal of Laser Applications* 18(3), (2006) 185
6. The Korean Welding and Joining Society, *Welding Handbook*, 3 (2007), 172 (in Korean)
7. 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
8. D. Iordachescu, L. Quintino, R. Miranda, G. Pimenta, Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates, *Materials and Design*, 27, (2006), 381
9. A.F. Rangel, L.A. Matlakhova, R.P.D.R. Paranhos, A.N. Malakhov, Evaluation of MIG-brazing welded joint by means of metallographic techniques, *Welding International*, 20, (2006), 889
10. 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)
11. J. R. Cahoon, W. H. Broughton and A. R. Kutzak, The Determination of Yield Strength From Hardness Measurements, *Metallurgical transactions*, 2 (1970), 1971