알루미늄 합금 AA6061-T6와 Silafont-36의 이종금속 레이저 용접부 특성에 관한 연구

현준혁* · 신태우* · 장복수** · 김상호* · 고건호*** · 김태영*** · 고진현*,†

*한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부

**정우산기(주)

*** (주)삼기오토모티브

The Study on Characteristics of Dissimilar Weld Metals between AA6061-T6 and Silafont-36 by Laser Welding

Jun-Hyeok Hyun*, Tae-Woo Shin*, Bok-Su Jang**, Sang-Ho Kim*, Gun-Ho Go***, Tae-Young Kim***, and Jin-Hyun Koh*,†

*Korea University of Technology and Education, Cheonan, 31253, Korea

**Jeong-Woo Industrial Machine, Cheonan, 31251, Korea

***Samkee Automotive, Pyeongtaek, 17953, Korea

†Corresponding author : jhkoh@kut.ac.kr

(Received September 14, 2017 ; Revised October 16, 2017 ; Accepted October 17, 2017)

Abstract

The characteristics of dissimilar weld metals between AA6061-T6 and Silafont-36 by laser welding were evaluated in terms of bead shape, microstructure, EDS analysis, hardness, and tensile strength. Laser power of 3.0, 3.5, 4.0kW and incident angle of 15, 20° were employed to make dissimilar weld metals. Bead shape of weld metal with 3.5kW, 15° was most stable. Microstructure of dissimilar weld metals consisted of columnar dendrite in area adjacent to fusion line and equiaxed dendrite in center of weld metal. Also, Mg₂Si and α-AlFeMnSi were precipitated in weld metal. Microstructure in HAZ of Silafont-36 consisted of eutectic Al-Si, Mg₂Si, and β-Al₅FeSi. Si contents of weld metal made with 4.0kW, 15° were very high. And Mg contents of weld metals were relatively low because of vaporation of Mg. Hardness of weld metal made with 4.0kW, 15° was very high because Si contents of that were high. In tensile test, Specimens were fractured in Silafont-36 or weld metals. The fracture in base metals was due to low tensile strength of Silafont-36, and the fracture in weld metals was due to undercut or porosity.

Key Words : AA6061, Silafont-36, Dissimilar weld, Laser welding, Mg₂Si

1. 서 론

최근 유엔기후변화협약(COP21) 등 국제환경규제의 강도가 심해짐에 따라 자동차 산업에서는 배기가스 배출의 감소를 위해 경량화와 친환경 자동차로 대응하고 있다. 차체의 경량화를 통한 연비 향상은 지속적으로 이루어져 왔지만 내연기관 자동차를 전기차로 대체하려

면 충분한 주행거리를 확보해야하기 때문에 추가적인 경량화가 필요하다^{1,2)}.

이에 따라, 비강도와 내식성이 우수한 알루미늄 합금이 경량 소재로 각광받고 있다. 알루미늄 합금이 차량에 적용되기 위해서는 성형성이 우수하면서도 높은 강도를 가져야 하는데, 이러한 조건을 만족하는 6000계열 합금이 body structure와 outer panel 및 inner panel에 널리 사용되고 있으며 각종 프레임 등 복잡한

Table 1 Chemical composition of base metals(wt%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other	Al
AA6061-T6	0.616	0.388	0.255	0.045	1.027	0.193	0.008	0.044	-	Bal.
Silafont-36	11.2	0.13	0.03	0.67	0.19	-	0.07	0.13	Sr	Bal.

형상이 요구되는 부품에는 다이캐스팅용 알루미늄 합금이 사용되고 있다³⁻⁵⁾.

6000계열 알루미늄 합금은 Al에 Mg과 Si이 함유된 합금으로 주로 용체화 처리 후 시효처리를 통해 강화시키는 열처리형 합금이다. 그러나 용접 시 석출물이 고 용되어 열처리 효과가 풀리며, 열영향부에서 과시효 영역이 형성되어 연화가 발생하는 문제점이 있다⁶⁻⁸⁾.

다이캐스팅용 합금 중 Silafont는 Al-Si계 합금에 Mg 및 Mn이 첨가된 합금으로 우수한 용접성 및 가공성과 함께 주조성을 가진 것으로 알려져 있어 최근 사용빈도가 증가하고 있으며, 기계적 성질을 개선하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다⁹⁻¹¹⁾.

알루미늄 합금의 적용 범주가 지속적으로 증가함에 따라 차체 용접 공정에서 알루미늄 합금의 용접 비중이 증가하고 있으나, 용접 시 기공 및 균열 등 결함이 발생하기 쉽기 때문에 지속적인 연구가 필요하다. 또한, 프레임류의 차체에 주로 6000계열과 다이캐스팅용 합금을 적용하기 때문에 두 합금의 접합 필요성이 증가하고 있으나, 6000계열과 Al-Si계 합금 사이의 이종금속 용접에 대한 연구가 미비하여 이종금속 용접부의 성능에 대한 충분한 검토가 필요하다.

기존의 차체 용접은 주로 스폿 용접을 이용하였지만 알루미늄은 열전도도 및 전기전도도가 높을 뿐만 아니라 표면에 알루미늄 산화막이 형성되기 때문에 스폿 용접을 적용시키기에는 어려움이 있다. 이러한 이유로 일부 자동차 회사에서는 알루미늄 합금에 레이저 용접을 적용시키고 있으나 알루미늄은 레이저에 대한 흡수율이 낮아 반사가 발생하기 때문에 장비의 손상이 발생하기도 한다. 그렇기 때문에 각도를 주고 빔을 조사해야 하며, 출력이 과다할 경우 Mg 등 기화점이 낮은 원소로 인해 기공이 발생하기 때문에 적절한 조건으로 용접해야 한다¹²⁻¹⁴⁾.

따라서, 본 연구에서는 AA6061-T6와 Silafont-36을 Fiber 레이저 용접을 실시한 후 레이저 출력 및 빔 각도에 따른 이종금속 용접부의 미세조직을 분석하고 기계적 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 모재는 80(L)×100(W)×3(T)mm

의 알루미늄 합금인 AA6061-T6와 Silafont-36 합금으로 Table 1에 모재의 화학적 조성을 나타내었다. 용접은 레이저 파장이 1070nm이며, Fiber 직경이 200 μ m인 6kW급의 Fiber 레이저 용접기를 이용하였고, Cu로 제작된 백킹재를 사용하여 맞대기 용접하였다. 용접 조건은 레이저 출력을 3.0, 3.5 4.0kW, 빔 조사각을 15°, 20°로 하여 14mm/s 속도와 0mm의 초점거리로 용접하였고, 보호가스는 10L/min의 유량으로 Ar가스를 공급하였다. 용접 모식도와 용접 조건은 각각 Fig. 1과 Table 2에 나타내었다.

미세조직 관찰은 시편을 정밀연마 후 Modified Keller 용액을 이용하여 에칭한 후 광학 현미경과 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 관찰하였고, EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometry)를 이용하여 성분 분석하였다.

기계적 특성은 인장강도와 경도를 평가하였으며, 인장 시험은 KS B 0801의 13B호 시편으로 제작한 후 만능 인장 시험기로 수행하였으며 SEM으로 파단면을 관찰하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도기 하중

Fig. 1 Schematic diagram of laser welding**Table 2** Laser welding conditions

Power (kW)	Incident angle(°)	Speed (mm/s)	Defocusing distance(mm)	Shielding gas
3.0	15	14	0	Ar (10L/min)
	20			
3.5	15			
	20			
4.0	15	14	0	Ar (10L/min)
	20			

1kgf로 두께 방향의 중심에서 수평 방향으로 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 비드 형상

Fig. 2는 레이저 출력 및 빔 조사각에 따른 이중금속 용접부의 단면 사진이다. 빔 조사각이 15°에서 3.5kW와 4.0kW의 출력으로 용접한 경우를 제외한 나머지 용접부에서 언더컷이 발생하였으며, 빔 조사각이 20°로 용접된 경우에는 언더컷이 모두 발생하였다. 이는 3~4kW의 출력으로 용접 시 빔 조사각을 20°로 할 경우 높은 빔 조사각으로 인해 용접이 진행 중인 영역과 이미 용융된 영역의 용탕이 혼합되면서 비드가 안정하지 못하게 된 것으로 사료된다. 또한, 4.0kW로 용접한 경

Incident angle Power	15°	20°
3.0kW	(a)	(b)
Bead width	5.36mm	5.01mm
3.5kW	(c)	(d)
Bead width	6.65mm	6.52mm
4.0kW	(e)	(f)
Bead width	8.10mm	8.00mm

Fig. 2 Bead shapes of weld metals with different laser power and incident angle

우 출력이 과다하여 표면 비드의 함몰이 발생하였다. 비드 폭은 출력이 0.5kW 증가할 때마다 1.0~1.5mm 사이로 증가하였고, 빔 조사각에 따른 차이는 비교적 적었다.

3.2 미세조직

Fig. 3은 용착금속(Weld Metal, WM)과 AA 6061-T6 및 Silafont-36의 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)에서의 미세조직이다. Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 AA6061-T6의 열영향부에서는 검은 입자로 보이는 Mg_2Si 가 존재하였고, 열영향부에 인접한 용착금속에서는 주상정의 조직이 형성된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 용착금속의 중앙에서 관찰한 미세조직으로 등축정의 조직이 형성되었으며, 고배율로 확인하기 위해 SEM으로 관찰한 결과 Fig. 4(a)에서 확인할 수 있듯이 일부 공정 Si이 형성되었으며, Mg_2Si 와 $\alpha-AlFeMnSi$ 의 화합물이 생성되었다. 특히, 알루미늄 합금에서 Mg_2Si 는 함량에 따라 용접부의 고온 균열에 큰 영향을 미치기 때문에 용접 시 Mg_2Si 의 함량을 균열 감수성이 높은 영역을 피할 수 있도록 Mg와 Si의 함량을 고려하여야 한다⁶⁾. 또한, Silafont-36의 열영향부를 나타낸 Fig. 3(c)에서는 모재에 Si 입자가 있었으나, 열영향부에서 Al-Si의 공정상이 생성되었다. Silafont-36의 열영향부도 SEM으로 미세조직을 관찰하였는데, Fig. 4(b)에서 확인할 수 있듯이 Mg_2Si 와 $\alpha-AlFeMnSi$ 화합물이 존재하였고 특히, Silafont-36에서 형성되는 화합물 중에서 취성이 강한 Needle 형상의 $\beta-Al_5FeSi$ 가 형성되었다¹⁰⁾.

3.3 EDS 성분 분석

Fig. 5는 이중금속 용접부에서 Mg와 Si의 EDS Mapping 결과를 나타낸 것이다. Si는 AA6061-T6와 용착 금속, 그리고 Silafont-36에서 함량의 차이가 크기 때문에 Mapping 결과에서 위치에 따라 뚜렷하게

Fig. 3 Microstructures of specimen welded with 3.5kW, 15°. (a) HAZ adjacent to AA6061-T6, (b) Weld metal, (c) HAZ adjacent to Silafont-36

Fig. 4 SEM image of specimen welded with 3.5kW, 15°
(a) Weld metal, (b) HAZ adjacent to Silafont-36

구분되었지만, Mg 함량은 두 합금 모두 소량이 함유되어 있기 때문에 EDS Mapping으로는 구분할 수 없었다.

따라서, 용접조건 별로 측정한 용접부의 원소 함량 중 Si 함량을 Fig. 6(a)에 나타내었고, Mg 함량을 Fig. 6(b)에 나타내었다. 빔 조사각이 15°에서 4.0kW로 용접하였을 때, Si 함량이 급격하게 증가하였는데, 이는 용접이 AA6061-T6보다 낮은 Silafont-36의 용융량이 많아졌기 때문으로 사료된다. 또한, 3.5kW와 4.0kW에서 용접을 하였을 때, Mg 함량이 매우 낮은 것을 확인할 수 있는데 이는 기화점이 낮은 Mg이 높은 레이저 출력

Fig. 5 EDS maps of weld metal with 3.5kW, 15°

Fig. 6 Si and Mg content of weld metals with different laser power and incident angle

으로 인해 일부 기화한 것으로 사료되며, Mg의 기화는 용접부에서 기공을 유발하기 때문에 주의하여야 한다¹²⁾.

3.4 경도 시험

Fig. 7은 두께의 중심부에서 수평 방향으로 측정한 경도 분포를 나타낸 그래프로 용착금속의 평균 경도와 AA6061-T6 소재의 경도가 비슷하였다. 이는, 용접으로 인해 AA6061-T6의 석출물이 고용되었으나 Fig. 6에서 확인한 것처럼 Silafont-36에서 Si이 다량 혼합되었기 때문이다. 또한, 3.0kW와 3.5kW의 출력에서는 용착금속의 경도 차이가 거의 없었으나 4.0kW에서는 경도가 다소 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는, Fig. 6에서 확인한 것처럼 출력이 4.0kW로 용접된 경우 다른 조건에 비해 Si 함량이 많기 때문이다¹⁵⁾.

그리고 AA6061-T6의 열영향부에서 경도가 급격하게 감소하였는데 이는 AA6061-T6의 용접 시 주로 나타나는 현상으로 T6 열처리의 효과가 사라졌기 때문이다. 열처리형 알루미늄 합금은 아크 용접 시에는 일반적으로 열영향부가 부분 용해 영역, 고용 영역, 연화 영역으로 구분되는데 본 연구에서는 레이저 용접 시 빠른 냉각속도로 연화 영역은 거의 생성되지 않고, 고용 영역에서 경도가 감소한 것으로 확인되었다. Silafont-36의 열영향부에서는 Fig. 3(c)와 Fig. 4(b)에서 확

Fig. 7 Distribution of hardness in the horizontal direction (a) 3.0kW, (b) 3.5kW, (c) 4.0kW

인한 것처럼 Al-Si의 공정상과 일부 화합물이 형성되었으나, 형성된 영역이 적어 경도에 큰 변화가 없이 모재의 경도를 유지하다 용착금속에서 급격하게 증가하였다¹⁶⁾.

3.5 인장 시험

Fig. 8은 레이저 출력과 빔 조사각에 따라 파단된 인장 시험편과 SEM으로 관찰한 파단면을 나타낸 것이다. 20°에서 3.0kW로 용접한 시험편과 15°에서 3.5, 4.0kW로 용접한 시험편은 Silafont-36에서 파단되었으나, 나머지 언더컷이 발생한 조건으로 용접한 경우에는 용접부에서 파단되었다. Fig. 2에서 확인한 것처럼 20°에서 3.0kW로 용접한 시험편에서도 언더컷이 발생하였으나 Silafont-36이 낮은 인장 강도를 갖기 때문에

모재에서 파단된 것으로 사료된다. 또한, 기존에 6000 계열 알루미늄 합금의 용접부에 대한 연구에서는 주로 열 영향부 중 연화가 크게 발생하는 과시효 영역에서 파단이 발생하는 것으로 보고되고 있으나^{7,16)}, Fig. 7에서 확인한 것처럼 과시효 영역이 거의 존재하지 않았기 때문에 AA6061-T6의 모재에서는 파단이 발생하지 않았다.

인장시험 파단면을 SEM으로 관찰한 결과, 모재에서 파단된 시험편에서는 주로 연성파괴가 관찰되었으나 용접부에서 파단된 시험편에서는 취성파괴가 관찰되었다. 또한, Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 3.0kW, 15°와 4.0kW, 20°에서 용접된 시험편의 파단면에서는 용접 시 형성된 기공이 존재하였는데, 용접부의 파단에 영향을 끼친 것으로 사료된다.

Incident angle Power	15°		20°	
	Fractured specimen	SEM fractography	Fractured specimen	SEM fractography
3.0kW				
Tensile strength	197.95MPa		197.46MPa	
3.5kW				
Tensile strength	199.86MPa		197.23MPa	
4.0kW				
Tensile strength	199.29MPa		193.61MPa	

Fig. 8 Fractured image of tensile specimen and tensile strength with different laser power and incident angle

Fig. 9 SEM fractography of tensile specimen (a) 3.0kW, 15°, (b) 4.0kW, 20°

4. 결 론

본 연구에서는 AA6061-T6와 Silafont-36을 출력 3.0, 3.5, 4.0kW, 빔 조사각 15°, 20°에서 14mm/s의 용접 속도로 Ar 가스를 공급하면서 레이저 용접을 실시하였다. 이중금속 용접부의 특성을 조사하기 위해 비드 형상, 미세조직 관찰, 성분 분석, 인장시험 및 경도 시험을 실시하였으며 결론은 다음과 같다.

1) 빔 조사각이 15°에서 출력을 3.5kW와 4.0kW의 출력으로 용접한 시편을 제외한 나머지 용접부에서 언더컷이 발생하였으며, 4.0kW로 용접한 시편에서는 표면 비드의 함몰이 발생하였다.

2) AA6061-T6의 용접선에 인접한 용착 금속에서는 주상정의 조직이 형성되었고, 용접부의 중앙에서는 등축정의 조직이 형성되었으며, 용착금속 내에 Mg_2Si 와 $\alpha-AlFeMnSi$ 화합물이 형성되었다. 또한, Silafont-36의 열영향부에서도 Mg_2Si 와 $\alpha-AlFeMnSi$ 화합물이 존재하였고, 취성이 강한 Needle 형상의 $\beta-Al_5FeSi$ 가 형성되었다.

3) 성분분석 결과, 4.0kW의 출력으로 용접한 용착 금속에서 Si 함량이 상당히 높은 것으로 확인되었으며, 이는 Silafont-36의 용융량이 많아졌기 때문으로 사료된다. 또한, 3.5kW이상의 출력에서 용접하였을 때, 용착금속 내 Mg 함량이 비교적 낮은 것으로 확인되었는데, 높은 출력으로 인해 기화점이 낮은 Mg이 증발한 것으로 사료된다.

4) 용착금속의 경도는 AA6061-T6의 모재 경도와 비슷하거나 높았으며, 이는 Silafont-36으로부터 Si이 다량 함유되었기 때문이다. 또한, 4.0kW의 출력으로 15°에서 용접된 경우 Si 함량이 많기 때문에 다소 높은 경도를 가졌다.

5) 인장시험 결과, 3.0kW로 20°에서 용접한 경우와 3.5kW와 4.0kW로 15°에서 용접한 경우 모재인 Silafont-36에서 파단되었으며, 나머지 언더컷이 발생한 조건으로 용접한 경우 용접부에서 파단되었다. 또한, AA6061-T6에서 과시효 영역이 거의 생성되지 않았기 때문에 AA6061-T6의 열영향부에서는 파단이 발생하지 않았다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화산업육성사업”(과제번호 R0005827)으로 수행된 연구결과입니다.

Reference

1. Sungwoong Kim, Munseok Choi, Trends of Car Body Lightweight Technology for RE-EV, *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 34(11) (2012), 32-37 (in Korean)
2. Yong Kim, Ki-Young Park and Kyoung-Don Lee, Development of Welding Technologies for Lightweight Vehicle, *Journal of KWJS*, 29(6) (2011), 621-623 (in Korean)
3. Jürgen Hirsch, Aluminium in innovative Light-Weight Car Design, *Materials Transactions*, 52(5) (2011), 818-824
4. Jürgen Hirsch, Recent development in aluminum for automotive applications, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24(2014), 1995-2002
5. W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, *Materials Science and Engineering*, 4, 280(1) (2000), 37-49
6. Gene Mathers, The welding of aluminium and its alloys, *Woodhead Publishing limited*, (2002), 18-34
7. L. A. Guittierrez, G. Neye and E. Zschech, Micro-structure, Hardness Profile and Tensile Strength in Welds of AA 6013-T6 Extrusions, *Welding Journal*, 75(4) (1996), 115s-121s
8. P. A. Stathers, A. K. Hellier, R. P. Harrison M. I. ripley, Hardness-Tensile Property Relationships for HAZ in 6061-T651 Aluminum, *Welding Journal*, 93(8) (2014), 301s-311s
9. Anna Zovi, Federico Casarotto, Silafont-36, The Low Iron Ductile Die Casting Alloy Development and Application, 99(2007), 33-38
10. Iban Vicario, Pedro Egizabal, Haize Galarraga, Luis Maria Plaza, Inigo Crespo, Study of an Al-Si-Cu HPDC alloys with high Zn content for the production of components requiring high ductility and tensile properties, *International Journal of Materials Research*, 104(4) (2013), 408-414
11. Martin Hartlieb, Aluminum Alloys for Structural Die casting, *Die Casting Engineer*, 57(2013), 40-43
12. Cheolhee Kim, Young-Nam Ahn and Hyun-Sik Lim, laser Welding of Automotive Aluminum Alloys, *Journal of KWJS*, 29(4) (2011), 383-388 (in Korean)
13. Jong Won Yoon, Laser Welding of Aluminum Alloys, *Journal of KWS*, 18(2) (2000), 20-26 (in Korean)
14. Mokyoung Lee and Sung-Hun Jung, Trends of Advanced Multi-Material Technology for Light Materials based on Aluminum, *Journal of Welding and Joining*, 34(5) (2016), 19-25 (in Korean)
15. Hesham elzanaty, Effect of Different Si Content on the Mechanical Properties in Al-Based Alloy, *International Journal of Research in Engineering & Technology*, 2(7) (2014), 49-54
16. KWJS : Welding & Joining handbook (Revised edition), *KWJS*, 1(2008), 317-318 (in Korean)