

마그네슘합금과 철강 이종소재의 레이저 브레이징 특성에 미치는 도금층의 영향

이목영*[†] · 김숙환** · ALI M. NASIRI*** · NORMAN Y. ZHOU***

*포항산업과학연구원 신금속연구본부

**포항산업과학연구원 에너지인프라연구본부

***Department of Mechanical & Mechatronics Engineering, University of Waterloo

Effects of the Types of Coating on the Laser Brazing Characteristics of Dissimilar Joints between Mg Alloy and Steel Sheet

Mok-Young Lee*[†], Sook-Whan Kim**, ALI M. NASIRI*** and NORMAN Y. ZHOU***

*Advanced Metallic Materials Research Department, RIST, Pohang 790-330, Korea

**Energy Infra Research Department, RIST, Pohang 790-330, Korea

***Department of Mechanical & Mechatronics Engineering, University of Waterloo,
Waterloo, ON, N2L 3G1, Canada

[†]Corresponding author : accelee@rist.re.kr

(Received July 31, 2013 ; Revised August 22, 2013 ; Accepted August 26, 2013)

Abstract

The dissimilar welding between magnesium alloy and steel sheet was required in automobile industry to increase the strength of the dissimilar joints. Laser brazing is one of the good joining processes for Mg-steel dissimilar joint.

In this study, the effect of coating materials was evaluated on the laser brazing for the dissimilar joint between AZ31 and coated steels such as Zn, Sn and Ni. Diode direct laser was used to braze the lap-edge joint with Mg600 filler wire and Superior #21 flux. The wettability was best on Zn coated steel. The interlayer was formed at the interface between brazement and steel for all coating materials. The strengths of brazed specimen were 146.5N/mm, 204.6N/mm and 101.6N/mm for Zn, Sn and Ni coated steel respectively.

Key Words : Mg alloy, Dissimilar joint, Coated steel sheet, Laser brazing, Diode direct laser

1. 서 론

마그네슘 합금은 중량 대비 강도가 높은 대표적인 경량구조용 소재이다¹⁾. 또한 주조성이 우수하여 엔진헤드 커버, 오일팬 등의 자동차 부품에 널리 적용되고 있으며, 진동흡수능이 우수하여 고급자동차의 조향장치는 대부분이 마그네슘합금으로 제조되고 있다^{2,3)}. 최근에는 박판주조 및 온간압연에 의하여 마그네슘합금 판재의 제조비용이 감소⁴⁾함에 따라 차체 혹은 판넬류를 마그네슘 합금판재로 제조하려는 연구가 진행되고 있다⁵⁻⁷⁾.

GM은 Cadillac STS의 decklid에 내판은 AZ31B 마그네슘합금 및 외판은 AA5083 알루미늄합금을 적용하기 위한 시도를 하였다⁸⁾.

마그네슘합금을 이용하여 부품을 제조하기 위해서는 접합기술의 개발이 요구된다. Marya⁹⁾ 등은 AZ80 마그네슘 압출재에 대한 GTA (Gas Tungsten Arc, 혹은 TIG) 용접에서 용접현상 및 용접부 특성에 미치는 보호가스의 영향에 대한 연구결과를 발표하였다. Rethmeier¹⁰⁾ 등은 AZ61 용접 와이어를 사용하여 두께 2.5mm AZ31 압출재에 대한 MIG 용접에 관한 연구결과를 보

고하였다. Haferkamp¹¹⁾ 등은 2kW Nd:YAG 레이저를 이용하여 단조형 합금(AZ21A, AZ31B)과 다이캐스트 합금(AM60B, AZ91D)에 대한 용접성을 평가하였으며, Jong-Do Kim¹²⁾ 등은 사형주조 MRI202S 합금과 AZ31B 판재의 이중이음부에 대한 화이버 레이저 용접성을 평가하였다. J.S. Noh¹³⁾ 등은 두께 4mm의 전신재 합금 AZ31B-H24에 대한 마찰교반용접(FSW)에 관한 연구를 수행하였다.

한편, 현재 자동차 부품제조에 철강재료가 널리 적용되고 있으므로 마그네슘합금의 자동차부품을 제조하기 위해서는 기존의 철강재료와의 이중접합이 필수적이다. A.M. Nasiri¹⁴⁾ 등은 AZ31 마그네슘합금과 Ni 도금된 철강의 이중 이음부에 대하여 다이오드레이저를 사용한 브레이징 접합에 관한 연구를 수행하였다. 그 외에도 많은 연구자들이 마그네슘합금과 철강 혹은 알루미늄합금의 이중접합에 관한 연구를 수행하였으나, 접합부의 이음효율은 모재의 절반에도 미치지 못하는 실정이다.

본 연구에서는 도금층 구성에 따른 마그네슘합금과 철강 이중접합부의 브레이징 특성에 관하여 알아보았다.

2. 사용 재료

2.1 모재

실험에 사용된 소재는 쌍롤주조법 및 온간압연공정에 의하여 제조된 두께 2.0mm의 AZ31 마그네슘합금이었으며, 인장강도는 274MPa 및 상온 연신율은 12% 가량이었다. Table 1 및 Table 2에 실험에 사용된 마그네슘 합금 소재의 화학성분 및 물성을 나타내었다.

한편, 마그네슘합금과 이중접합을 위한 상대소재는 일반강이었으며, 그 두께는 도금층의 조건에 따라 0.25mm, 0.55mm 및 0.8mm로 다양하였다. 도금층 두께는 Zn, Sn 및 Ni에 대하여 각각 2 μ m, 0.4 μ m

Table 1 Chemical contents of AZ31(wt%)

Al	Zn	Mn	Mg
3.07	0.82	0.29	Bal.

Table 2 Mechanical properties of AZ31

Thick.	YS	TS	El.
2.0mm	215MPa	274MPa	12%.

Table 3 Coating condition and thickness of steels

	Thick.	Coating	
		Material	Thick.
EG	0.7mm	Zn	2 μ m
TP	0.55mm	Sn	0.4 μ m
Ni plate	0.25mm	Ni	1 μ m

Table 4 Nominal composition of TiBrazing Mg600 filler wire(wt%)

Al	Zn	Mn	Be	Mg
9	2	0.2	0.0006-0.0008	Bal.

Table 5 Nominal properties of TiBrazing Mg600 filler wire

TS.	Brazing temp.	Melting temp.	
		Solidus	Liquidus
207-230MPa	600-620 $^{\circ}$ C	445 $^{\circ}$ C	600 $^{\circ}$ C

Table 6 Nominal composition of #21 flux

LiCl	KCl	NaF	NaCl
25-40%	20-45%	2-13%	20-35%

및 1 μ m이었다. 사용된 철강소재의 두께 및 도금층구성을 Table 3에 나타내었다.

2.2 브레이징 재료

2개의 서로 다른 소재를 접합하기 위한 삽입금속으로는 Titanium Brazing 사의 TiBrazing Mg600을 사용하였는데, 직경은 2.4mm이었으며 Al 및 Zn의 함량이 모재 보다 많았다. 플럭스는 Superior Flux & Mfg. 사의 분말형태의 #21을 사용하였으며, 플럭스 반응온도는 480-620 $^{\circ}$ C이었다. Table 4, Table 5 및 Table 6에 삽입금속 및 플럭스에 대하여 상세한 사양을 나타내었다.

3. 실험 방법

3.1 레이저 브레이징

브레이징에 사용된 레이저는 파장 808nm 및 최대출력 4kW의 diode 레이저이었으며, 레이저빔의 집속은 초점거리 125mm의 투과광학계를 사용하였다. 집속점

에서 레이저빔의 크기는 1mm × 12mm 이었는데, 이 음부의 충분한 가열을 위하여 초점위치는 재료표면으로부터 30mm 가량을 오조준($\delta = +30\text{mm}$)하였다.

시편의 크기는 100mm × 200mm이었으며, 마그네슘합금의 이음부는 편평하도록 밀링가공을 하였다. 마그네슘합금 및 철강소재의 이음부는 아세톤으로 세척하고, 철강소재는 하부 및 마그네슘합금은 상부에 배치하였다. 겹침량은 10mm 가량이었으며, 삽입금속 및 플럭스의 유지를 원활히 하기 위하여 15도 가량 기울였다(Fig. 1).

삽입금속의 표면은 입도 #600의 사포를 사용하여 연삭한 후, 아세톤으로 세척하였다. 이음부의 배치는 그림에 나타난 것과 같이, 이음부 길이와 유사하게 필러 와이어를 절단하여 겹침 모서리에 배치하고, 그 위에 플럭스를 도포하였다.

브레이징은 분말상의 플럭스 및 와이어의 유지를 용이하게 하기 위하여 레이저 헤드를 6축 다관절로봇에 장착하여 빔이 이송하는 방법을 사용하였다(Fig. 2). 보호가스는 사용하지 않았으며 구체적인 실험조건을 Table 7에 나타내었다.

3.2 브레이징 접합부 분석

브레이징 접합부의 건전성을 평가하기 위하여 접합부를 실리콘카바이드 재질의 휠을 사용하여 절단한 후,

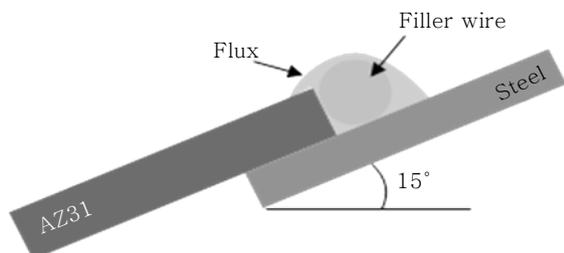


Fig. 1 Schematics of magnesium-steel joint

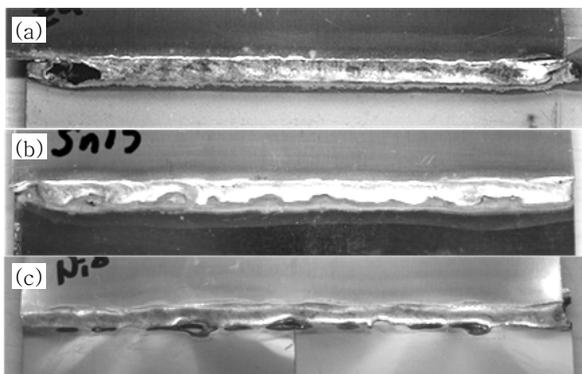


Fig. 2 Surface of the brazement for (a) Zn, (b) Sn and (c) Ni coated steel

Table 7 Test conditions for laser brazing

Coating	Power	Speed	Focus, δ
Zn	1400W	0.7m/min	+30mm
Sn	1300W	"	"
Ni	1200W	"	"

단면에 대한 조직검사를 하였다. 시편의 연삭은 입도가 다른 사포를 사용하였으며, 다이아몬드혼합액을 사용하여 마무리 연마하였다. 마그네슘 기지로부터 Mg-(Al, Zn)의 화합물 혹은 석출물을 현출시키기 위하여 아세트산(20ml), 피크린산(3g), 에틸알콜(50ml) 및 증류수(20ml) 혼합액으로 부식시켰다.

브레이징부 및 접합계면의 형상은 광학현미경으로 관찰하였으며, 석출물 및 계면의 성분은 전자현미경으로 분석하였다.

3.3 브레이징 접합부 평가

브레이징 접합부의 물성을 평가하기 위하여 브레이징 시편을 방전가공하여 인장시편을 제작하였다. 접합부의 강도가 모재 보다 낮기 때문에 별도의 평행부 가공은 하지 않았다.

인장시험은 최대용량 10kN의 로드셀이 장착된 기계식인장시험기를 사용하여 2mm/min의 변형속도로 수행하였다. 브레이징 시편의 형상이 겹치기 이음부이므로 최대하중만 측정하였다.

4. 실험 고찰

4.1 브레이징 접합부 형성

AZ31 마그네슘합금과 도금강판 이종이음부에 대하여 Table 7의 조건으로 브레이징 한 시편의 외관을 Fig. 2에 나타내었다. 브레이징 길이는 200mm 가량이며, 도금층의 종류에 따라 다소 상이한 외관을 보였다. (a)는 전기아연도금강판의 표면에 브레이징을 한 것으로 3가지 가운데에서 필러와이어의 퍼짐성이 가장 양호하고 균일하였다. (b)는 주석을 전기도금한 후, 재용융(reflow) 처리를 한 강판의 표면에 브레이징을 한 것으로 필러와이어의 퍼짐성은 아연도금층에 비해 다소 열위하였다. (c)는 니켈을 전기아연도금한 강판의 표면에 브레이징을 한 것으로 필러와이어의 퍼짐성은 3가지 도금종류 가운데에서 가장 열위하였다. 특히 일부 구간(붉은색상자)에서 연소흔적이 관찰되는데, 그 원인은 소재강판의 두께가 얇아 가열온도가 높은 상태에서 플럭스의 도포량이 부족하여 레이저빔이 소재강판에 직접 조사되었기

때문이다.

한편 브레이징부 외관의 색상은 도금층의 종류에 따라 다소 상이하여, 주석도금강판은 백색의 광택을 보이는 반면 아연 및 니켈도금강판에서는 상대적으로 어두운 색상을 보였다. 그 원인은 플럭스의 작용에 의하여 강판 표면에 존재하는 이물질 혹은 도금층과 마그네슘의 반응 생성물이 부상하고, 그러한 물질들의 색상이 상이하았기 때문이다. 플럭스에 의해 브레이징부가 보호된 것을 고려하면, 합금조성에 따라 색상에 차이가 있는 것으로 생각된다. 주석도금강판의 경우 도금층이 얇아서 Mg-Sn 합금형성이 상대적으로 적게 형성되었는데, 이 또한 색상에 영향을 끼쳤을 것이다.

브레이징 접합부는 필러와이어의 용융금속과 소재강판의 표면 혹은 계면자유에너지에 의하여 젖음성이 변화한다. Fig. 3은 아연, 주석 및 니켈 도금강판에 대한 마그네슘합금 AZ31의 브레이징 접합부의 단면형상을 나타낸 것이다. Fig. 2의 표면사진에서와 유사하게 아연도금강판에 마그네슘합금 브레이징을 한 (a)에서 퍼짐성이 가장 우수하였고, (c) 니켈도금강판이 가장 열위하였다.

접촉각은 아연, 주석 및 니켈에 대하여 각각 15.5도, 39.0도 및 69.0도 이었다(Table 8). 접촉각과 계면자유에너지의 상관관계는 다음과 같은 Young의 식에 의하여 결정된다.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_s - \gamma_{SL}}{\gamma_L} \tag{1}$$

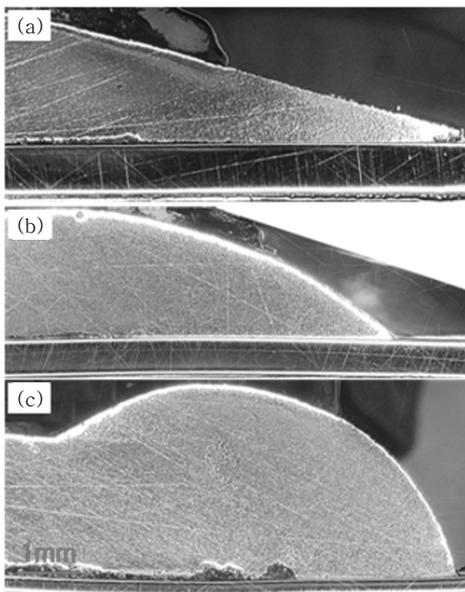


Fig. 3 Cross-sectional views of the brazement for (a) Zn, (b) Sn and (c) Ni coated steel

Table 8 Measured value of wetting angle and surface free energy ratio

Coating	Wetting angle	$\frac{\gamma_s - \gamma_{SL}}{\gamma_L}$
Zn	15.5°	0.964
Sn	39.0°	0.777
Ni	69.0°	0.358

여기서 γ_s 는 강판의 표면자유에너지, γ_L 은 용융된 필러와이어의 표면자유에너지 및 γ_{SL} 은 강판과 용융 필러와이어의 계면자유에너지이다. 식 (1)에서 용융 필러와이어의 표면자유에너지, γ_L 은 동일하므로 강판의 표면자유에너지는 Zn이 가장 높고 Ni이 가장 낮다.

4.2 브레이징 접합부 분석

상온에서 철에 대한 마그네슘의 고용한계는 0.00041at%

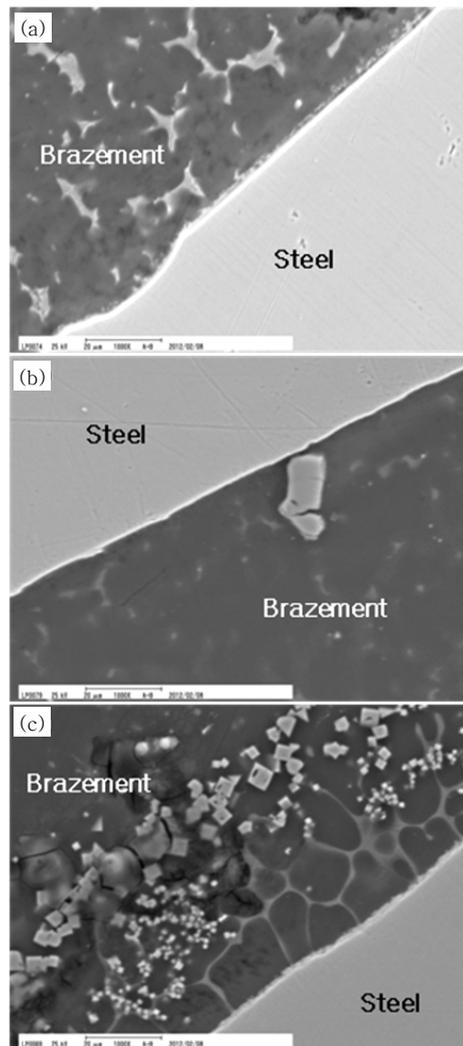


Fig. 4 SEM images of brazement/steel interface for (a) Zn, (b) Sn and (c) Ni coated steel

이므로 직접 접합은 곤란하다. 그러나 아연, 주석 및 니켈 등은 마그네슘과 공정합금상을 형성한다. Fig. 4는 도금강판과 마그네슘합금 모서리 겹치기 이음부의 단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. (a)는 전기 아연도금강판에 대한 브레이징 접합부의 계면을 나타낸 것으로 철과 마그네슘 브레이징부의 계면에 새로운 상이 형성되었다. 정성분석 결과에 따르면 Mg, Al, Fe 등이 검출되는 것으로 보아 강판측은 Al-Fe의 합금상이 생성되고 마그네슘측은 Mg-Al의 합금상이 생성된 것으로 판단된다. 또한 브레이징 접합부에는 AZ31 마그네슘합금의 모재조직에서는 관찰되지 않는 공정상이 관찰되는데, 이는 Mg-(Zn, Al) 공정합금상으로 판단된다.

(b)는 주석도금강판의 브레이징접합 계면을 나타낸 것으로 철과 마그네슘 브레이징부의 계면에는 상대적으로 얇은 반응층이 생성되었다. 브레이징 접합부에는 아연도금강판에 비하여 양이 훨씬 적기는 하지만 Mg-(Al, Zn) 공정상이 관찰되는데, 그 이유는 필러와이어의 Al 및 Zn의 첨가량이 많았기 때문이다. 계면의 접합부 측에서 관찰되는 석출물은 Al-Mn 합금상으로 분석되었다. 주석도금강판의 경우 타 소재와 비교하여 접합부 계면 인근에 합금상 혹은 석출물의 생성이 적었는데, 그 이유는 주석도금층이 얇았기 때문으로 판단된다.

(c)는 니켈도금강판의 브레이징 접합계면을 나타낸 것으로 철과 브레이징 접합부 계면에 반응층이 생성되었다. 또한 접합계면으로부터 시작된 망형태의 공정상이 생성되었으며, 그 외주에는 입방정 형태의 합금상이 석출되었다. Nasiri¹⁵⁾ 등에 따르면 상기의 입방정 형태의 합금상은 AlNi 화합물이며, 공정상은 Mg-Mg₂Ni로 구성되었다.

한편 브레이징 접합부의 측면부에는 플럭스 반응생성물로 추정되는 개재물이 관찰되었으며, 이러한 개재물이 존재하는 경우 부식이 급격히 진행될 것으로 예상되었다.

Fig. 5는 필러와이어가 용융되고 마그네슘합금 모재의 일부가 희석되어 형성된 브레이징 접합부(좌측)와

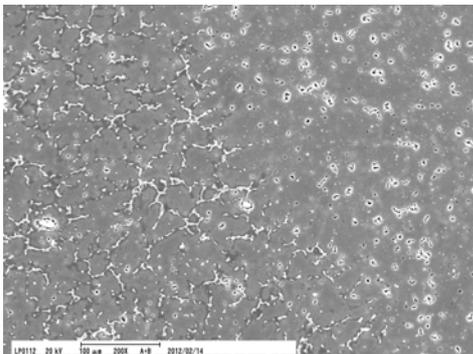


Fig. 5 SEM image of brazement/magnesium interface

AZ31 마그네슘합금 모재(우측)의 경계부근을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 마그네슘합금 모재의 경우 일반적인 AZ31 합금의 모재조직을 보이는 반면, 브레이징 접합부는 필러와이어에 함유된 다량의 Al 및 Zn에 의하여 공정상이 생성되었다. 코팅층의 종류에 따른 마그네슘/접합 계면의 조직의 변화는 뚜렷하지 않았다.

4.3 브레이징 접합부 강도

모서리 겹치기 이음부의 인장시험에서는 단면적을 정의하기가 곤란하다. 특히 브레이징 접합부의 강도가 모재보다 낮은 경우에는 실제 파단위치의 변화가 심하기 때문에 단위 길이당 하중으로 표현을 하는 것이 편리하다. Fig. 6는 브레이징 접합부를 포함하는 시편에 대한 최대하중을 도금층의 종류에 따라 나타낸 것이다. 접합부 강도는 Zn, Sn 및 Ni 도금층에 대하여 각각 146.5N/mm, 204.6N/mm 및 101.6N/mm이었다. Ni 도금강판의 경우 강도는 가장 낮게 측정되었지만, 두께가 얇은 강판의 국부적연신에 의하여 파단이 발생하였다. 두께가 두꺼운 Ni 도금강판을 대상재로 하는 경우 강도는 현저히 상승할 것으로 예상되었다. 도금층에 따른 접합부의 평균강도 및 표준편차를 정리하여 Table 9에 나타내었다. Sn 및 Zn 도금강판의 경우 파단이 브레이징부와 강판의 접합계면에서 발생하였는데, 유효 접합면적의 변동에 의하여 최대하중의 변동이 다

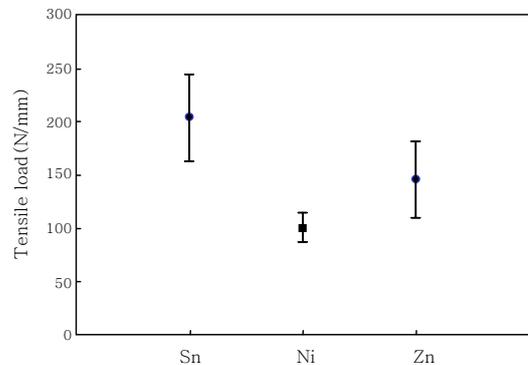


Fig. 6 Maximum tensile load of brazed joint for various coating materials

Table 9 Maximum tensile load of brazed specimen for various coatings

Coating	Maximum tensile load, N/mm	
	Mean	Std. deviation
Zn	146.5	35.2
Sn	204.6	40.1
Ni	101.6	13.4

소 컸다. 반면 Ni 도금강판의 경우 파단이 강판의 모재에서 발생하여 변동이 상대적으로 작았다. 소재강판의 두께가 마그네슘 모재에 비하여 충분한 경우 접합부 최대하중은 증가할 것으로 판단된다.

5. 결 론

AZ31 마그네슘합금과 도금강판의 이종이음부에 대하여 다이오드 레이저를 사용하여 브레이징 특성을 평가한 결과는 아래와 같다.

- 1) 도금강판에 대한 용융 필러와이어의 퍼짐성은 아연 도금강판이 가장 양호하였으며, 주석도금강판 및 니켈 도금강판의 순으로 열위하였다.
- 2) 젖은각은 Zn, Sn 및 Ni에 대하여 각각 15.5°, 39.0° 및 69.0°이었으며, Ni 도금층의 표면자유에너지가 가장 낮은 것으로 판단되었다.
- 3) 브레이징 접합부와 강판의 계면에는 Fe-Al 합금층으로 예상되는 반응층이 뚜렷하게 관찰되었다.
- 4) 브레이징 접합부는 필러와이어에 함유된 다량의 Al 및 Zn에 의하여 Mg 및 Mg-(Al, Zn)상으로 구성된 공정상이 생성되었다.
- 5) Ni 도금강판의 경우 Mg 및 Mg₂Ni로 구성된 것으로 추정되는 공정상이 형성되었으며, AlNi로 추정되는 입방정 형태의 합금이 생성되었다.
- 6) 브레이징 접합부의 최대 강도는 Zn, Sn 및 Ni 도금층에 대하여 각각 146.5N/mm, 204.6N/mm 및 101.6N/mm이었다. Ni 도금강판의 경우 두께가 두꺼운 소재를 사용하면 강도가 현저히 증가할 것으로 판단되었다.

Reference

1. S.S. Park, G.T. Bae, D.H. Kang, In-Ho Jung, K.S. Shin and Nack J. Kim : Microstructure and tensile properties of twin-roll cast Mg - Zn - Mn - Al alloys, Scripta Materialia, **57-9** (2007), 793-796
2. G. S. Cole and A. M. Sherman : Lightweight Materials for Automotive Applications, Materials Characterization, **35-1** (1995), 3-9
3. Alan A. Luo : Magnesium: Current and potential automotive applications, JOM, **54-2** (2002), 42-48

4. S. S. Park, W. -J. Park, C. H. Kim, B. S. You and Nack J. Kim : The twin-roll casting of magnesium alloys, JOM, **61-8** (2009), 14-18
5. M. Y. Lee, W. S. Chang and S. H. Kim : A Comparison of Weld Properties with or without Filler Wire on Laser Welding of Magnesium Alloy for Car Industry, Materials Science Forum, **580-582** (2008) 489-492
6. D. H. Yeo, Y. H. Jung, Y. S. Lee, S. W. Choi and M. Y. Lee : Development of hood with magnesium alloy sheet, Proceeding of The Korean Society of Automotive Engineers (2006) 1824-1829
7. M.Y. Lee, W.S. Chang and B.H. Yoon : ND:YAG LASER WELDING OF AZ31 SHEET FOR CAR INDUSTRY, ICALEO 2006, 291-297
8. Jon T. Carter, Andres R. Melo, Vesna Savic, Louis Gerard Hector Jr. and Paul E. Krajewski : Structural Evaluation of an Experimental Aluminum/Magnesium Decklid, SAE International Journal of Materials and Manufacturing, **4-1** (2011) 166-174
9. M.Marya, G.R. Edwards and S. Liu, An investigation on the effects of gases in GTA welding of a wrought AZ80 magnesium alloy, Welding Journal, **7**, (2004) 203~212s
10. M. Rethmeier, B. Kleinpeter and H. Wohlfahrt : MIG welding of magnesium alloys metallographic aspects, Welding in the world, **48-3** (2004) 28-33
11. H. Haferkamp, Fr.W. Bach, I. Burmester, K. Kreutzburg and M. Niemeyer, Nd:YAG laser beam welding of magnesium constructions, Proceedings of the third international magnesium conference, (1996) 89~98
12. Jong-Do Kim, Young-Sik Kim, Mook-Keun Song and Jung-Hang Lee, The weldability of the dissimilar magnesium alloy welded by fiber laser, Journal of KWS, **31-2** (2013) 63~68 (in Korean)
13. J.S. Noh, H.J. Kim, W.S. Chang and K.S. Bang, Evaluation of joint properties of friction stir welded AZ31B Mg alloy, Journal of KWS, **22-3** (2004) 252~257 (in Korean)
14. A.M. Nasiri, D.C. Weckman and Y. Zhou : Interfacial microstructure of diode laser brazed AZ31B magnesium to steel sheet using a nickel interlayer, Welding Journal, **92-1** (2013) 1s-10s
15. A.M. Nasiri, Y.Zhou and D.C. Weckman : Diode laser brazing of AZ31B to steel sheet using a Ni interlayer, AWS, November 2011



- 이목영
- 1965년생
- 포항산업과학연구원 신금속연구본부
- 마그네슘용접 및 레이저용접
- e-mail: acceleee@rist.re.kr



- 김숙환
- 1959년생
- 포항산업과학연구원 에너지플랜트연구본부
- 전자빔용접 및 에너지플랜트용접
- e-mail: weldksh@rist.re.kr