특 집 : 경량합금 Ti, Mg의 최신 용접기술

마그네슘 합금의 최신 동향 및 레이저 용접 특성

이 목 영·류 충 선·장 웅 성

Trends in Application of Magnesium Alloy and Its Welding Characteristics with Laser

Mok-Young Lee, Chung-Seon Ryu and Woong-Seong Chang

1. 서 론

자동차 배기가스는 대기 오염을 유발하는 주요 원인으로 알려져 있으며, 최근 그에 따른 지구 온난화로 인하여 자연재해의 심각성이 제기되고 있다. 또한 자동차의 주 연료인 석유에너지의 매장량 한계로 인하여 에너지 절감에 대한 필요성이 절박해지고 있다.

자동차 차체 무게의 절감은 배출가스 저감 및 연비 향상을 동시에 달성하는 것이 가능한 효율적인 방법이므로 많은 연구가 이루어지고 있다. 차체 경량화를 위한 방법으로는 최적설계기법에 의한 불필요한 소재절감, 레이저 용접 등의 신 공법적용을 통한 플랜지 제거, 비강도가 높은 소재를 사용한 무게 절감 등이 있다. 비강도는 무게 대비 강도를 의미하며, 비강도가 높은 소재는 상대적으로 두께가 얇은 혹은 가벼운 소재를 사용하여 동일한 강도를 확보하는 것이 가능하므로 결과적으로 무게를 줄이는 것이 가능하다.

비강도가 높은 소재에는 고강도 강, 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, 티타늄 등이 있다. 이 가운데에서 마그네슘합금은 가장 가벼운 소재이면서도 육방조밀형 결정구조로 구성되어 강성이 우수하여 최근 선진자동차 제조업체로부터 주목을 받고 있는 소재이다. 표 1에 자동차 경량화를 위하여 사용되는 몇몇 소재의 특성을 비교하였다. 단조형 마그네슘 합금인 AZ31은 고강도 알루미늄합금인 Al6061 보다도 비강도가 높다. 한편, 마그네슘 합금은 진동 혹은 충격을 흡수하는 특성을 보유하여 경량화 및 승차감 향상을 동시에 이루는 것이 가능하여 적용이 증가되고 있는 추세이다[1-9].

해외 선진업체들은 기술의 정점에 위치하면서도 중장기 정부 프로젝트를 활용한 심도높은 연구를 진행하고 있다. 미국에서는 FCVT (FreedomCAR and Vehicle Technologies) 프로젝트에서 자동차에 마그네슘을 적용하기 위한 중장기적인 연구를 진행하고 있으며, EU에서는 Brite-Euram 및 그 후속프로그램인 Framework Programme을 통하여 지속적인 연구를 수행하고 있다. 그러나, 아직까지 국내 대부분의 산업계는 종래의 철강재 위주의 설비, 인력 및 기술에 의한 생산기반에 그친 게 현실이다. 최근 정부의 연구개발사업이 시작되고 있지만 국내의 기술수준과 선진국의 연구개발동향으로 볼 때 부족한 점이 없지 않다[10-11].

Table 1 Density and tensile properties for automotive materials

Material	Density (g/cm^3, 20℃)	Tensile properties		
		YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
Pure Mg	1.74	69	185	4
AZ31	1.78	220	290	15
Plastic	1.33	151	158	7
Pure Al	2.7	20	55	55
Al 6061-T6	2.68	276	310	16
Steel	7.8	200	320	40

본 논문에서는 부품 실용화를 위한 마그네슘 합금의 최근 동향 및 이를 이용하여 부품을 제조하는데 필수적인 공정의 하나인 레이저용접에 대하여 고찰하였다.

2. 실용 마그네슘 합금의 최근 동향

마그네슘의 밀도는 1.74g/cm^3로 실용 구조용 금속가운데에서 가장 가벼우며, 그 외에 아래와 같은 여러 가지 특성이 있다.

- 밀도가 낮다.
- 슬립계가 적다.
- 전자파 차폐성능이 우수하다.
- 진동 혹은 충격에 대한 감쇄능이 우수하다.
- 절삭성이 우수하다.
- 상온에서 소성변형이 어렵다.
- 산화력이 강하다.
- 열팽창계수가 크다.

- 열 및 전기전도도가 높다.

상기의 특성은 사용되는 용도에 따라 장점이 되기도 하고 단점이 되기도 한다. 가령, 마그네슘의 높은 비강도는 구조용 소재로 적합하며, 우수한 전자파 차폐성능은 휴대용 전자기기의 케이스로 적합하며, 열전도도는 방열부품으로 사용하는 경우에 장점으로 작용한다. 그러나 낮은 상온 연신율은 복잡한 부품의 프레스가공을 어렵게 하며, 산화력 및 열팽창은 용접공정에서 장애로 작용한다.

순수한 마그네슘은 강도가 낮아서(인장강도 185MPa) 경량소재로서 효율이 적고, 연신율이 낮아서(상온 연신율 4%) 성형이 곤란하며, 그 외에 산화성, 주조성, 내식성 등 부품실용화측면에서 여러 가지 어려운 점이 있다. 마그네슘의 단점을 보완하기 위하여 여러종류의 합금원소를 첨가하는데, 대표적인 합금원소는 아래와 같다[12].

- 알루미늄(Al)

알루미늄은 마그네슘의 합금원소로 가장 널리 사용되는 것으로, 강도 및 경도가 증가하고, 용탕의 유동성을 향상시키고 응고범위를 증가시켜 주조성을 개선시킨다. 그러나 알루미늄은 마그네슘과 금속간 화합물을 형성시켜 연성 및 고온 크리프 저항성을 저하시킨다. 일반적인 상용화된 합금에서 알루미늄의 첨가량은 중량비로 10% 이내이다. 압연 혹은 압출 등의 단조형 합금에서는 6wt% 이내를 첨가하면, 알루미늄이 마그네슘 기지내에 고용되어 강도 및 연신율이 비교적 양호하다.

- 아연(Zn)

마그네슘 합금에서 아연은 알루미늄 다음으로 효과적인 첨가원소이다. 아연은 고용강화에 의하여 상온 강도를 증가시키며, 결정립을 미세화하고, 용탕의 유동성을 향상시킨다. 일반적으로 AZ계열(Al-Zn-Mg 3원계) 합금에서는 응고균열을 방지하기 위하여, 아연 첨가량을 1wt% 이내로 제한한다.

- 망간(Mn)

망간의 첨가는 기계적 강도에는 거의 영향을 미치지 않으며, 내식성을 향상시키는 효과가 있다. 망간의 첨가량을 증가시키면 용융온도를 상승시키며, 용접 열영향부의 결정립 성장을 억제하는 효과가 있다. 그러나 마그네슘 기지에 대한 고용한이 작아성 첨가량은 1.5wt% 이내로 제한된다.

- 칼슘(Ca)

칼슘은 용탕표면의 치밀한 CaO 화합물을 형성하여 발화온도를 상승시키는 것으로 알려졌다. 칼슘을 첨가한 난연성 마그네슘 합금은 용탕 가스 가운데에서 SF6의 사용량을 감소시킬 수 있는데, SF6 가스의 지구온실효과는 CO_2 가스의 24,000배에 해당한다. 그러나 마그네슘 합금에서 칼슘의 효과에 대해서는 아직 구체적으로 확립이 되어 있지 않은 상태이다. 칼슘을 0.3wt% 이상 첨가하면 용접시 응고균열이 발생 할 수 있다.

마그네슘 합금은 첨가된 합금원소의 종류와 성분에 따라 다양한 합금계가 개발되어 있다. 구조재로 사용되는 마그네슘 합금은 주조형(casting) 및 단조형(wrought) 합금으로 구별된다. 주조형에는 사형주조 혹은 금형주조용 및 다이캐스팅용이 있으며, 단조형에는 단조용, 압출용 및 판재용이 있다. 판재용을 제외하고는 사용상의 큰 문제점은 없으므로 본 논문에서는 판재용 마그네슘 합금에 관하여 주로 서술하였다.

마그네슘 합금에 대해서는 한국산업규격에서 그 종류 및 일반적인 사양을 제정하였으며, 표 2에 나타낸 바와 같이 KS D 6710에는 판재용 마그네슘 합금에 대한 규격을 정하였다. 지금까지 판재용 마그네슘 합금은 압출에 의하여 제조하거나, 압출재를 열간에서 재압연하여 제조하였다. 그러나 최근 국내의 연구소에서 마그네슘 합금의 잉곳을 용융시킨 후, 쌍롤법에 의하여 박슬라브로 주조하고, 이 판재를 열간에서 반복하여 압연하는 새로운 생산기술을 개발하였다. 이 기술에서는 기존의 AZ31 합금조성을 사용하였는데, 최종 압연판재의 미세조직, 기계적특성 및 성형성 등이 종래의 압출판재에 비하여 매우 우수한 것으로 알려졌다. 따라서 한국산업규격 개정의 필요성이 있다[13-14].

지금까지 국내의 마그네슘 부품의 수요는 주로 전자부품 케이스 및 자동차 부품류이다. 마그네슘 전자부품 케이스는 노트북 케이스, 디지털 카메라 케이스, PDA 케이스 등이 있다. 자동차 부품류로는 클릭의 스티어링 휠 코어를 2002년 국내 최초로 Gibbs korea에서 개발해

Table 2 Chemical contents and mechanical properties of magnesium plate, band and coil

종류	기호	대응ISO기호	상당합금	화학성분				질별 기호	인장강도	항복강도	연신율
				Mg	AI	Zn	Mn		(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)
1종B	MP1B	MgA13Zn1(A)	AZ31B	Bal	2.4~3.6	0.50~1.5	0.15~1.0	○	220	105	11
1종C	MP1C	MgA13Zn1(B)		Bal	2.4~3.6	0.5~1.5	0.05~0.4	○	220	105	11
7종	MP7			Bal	1.5~2.4	0.50~1.5	0.05~0.6	○	190	90	13
9종	MP9	MgZn2Mn1	MAG131	Bal		1.75~2.3	0.6~1.3	○	120	120	8

양산을 했다. 2004년 NF 소나타에 Steering column bracket을 적용하였으며, 2005년에는 그랜져 TG의 운전석과 조수석 시트 프레임에 적용하였다.[15] 그러나 현재까지 국내 자동차업계의 마그네슘 합금의 적용현황은 다이캐스팅 부품에 한정되어 있으며, 판재류의 적용은 전무한 실정이며 관련 연구도 저조한 편이다. 다이캐스팅 부품은 마그네슘 잉곳을 생산하며 노동단가가 저렴한 중국에 비해 경쟁력을 잃어가고 있으므로, 향후에는 판재 성형 및 용접에 의한 고부가가치 부품제조 분야로 관심을 집중해야 할 것이다.

3. 마그네슘 합금의 레이저 용접

마그네슘 합금의 용접은 아크용접, 저항용접, 마찰교반용접, 레이저용접 등이 가능하다. 그러나, 철강재료와 달리 용접과정중에 상변태를 하지 않기 때문에 용접부는 모재에 비하여 강도가 저하되며, 산화성이 강하고, 열 및 전기전도도가 높기 때문에 용접이 쉽지않다. 레이저 용접은 에너지밀도가 높고, 용접속도가 빠르고, 용접부가 작기 때문에 마그네슘 합금의 용접에는 타 용접공정에 비하여 상대적으로 용접부 특성이 우수한 것으로 알려졌다.

3.1 레이저 용접 연구 동향

Nakata[16] 는 CO_2 레이저를 이용하여 마그네슘 합금 AZ31B를 용접하였는데, 이때 속도는 최대 15 m/min에서도 건전한 용접부를 얻었다. 용접부에 기공 혹은 균열이 발생하지 않았으며, 모재 대비 동등 이상의 용접부 강도를 확보하였다. GTA 용접공정과 비교하여 훨씬 우수한 용접부 특성을 보였다.

Haferkamp[17] 등은 2kW Nd:YAG 레이저를 이용하여 단조형 합금(AZ21A, AZ31B)과 다이캐스트 합금(AM60B, AZ91D)에 대한 용접성을 평가하였다. 두께 1.36mm의 AZ31B 합금을 아르곤 보호가스를 사용하여 용접하였으며, 이때 용접부 강도는 270MPa 및 파단 연신율은 16% 가량이었으며, 기공 혹은 균열 등과 같은 내부 결함은 발생하지 않았다. 대기중에서 다이캐스트에 의하여 제조한 두께 3.5mm의 AM60B 합금의 용접부에서는 다량의 기공이 발생하였다. 그러나 진공 다이캐스트에 의하여 제조한 두께 2.0mm의 AZ91D 합금의 용접부는 기공이 현저하게 감소하였다.

Bumester[18] 등은 단조형(AZ21A 및 AZ31B) 및 진공 다이캐스트(AM60B 및 AZ91D) 마그네슘합금에 대한 레이저(CO_2 및 Nd:YAG) 용접성을 GTA 용접공정과 비교하였다. 마그네슘 합금의 높은 열전도도, 열팽창율 및 산화막에 의하여 용접결함이 발생할 수 있다고 하였으며, 6%Al 혹은 1%Zn 이상의 합금원소가 첨가되면 용접부 미세균열이 발생한다고 하였다. 용접부 기공은 모재의 품질에 직접적으로 관계가 있으며, 높은 순도의 진공 다이캐스트재는 건전한 용접부를 보였다. 필러 와이어를 사용하면 모재의 기공 및 증발 손실량을 보상할 수있기 때문에 용접부의 품질을 개선시킬 수 있다고 하였다.

Weisheit[19] 등은 주조형 및 단조형 마그네슘 합금의 CO_2 레이저 용접에 관한 연구를 수행하였다. 레이저 용접의 장점은 우수한 빔의 집중성인데, 높은 에너지 밀도의 작은 점으로 집중된 레이저 빔에 의하여 용접 열영향부 및 변형을 감소시킨다. 용융부의 결정립이 미세화되어 경도는 모재와 유사하지만, 응고수축에 의한 기공 및 비금속 개재물에 의하여 항복강도는 0.2% 가량 감소하였다. 용접부의 결정립이 미세화 되었음에도 불구하고 충격강도는 모재 대비 50% 가량 감소하였다.

Draugelates[20] 등은 마그네슘이 레이저 빔을 잘 흡수하여 레이저용접에 유리하다고 하였으며, 용접속도는 2.5~9 m/min에서 기공 및 언더컷이 최소화되었다.

Haferkamp[21] 등은 Nd:YAG 및 CO_2 레이저로 AZ91D를 고속으로 용접하는 것이 가능하지만, 빠른 용접속도는 급냉에 의하여 경도가 높아진다고 하였다. 그러나 AZ91에 대한 Weisheit의 이전 연구결과에서는 모재와 차이가 없는 것으로 보고하였다.

Lehner[22] 등은 고진공에서 주조된 다이캐스트재 AZ91HP 및 AM50HP의 맞대기, 겹치기 및 필렛이음부를 3kW Nd:YAG 및 6kW CO_2 레이저로 용접하였다. 낮은 레이저 출력 및 느린 용접속도에서 기공이 적게 발생하였는데, 이것은 용융지에서 가스방출이 용이하였기 때문으로 추측하였다. 용접부에 대한 기계적 특성평가시험에서는 모든 이음부 형태에서 양호한 성능을 나타내었다. 필렛이음부는 상대적으로 정밀한 레이저 빔 정렬이 요구되었고, 겹치기이음부에서는 판재 사이의 간극이 약간 있을 때 보다 우수한 특성을 나타내었다. 인장시험에서 파단은 용융영역과 열영향부 사이에서 발생하였으나, 기공이 과도하게 발생한 경우에는 이곳에서 파단이 발생하였다.

Draugelates[23] 등은 AZ31B에 대하여 레이저 TWB 용접을 하였는데, 용접부 인장강도가 모재와 유사하였다. 용접부의 경도는 모재보다 다소 낮았고, 열영향부는 용접열에 의하여 가공경화(strain hardening)가 감소하였다.

Leong[24] 등은 AZ31B에 대해 CO_2 및 Nd:YAG 레이저 용접에 관한 연구를 수행하여 흡수율이 높은

Nd:YAG 레이저가 CO_2 레이저에 비하여 용접부 품질이 우수하다고 하였다. 마그네슘의 레이저 용접은 철강재료에 비하여 흡수율, 액상의 점성 및 액상의 표면장력이 낮기 때문에 상대적으로 어렵다고 하였다.

Marya[25] 등은 Nd:YAG 레이저를 이용하여 AZ91의 용접성을 평가하였다. Lehner의 결과와는 달리 용접부 기공은 레이저 빔의 직경 감소 및 용접속도 증가에 의하여 감소되었으며, Burmester와는 달리 용접중에 소재의 증발은 발생하지 않았다. 그들은 비평형 응고에 의하여 용접속도가 증가할 수록 $Al_{12}Mg_{17}$ 금속간 화합물이 증가한다고 하였다.

Dhahri[26] 등은 AZ91 및 WE43에 대한 CO_2 레이저 용접성을 연구하였다. 레이저빔의 집속직경 및 초점위치에 따라 비드폭이 변화하였으며, 초점이 소재 표면 혹은 표면 아래 1mm인 경우 적정한 용접부를 형성하였다. 헬륨 보호가스에 의하여 플라즈마 발생을 감소시켰으며, 50l/min 이상의 유량에서 양호한 용접부를 얻었다.

Hiraga[27] 등은 1.7t의 AZ31B에 대하여 CO_2 및 Nd:YAG 레이저을 사용하여 보호가스 및 레이저 파장의 영향에 대하여 연구하였다. 적절한 용접부를 얻기 위하여 CO_2 레이저 용접에서는 표면 및 이면에 보호가스를 사용하여 하지만, Nd:YAG 레이저 용접에서는 표면 보호가스만을 사용하여도 충분하였다. CO_2 레이저 에 비하여 Nd:YAG 레이저를 사용하는 경우 용접부 경도 및 인장강도가 우수하였다.

Sun[28] 등은 2.3t의 AZ31B에 대하여 GTAW, CO_2 및 펄스 Nd:YAG 레이저 용접성을 비교 평가하였다. CO_2 레이저 용접에서 용접속도는 초점위치에 크게 영향을 받았다. 펄스 Nd:YAG 레이저 용접에서는 대부분의 균열이 발생하였는데, 그 원인은 저융점상 생성에 따른 연성감소에 기인하는 것으로 추측하였다. 용접부의 경도는 모재에 비하여 15~20% 가량 감소하였다.

Taewon[29] 등은 AZ31B에 대하여 Nd:YAG - TIG 하이브리드 용접을 연구하였는데, 이때 용접부 강도는 모재의 95% 가량이었다.

단조형 및 주조형 마그네슘합금의 용접에는 레이저 용접공정이 다른 공정에 비하여 우수한 결과를 보여주었다. 주조재의 용접에서는 대부분 기공이 발생하였지만, 높은 진공상태에서 주조한 소재는 기공이 현저히 감소하였다. 레이저 용접에서 집중열에 의하여 용접변형 및 균열은 최소로 되었다. 전반적으로 마그네슘 소재의 용접에는 타 공정에 비하여 레이저 용접이 추천되었다.

3.2 마그네슘 합금 레이저 용접 특성

그림 1은 박슬라브 주조 및 열간압연으로 제조된 두께 1.5mm AZ31 마그네슘합금판재 레이저 용접부의 비드 외관을 나타낸 것이다. 맞대기 이음부의 간극 및 용접부 증발에 따른 용융량 부족을 보충하기 위하여 필러와이어를 사용한 경우와 비교하여 나타내었다. 레이저 용접도중에는 흰색의 증기 혹은 미립자가 다수 발생하였으나, 비드 외관은 비교적 양호하였다. 물론, 비드 표면은 어두운 색의 산화분진이 덮혀 있지만 쉽게 제거되었다.

그림 2는 그림 1에서 용접비드의 단면조직을 나타낸 것이다. 필러와이어를 사용하지 않은 경우에는 전술한 바와같이 이음부 간극, 용접부 증발 및 비드 처짐에 따른 언더컷 혹은 용융량 불량이 발생하였으나, 필러와이어를 사용한 경우에는 상부 혹은 하부의 덧살이 형성되었다.

그림 3은 용접부 및 열영향부 단면의 미세조직을 나타낸 것이다. 필러와이어를 사용한 경우에는 γ-$Mg_{17}Al_{12}$ 혹은 β-$Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 2상(second phase)의 분율이 상대적으로 작았으며, 국부적으로 미세한 기공 혹은 개재물이 존재하였다. 그러나 용접부 균열은 발생하지 않았다.

그림 4는 마그네슘 합금 레이저 용접부의 기계적 특성을 나타낸 것이다. 레이저 용접부의 강도 및 연신율은 모재에 비하여 다소 감소하였다. 필러와이어를 사용하는 경우 인장강도 및 항복강도는 다소 감소하였으나, 연신

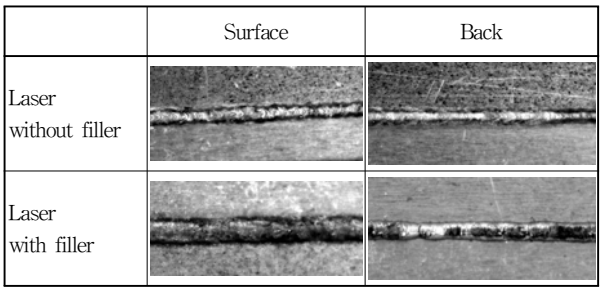
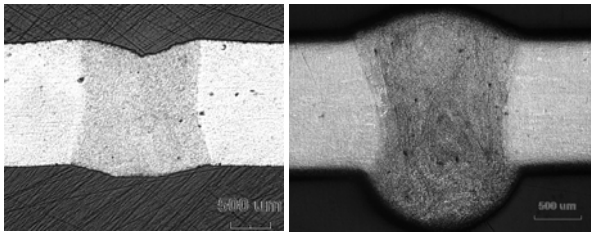


Fig. 1 Appearances of weld bead without and with filler wire



<without filler wire> <with filler wire>

Fig. 2 Cross sectional views of weld bead without and with filler wire

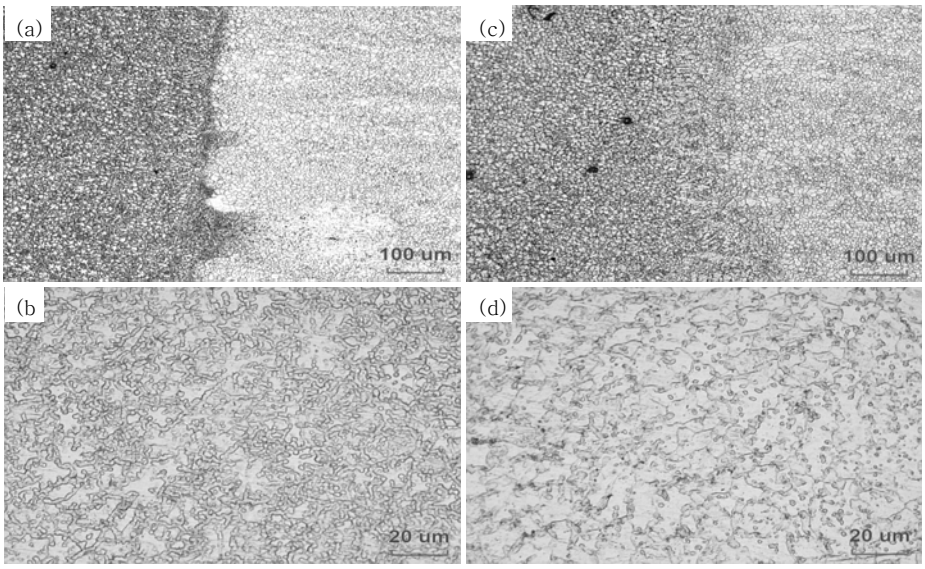


Fig. 3 Microstructures of weld bead (a) HAZ, (b) weld metal without filler, (c) HAZ and (d) with filler wire

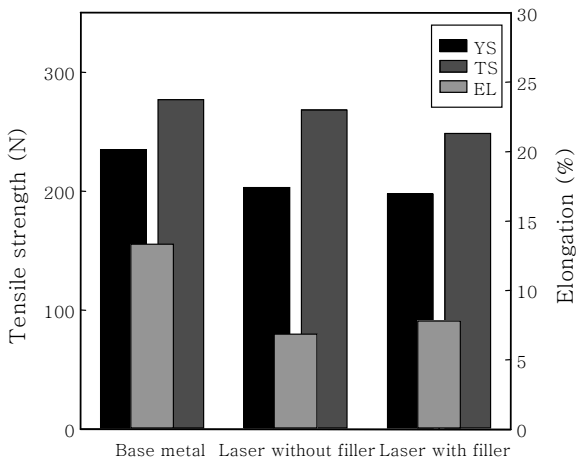


Fig. 4 Comparisons of tensile properties in laser welding without and with filler wire

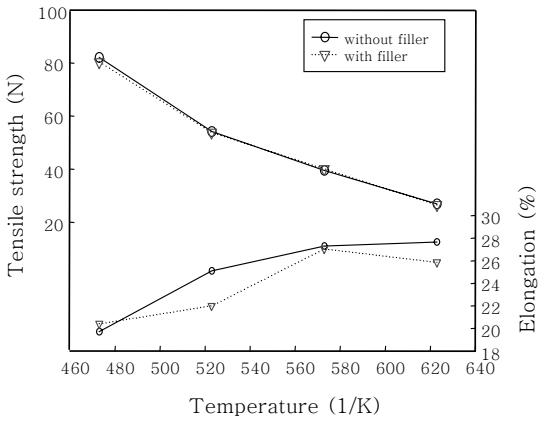


Fig. 5 Tensile strength and elongation change according to the temperature

율은 오히려 다소 증가하였다. 이러한 원인은 그림 3의 단면 미세조직에서 알 수 있는 것과 같이 2상 조직 분율 감소에 기인하는 것으로 추측된다.

그림 5는 필러 와이어에 따른 용접부 인장강도 및 연신율을 온도에 따라 나타낸 것이다. 용접부 인장강도는 온도증가에 반비례하여 감소한 반면 연신율은 온도에 비례하여 증가하였다. 온도에 따른 연신율의 증가량은 온도가 증가할 수록 감소하였으며, 온간 성형시 한계 연신율은 28% 가량이었다.

박슬라브 주조 및 열간압연에 의하여 제조된 두께 1.5mm 마그네슘 합금 AZ31을 레이저로 용접하여 광폭 TWB를 제조하였다. 이 TWB 판넬을 250도 가량의 온도에서 성형하고, 조립하고, 도장을 하여 프로토타입 자동차 엔진후드를 제조하였다. 그림 6에 마그네슘 압연판재를 이용하여 제조한 자동차 엔진 후드를 나타내었다.

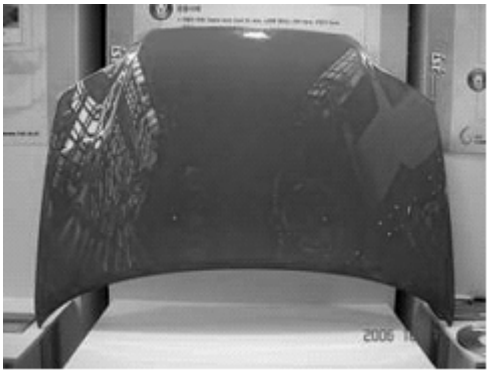


Fig. 6 Press formed, assembled and painted engine hood with laser welded TWB panel

6. 결 론

미래의 환경, 에너지, 노령화 등의 문제를 해결하기 위하여 마그네슘과 같은 친환경소재에 대한 수요는 지속적으로 증가할 것이다. 물론 현재의 잣대로 평가를 하면, 분명 경제성을 확보하는 것이 쉬운 일은 아니다. 그러나 분명 미래에는 기능 혹은 성능 대비 비용 즉, 경제성을 뛰어 넘는 새로운 부가가치가 존재할 것이다. 가령, 설계개념에서부터 제품이 최종 사용자에게 인도되는 전 과정에서 철저하게 "친환경 concept"으로 창출된 대상물에 대해서는 현재의 상식으로는 납득하기 어려운 비용을 지불할 수도 있을 것이다. 유럽, 미국 등에서 마그네슘 소재의 실용화를 위하여 막대한 자원을 투입하는 데에는 그만한 이유가 있을 것이며, 원하는 기술을 확보하게 되면 환경규제, 지적재산권 등과 같은 다양한 방법을 동원하여 경제적인 부와 연결시키려 할 것은 자명한 사실이다.

철강재 위주의 국내 제조환경은 설비 혹은 기술적인 측면에서 비철소재에 대한 거부감이 있으며, 여러 가지 이유를 들어서 적용을 지연시키려는 경향이 있다. 그러나 미래의 국가 경쟁력 확보를 위해서는 체계적이고 지속적인 신기술 개발 및 실용화에 매진을 해야 할 것이다. 마그네슘 합금에 대한 기술개발 및 실용화는 그러한 측면에서 새로운 시도가 될 것이다.

참 고 문 헌

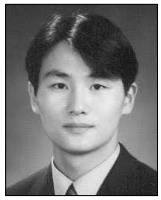
1. R. Porro and P. Beatrice, The importance of weight reduction for the automobile industry - Fiat auto's experience in the use of magnesium, Proceedings of 3rd International Magnesium Conference, (1996) 167~176
2. Gerald S. Cole, Issues that influence magnesium's use in the automotive industry, Materials Science Forum Vols.419~422 (2003) 43~50
3. Edward J. Vinarcik, Opportunities for magnesium sheet in automotive lightening, Light Metal Age, April (2004) 56~57
4. S. Schumann and H. Friedrich, Current and future use of magnesium in the automobile industry, Materials Science Forum Vols. 419~422 (2003) 51~56
5. Tadataka Kaneko and Mesami Suzuki, Automotive applications of magnesium alloys, Materials Science Forum Vols. 419~422 (2003) 67~72
6. S. Schumann and F. Friedrich, The use of magnesium in cars - today and in future, Magnesium alloys and their applications, (1998) 3~13
7. Alan A. Luo, Wrought magnesium alloys and manufacturing processes for automotive applications, SAE international (2005) 161~169
8. C.D.Lim, B.S.Ryu and K.Y.Son, Application of magnesium alloy in automobile part, Machinery and Materials, N.12 (2004) 66-75(in Korean)
9. W.S.Chang, J.S.Noh, H.J.Kim and K.S.Bang, Trends on magnesium welding technology, TRENDS IN METALS & MATERIALS ENGINEERING, (2004) 55-64 (in Korean)
10. http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels
11. http://cordis.europa.eu
12. Wayne Chuko, Magnesium Joining for Automotive Applications, EWI Report No. MR0217, (2002)
13. Michael M. Avedesian, Magnesium and Magnesium alloy, ASM Specialty Handbook, 12~25
14. KS D 6710 마그네슘 합금 판, 대 및 코일판
15. 마그네슘 신기술 교육 워크샵, 한국마그네슘기술연구조합, 2005.5
16. Nakata, K., Welding of Magnesium Alloys using Cabon Dioxide Gas Laser, New Technology Japan, 22-11 (1995)
17. H. Haferkamp, Fr.-W. Bach, I. Burmester, K. Kreutzburg and M. Niemeyer, Nd:YAG laser beam welding of magnesium constructions, Proceedings of the 3rd international magnesium conference, (1996) 89~98
18. Burmester, I., Laser Beam Welding of Magnesium Alloys, Proceedings of Technological Developments and Advances for Australian Industry (1997)
19. Weisheit, Al, Galun, R., and Mordike, B.L., Laser Welding of Various Magnesium Alloys - Micro- structure and Mechanical Properties, Magnesium Alloys and their Applications (1998)
20. Draugelates, U., Schram, A,, Bouaifi, B., and Kettler, C., Joining Technologies for Magnesium Alloys, Werkstoff-Infromationsgesellschaft GmbH, Magnesium Alloys and their Applications, (1998) 445~450
21. Haferkamp, H., Dilthey, U., Trager, G., Burmester, I.,, and Niemwyer, M., Beam Welding of Magnesium Alloys, Magnesium Alloys and their Applications (1998)
22. Lehner, C., Reingart, G., and Schaller, L., Welding of Die-Casted Magnesium Alloys on Production Machines, Journals of Laser Applications, 11-5 (1998)
23. Draugelates, U., Schram, A., Hillebrecht, M., and Fritzsche, C., Investigation of the Strain Behavior of Laser-Beam and High-Frequency-Welded Seams of Tailored Blanks using Electronic Laser Speckle Interferometry, Pro. IBEC (1998)
24. Sanders, P. Keske, J. S., Leong, K. H., and Kornecki, G., High Power Nd:YAG and CO_2 Laser Welding of Magnesium, Journal of Laser Applications, 11-2 (1999)
25. Marya, M. and Edwards, G. R., Welding Variable Effects on the AZ91 Laser Weld Microstructure, 81st American Welding Society Annual Meeting, Chicago, IL (2000)
26. Mohamed Dhahri, Jean Eric Masse, Laser Welding of AZ91 and WE43 Magnesium Alloys for Automotive and Aerospace Industries, Advanced Engineering Materials, 3-7 (2001) 504~507
27. H. Hiraga, T. Inoue, S. Kamado and Y. Kojima, Effects of

the shielding gas and laser wavelength in laser welding magnesium alloy sheets, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 19-4 (2001) 591-599

28. Z. Sun, D. Pan and J. Wei, Comparative evaluation of tungsten inert gas and laser welding of AZ31 magnesium alloy, Science and Technology of Welding and Joining, 7-6 (2002) 343~351

29. Taewon Kim, Jongcheol Kim, Yu Hasegawa and Yasuo Suga, Welding of AZ31B Magnesium Alloy by YAG Laser / TIG Arc Hybrid Welding Process, Materials Science Forum, Vols. 449-452 (2004) 417~420

• 이목영(李穆泳)
• 1965년생
• 포항산업과학연구원 용접연구실
• 대출력화이버레이저용접, 하이브리드용접
• e-mail : accelee@rist.re.kr



• 류충선(柳忠善)
• 1978년생
• RIST 용접센터
• 용접야금, 레이저 용접
• e-mail : aryu01@rist.re.kr

• 장웅성(張雄成)
• 1959년생
• RIST 용접센터
• 철강 및 비철 용접성, 신용접응용기술
• e-mail : wschang@rist.re.kr