

# 마그네슘합금의 레이저용접 기술동향

김영식\* · 유호천\*

\*한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램

## Recent Technological Tendency of Laser Welding for Magnesium Alloy

Youngsik Kim\* and Hocheon Yoo\*

\*KISTI ReSEAT Program

### 1. 서 론

최근 들어 더욱 심화되고 있는 CO<sub>2</sub> 배출규제, 화석 연료의 고갈, 연료비의 상승 등에 대응하는 수단으로 각종 수송용 기계의 고강도, 경량화는 필수적인 과제로 등장하고 있다. 이를 달성하는 수단으로 실용고속 중에서 가장 우수한 경량성, 비강도 특성을 지닌 마그네슘 합금에 대한 관심이 커지고 있으며, 앞으로 자동차, 철도차량, 항공기와 같은 수송기계를 비롯하여 전자파 차폐성, 방열성 등의 특성을 이용하여 가전, 휴대용 전자 기기 분야에도 마그네슘합금의 수요가 크게 증대할 것으로 전망된다.

마그네슘합금의 사용분야 확대를 위해서는 현재 주로 사용되고 있는 주조 제품 일변도에서 벗어나 압연재나 압출형재와 같은 소성가공재료의 제조기술과 용접기술 개발이 필수적이다. 그러나 이들 기술은 아직 확립단계에 와 있지 않으며, 용접기술의 경우, 여러 가지 용접 방법이 시도되고 있으나 저입열, 고에너지 밀도의 레이저 열원을 이용한 레이저용접이 높게 평가되어 이에 대한 연구개발이 세계적으로 활발히 전개되고 있다. 마그네슘의 레이저 용접은 여타의 용접에 비해 생산성이 높고 변형과 결함발생률이 낮아 매우 효율적인 용접법으로 평가되고 있다<sup>1)</sup>.

이 해설에서는 마그네슘합금에 대한 레이저용접 기술의 국내외 기술개발 동향을 분석하였다. 그리고 향후 이 기술의 전망과 연구 개발전략을 제시함으로써 국내에서 마그네슘합금 활용에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 마그네슘 합금의 최근의 동향과 용접성

### 2.1 마그네슘합금에 관한 최신동향

세계 각국들은 중장기 정부 프로젝트를 활용한 심도 높은 연구를 진행하고 있다. 미국에서는 FCVT(Freedom CAR and Vehicle Technologies) 프로젝트에서 자동차에 마그네슘을 적용하기 위한 중장기적 연구를 진행하고 있으며, EU에서는 EU 6th framework program으로 AEROMAG라고 불리는 EADS, AIRBUS, 재료메이커, 가공 메이커들이 참가 기획한 마그네슘합금 연구 프로젝트가 진행되고 있다<sup>3)</sup>.

지금까지 국내의 마그네슘 부품의 수요는 주로 전자 부품 케이스 및 자동차 부품류이다. 마그네슘 전자부품 케이스는 노트북 케이스, 디지털카메라 케이스, PDA케이스 등이 있다. 자동차 부품류로는 클릭의 스티어링 휠 코어를 2002년 국내최초로 Gibbs Korea에서 개발해 양산을 하였다. 2004년 NF 소나타에 Steering column 브라켓에 마그네슘합금을 적용하였으며, 2005년에는 그랜저 TG의 운전석과 조수석 시트 프레임에 적용하였다<sup>4)</sup>.

그러나 현재까지 국내 자동차업체의 마그네슘합금 적용 현황은 다이캐스팅 부품에 한정되어 있으며, 판재류의 적용은 전무한 실정이며 관련연구도 저조한 편이다. 다이캐스팅 부품은 마그네슘 잉곳을 생산하며 노동단가가 저렴한 중국에 비해 경쟁력을 잃어가고 있으므로 향후에는 판재성형 및 용접에 의한 고부가가치부품 제조 분야로 관심을 집중해야 할 것이다.

### 2.2 마그네슘합금의 용접성

마그네슘합금의 아크용접 방법으로는 GMAW용접법과 GTAW용접법이 있다. 이들 용접은 마그네슘합금 표면에 산화물층을 제거하도록 청정작용이 있는 DCEP 전원을 사용해야 한다. GMAW 용접부의 강도는 어떤 용가재를 사용하느냐에 따라 달라지는데 적절한 용가재

의 사용 시 모재강도의 약 80%까지 나올 수 있다. 한편 GTAW의 경우에는 항복강도, 인장강도, 연신율이 모재의 85% 이상의 기계적 성질을 얻을 수 있다<sup>5)</sup>.

이러한 아크용접 방법은 마그네슘의 낮은 기화점으로 인해 용융된 마그네슘합금의 아크열에 의한 증발현상으로 스파터 발생이 많아진다는 문제점이 있다. 또한 상대적으로 낮은 용접속도로 생산성이 낮아지고 용접 후 심한 뒤틀림현상이 발생 할 수 있다. 그리고 용접 시 응고하면서 응고균열이 발생 할 수 있다.

비용용 용접법에는 저항용접법과 마찰교반용접이 있다. 마그네슘합금에 대한 저항용접은 주로 점 용접법이 이용되고 있으며, 일반적으로 마그네슘합금 저항 점용접부는 정적강도는 우수하지만 피로강도는 리벳접합이나 접착접합보다도 낮기 때문에 점용접된 구조물은 주로 정하중이 요구되는 곳에 쓰이며, 진동이 심한 곳에는 사용되지 않는다. 마그네슘합금의 마찰교반용접은 용융 응고에 수반되는 변형이나 여러 가지 결함들을 동반하지 않기 때문에 건전한 용접부를 얻을 수 있다<sup>6)</sup>. 접합부의 조직은 모재, HAZ부, THAZ(Thermo-Mechanically Affected Zone : 열적 기계적 영향영역)부, SZ(Stirred Zone : 교반영역)부, 재결정영역의 5개의 영역으로 이루어지며, 결정립의 성장 및 재결정이 일어나는 교반역과 HAZ의 경도는 모재에 비해서 약간 낮아진다<sup>7,8)</sup>. 마그네슘합금의 FSW접합부의 인장 특성은 모재의 약 97%값을 갖는 것으로 나타나 85%의 GTAW접합부보다 우수하며 99%의 값을 갖는 레이저 용접부의 인장특성과 거의 같다<sup>5)</sup>.

레이저용접은 GTAW용접에 비해 용접부의 결정조직이 매우 미세하다. 이것은 레이저 용접에서 에너지 집중도가 높고 냉각속도가 빠르기 때문이다. 특히 레이저 용접은 낮은 정교한 입열량, 작은 열영향부, 깊고 좁은 용융부, 낮은 잔류응력과 용접변형 및 빠른 용접속도 등의 장점을 지니고 있다.

레이저용접하는 동안에 마그네슘합금이 갖고 있는 고유한 문제점과 결함은 불안정한 용융지(weld pool), 스파터, 큰 용융지에 대한 드롭-쓰루(drop-through), 용융지(두꺼운 제품)에 대한 새그(sag), 언더컷, 다공성 산화개재물, 합금원소의 희석, 기포의 과도한 형성(특히, 다이캐스팅제품), 액화균열 및 응고균열 등을 열거할 수 있다<sup>8)</sup>.

마그네슘합금은 651°C의 낮은 용융점과 1107°C의 비등점을 지니고 산화하기 매우 쉽고 높은 열전도도를 가진 고유한 특성 때문에 용접하기가 대단히 어려운 소재이다. 그러나 불완전한 용접지, 강한 드롭-쓰루, 용접 새그 등과 같은 공정상의 문제점과 용접결함을 가장 효율적으로 해결할 수 있는 용접방법으로서 레이저용접방

법이 최선으로 평가되고 있다<sup>9)</sup>.

### 3. 마그네슘합금의 레이저용접에 관한 해외 기술 동향

#### 3.1 기술개발현황 분석결과

학술정보분석은 KISTI에서 제공되는 NDSL의 데이터 베이스를 이용하여 분석하였다. 검색식 ((magnesium or mg) AND (ti:laser weld\*)) AND PY : (2000-2010))으로 검색 결과 2000년 이후 국내의 논문이 합계 248건이 검색되었다. 그 내용을 제목과 초록을 검토하여 마그네슘 합금의 레이저 용접과 관련이 없는 논문을 제외하고 합계 217건이 추출되었다. 그림 1은 이와 같이 추출된 년도 별 발표건수를 정리한 것이다.

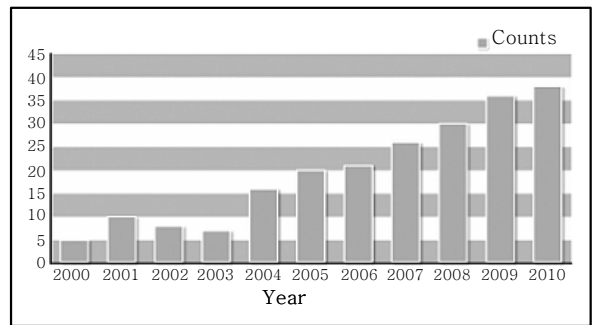


그림 1 2000년 이후 년도 별 발표건수

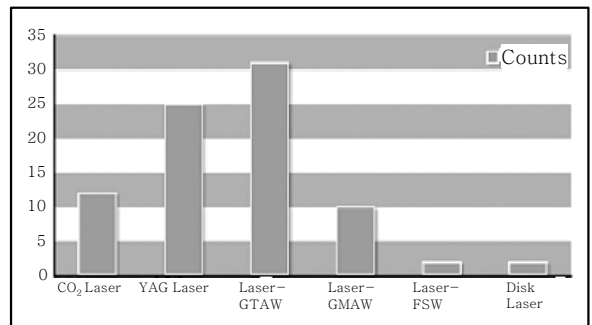


그림 2 레이저 광원 별 발표건수

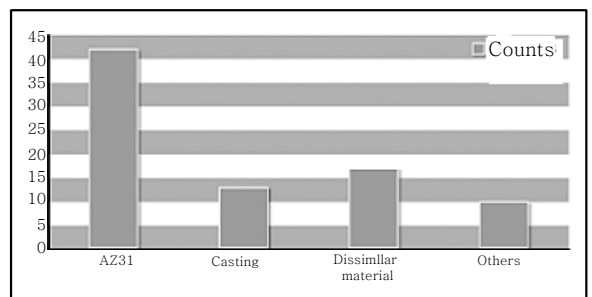


그림 3 대상 마그네슘합금별 분류

그림 2는 발표된 논문에서 사용된 레이저 광원 별 건수를 정리하여 보인 것이며, 그림 3은 대상재료 별로 정리한 내용이다.

이 결과에 의하면 2004년부터 논문 발표건수가 꾸준히 증가하고 있으며, 2008년부터 매년 30건 이상의 논문이 발표되고 있어 최근 2,3년에 마그네슘합금의 레이저 용접에 관한 관심이 증가하고 있음을 보이고 있다. NDSL 데이터 베이스에서 마그네슘합금에 대한 레이저 용접 연구는 1997년부터 나타나고 있어 이 분야의 연구는 1990년대 후반부터 시작되었다고 볼 수 있다.

레이저 광원별로는 레이저 하이브리드 용접법이 43건으로 전체의 52%를 차지하고 있으며, Nd:YAG 레이저가 25건으로 38%, CO<sub>2</sub>레이저가 12건으로 15%를 차지하고 있다. 하이브리드 용접의 내역을 살펴보면 레이저-GTAW 용접이 31건으로 압도적으로 많은 비중을 차지하고 있으며, 그 다음이 레이저-GMAW, 레이저-FSW 하이브리드 순으로 나타나 있다.

대상 재료로서는 AZ31 전신재 재료가 압도적으로 많아 48건으로 전체의 51%를 차지하고 있으며, 그 다음이 마그네슘과 알루미늄 또는 강과의 이종재 접합에 관한 연구가 18건으로 전체의 21%, 주조재에 대한 연구가 15건으로 16%를 차지하고 있다.

이상의 결과들을 종합하면 세계적으로 각종 수송기계의 경량화 요구가 증대함과 더불어 최근 2008년 이후부터 마그네슘 합금의 레이저 용접에 관한 관심이 증가하였고 그중에서도 레이저-GTAW 하이브리드 용접의 장점이 확인되면서 이 용접에 의한 마그네슘합금의 접합시도가 가장 활발히 이루어진 것으로 판단된다.

### 3.2 레이저-GTAW 하이브리드 용접

레이저-GTAW 하이브리드용접은 우수한 품질, 높은 효율, 빠른 용접속도가 장점으로 마그네슘합금의 용접에 가장 많이 시도되고 있는 접합법이다. 이 용접에서 빛의 간섭효과를 제거하고 온도변화를 정확히 파악하기 위하여 자외선에 의한 온도측정방법이 개발되었는데 이것을 그림 4에 제시하였다<sup>10)</sup>.

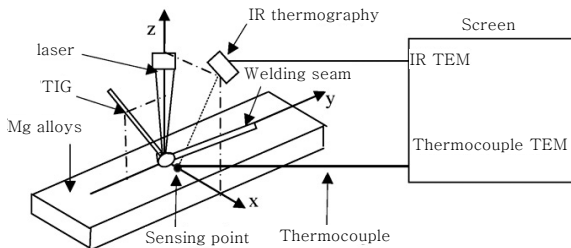


그림 4 하이브리드 용접 시 자외선에 의한 온도측정방법<sup>10)</sup>

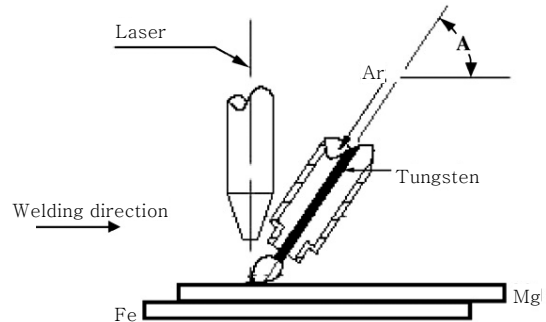


그림 5 레이저-GTAW 하이브리드용접에 의한 마그네슘과 강의 접합방법<sup>11)</sup>

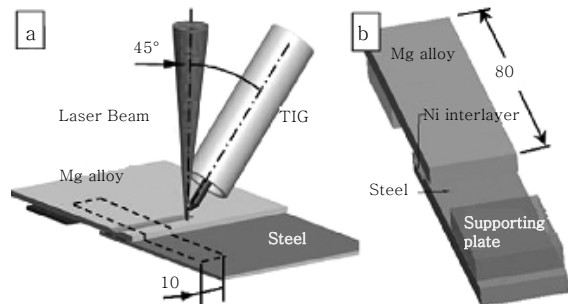


그림 6 레이저-GTAW 하이브리드용접에 의한 마그네슘과 강의 Ni 중간층을 이용한 접합방법<sup>13)</sup>

AZ31B 마그네슘합금과 STS304에 대한 이종합금을 레이저-GTAW 하이브리드 겹치기용접을 그림 5와 같이 실시하였다. Mg-Fe계면에서 Mg은 Fe기지 내로 확산되어 들어가 산화물(MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 형성하는 전이 지역(transition zone)을 조성하여 전단인장강도를 저해하는 경향이 있었다<sup>11)</sup> 그러나 Zhi Zeng 등에 의하면 AZ31B 마그네슘합금과 STS304L강에 대해서 맞대기용접한 결과 양호한 접합부를 얻을 수 있었다<sup>12)</sup>.

하이브리드 레이저-GTAW용접시 중간층으로서 니켈을 이용하여 마그네슘과 연강을 접합하였다<sup>13)</sup>. Ni중간층은 접합 변태지역에서 키 홀의 역할을 하게 되고 Mg<sub>2</sub>Ni 상의 금속간화합물 층을 형성하게 되어 양호한 접합강도를 얻을 수 있었다.(그림 6 참조) 레이저-GTAW 하이브리드 용접에 의해서 마그네슘합금(AZ31B)과 Al 합금(6061)의 접합 시 중간층으로 Ce foil을 삽입하여 접합하는데 성공하였다<sup>14)</sup> 이때 Ce은 계면에 미세한 파형조직을 형성하여 균열이 발생되지 않는데 효과가 있는 것으로 밝혀졌다.(그림 7 참조)

Liming Liu 등<sup>15)</sup>은 AZ31B 마그네슘합금과 Q235 연강에 대하여 레이저-GTAW 하이브리드용접을 실시한 결과, 그림 8에서 보는 바와 같이 중간삽입체로서 Cu의 첨가는 Ni첨가보다 약간의 강도 상승을 가져왔음을 확인하였다.

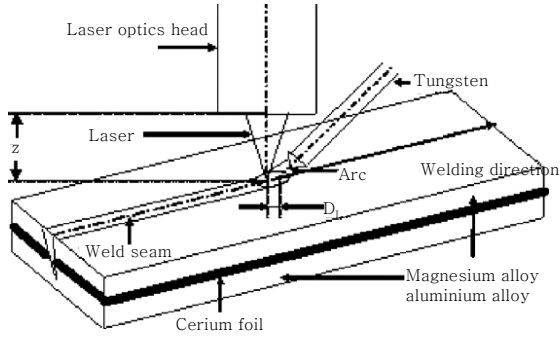


그림 7 Ce foil을 중간층으로 삽입한 마그네슘합금과 Al 합금의 레이저-GTAW 하이브리드용접방법<sup>14)</sup>

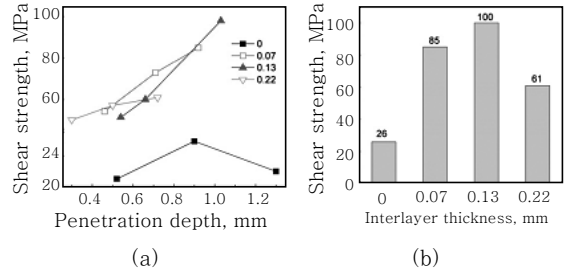


그림 10 마그네슘합금과 Al합금의 레이저-TIG 하이브리드 용접시 용입깊이와 Fe중간층의 두께에 따른 인장 전단강도<sup>16)</sup> (a) Shear strength /Penetration depth (b)Fe Interlayer depth/Shear strength

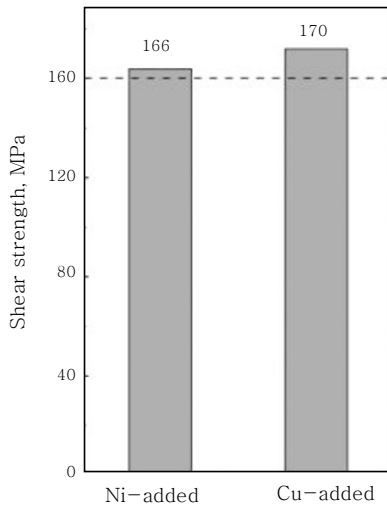


그림 8 마그네슘합금과 강의 레이저-GTAW 하이브리드용접 시 중간삽입체로서 Ni와 Cu의 영향<sup>5)</sup>

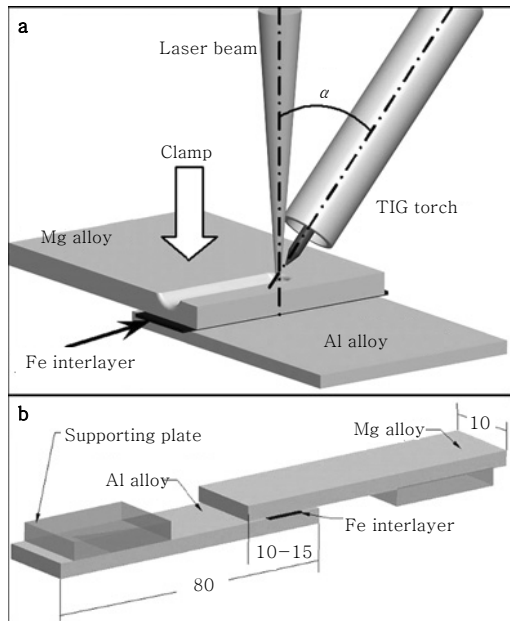
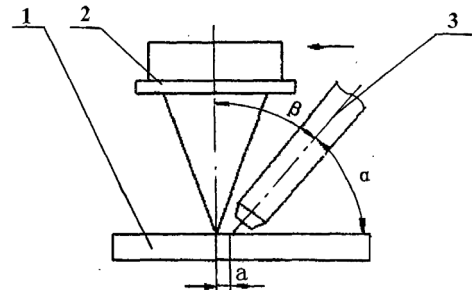


그림 9 마그네슘합금과 Al합금의 레이저-GTAW 하이브리드용접 모습<sup>16)</sup>

Xiao-dong Qi 등<sup>16)</sup>은 AZ31B 마그네슘합금 (2.0mm)와 6061-T6 Al합금(1.5mm)에 대하여 그림 9와 같은 모습으로 레이저-GTAW 하이브리드 용접에 의해 Fe삽입층을 첨가하여 겹치기 접합을 하였다. 접합부의 전단강도는 삽입층의 첨가로 큰 상승폭을 나타내었으며 용입이 깊어질수록 점차 증가하였다. (그림 10 참조) 특히 중간층의 두께가 0.13mm인 경우에 가장 높은 전단강도(100MPa)를 나타내었다. Sierra 등<sup>17)</sup>에 의하면 접합부의 Fe/Al의 계면에는 강도저하를 일으킬 수 있는 취성의  $Fe_2Al_5$  혹은  $FeAl_3$ 의 금속간상이 석출되므로 적당한 삽입층 두께의 선정, 용입깊이 등에 주의를 하여야 한다고 보고하고 있다.

### 3.3 레이저-GMAW 하이브리드 용접

Bing Tan 등<sup>18)</sup>은 중후판(4~25mm)의 마그네슘합금에 대하여 고출력 CO<sub>2</sub>레이저와 GMAW의 하이브리드공정으로 헬륨과 아르곤가스가 혼합된 분위기 (He:Ar=1:2)에서 20~25 l/min.의 가스유량속도로 용접하여 우수한 품질과 높은 효율을 확보하였다. 종래의 3mm 이하의 GTAW용접이나 레이저-GTAW하이브리드용접에서 확보하지 못한 두꺼운 마그네슘합금판에 대하여 충분한 용융깊이, 빠른 용접속도, 작은 변형



(1) base metal (2) laser gun (3) GMAW gun

그림 11 마그네슘합금과 Al합금의 레이저-GMAW 하이브리드용접방법<sup>18)</sup>

등의 접합기술을 확보하였다. 그림 11에서 보는 바와 같이 기관(1)과 GMAW 용접건(3)과의 거리는 1~2mm,  $\alpha$ 는 60~70°,  $\beta$ 는 20~30°의 범위로 조절하였다.

Kai Chen 등<sup>19)</sup>은 고출력 레이저와 GMAW의 복합 공정으로 용접출력과 디포커스량(defocusing amount)을 조절하여 주조 마그네슘합금에 대하여 충분한 용입 깊이와 용접폭을 확보하였다. 노즐에 의해 내부층에 아르곤가스, 외부층에 헬륨가스를 보호가스로 제공되었으며 적절한 용접속도에 의해서 용접와이어의 공급으로 심부 조직의 균일성을 향상시키고 포화된 수소를 희석시켜 기공의 생성을 감소시켰다.

### 3.4 마그네슘합금과 이종재료 접합

3kw 첨두출력(peak power)의 고전력 다이오드 레이저를 이용하여 그림 12에서 보는 바와 같이 AZ91D 마그네슘합금과 비정질 PET(polyethylene terephthalate)의 접합을 시도하였다.

접합 후에 그림 13과 같은 메커니즘으로 버블이 발생하였으나, 접합 전에 마그네슘합금의 표면에 미리 레이저 용융처리를 실시하여 접합강도를 1142.9N에서 1668.8N으로 상승시키는 획기적인 성과를 거두었다<sup>20)</sup>

L.M. Liu 등<sup>21)</sup>은 AZ31Mg합금과 6061Al합금의 원활한 접합을 하기 위하여 그림 14에 의한 방법으로 에폭시접합체를 삽입하여 펄스 Nd-YAG 레이저용접을 실시하였다. 용접후 175°C에서 열처리(curing)한 결과

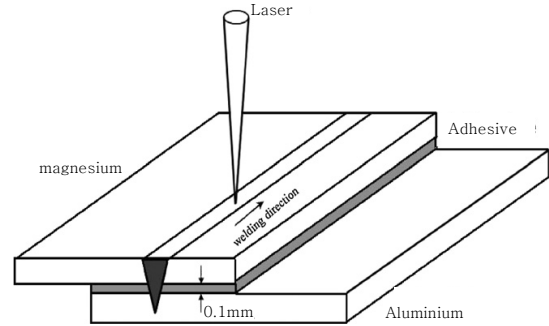


그림 14 접착제(adhesive)를 이용한 Mg-Al 접합부의 레이저용접 모습<sup>21)</sup>

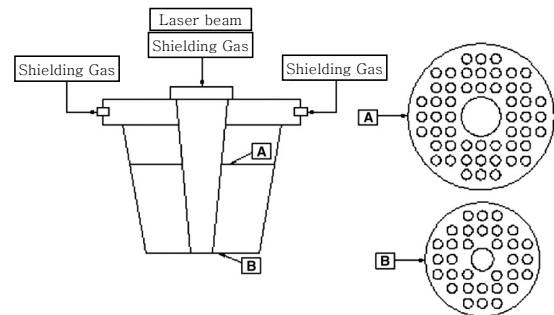


그림 15 마그네슘합금의 레이저 클래딩을 보호하기 위한 보호가스 개선장치<sup>1)</sup>

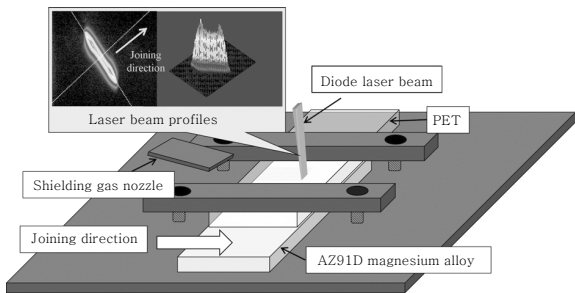


그림 12 다이오드 레이저로 마그네슘합금과 PET(polyethylene terephthalate)의 접합장치<sup>20)</sup>

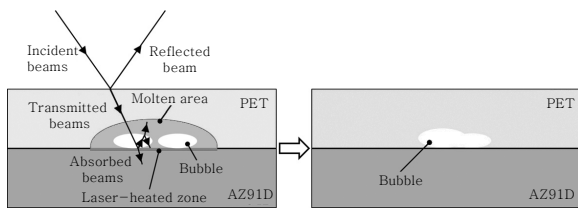


그림 13 다이오드 레이저로 Mg합금과 PET(polyethylene terephthalate)의 접합시 버블(bubbles) 발생 메커니즘<sup>20)</sup>

인장전단강도를 크게 향상시켰다. 접착제의 첨가와 열응력의 감소영향으로 Mg-Al금속간 상과 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>공정상의 계면에서 미세균열의 형성을 억제할 수 있었다.

12vol.%SiC 미립자강화 마그네슘합금 복합재료에 대하여 Nd:YAG레이저용접을 시도하였는데<sup>1)</sup>, 용접시 용융 풀을 보호하기 위하여 그림 15와 같은 새로운 보호가스장치를 사용하였다. 레이저빔 직경이 1.0mm에서 1.5mm로 증가시킴으로써 격심한 버닝(burning)과 증발(evaporation)을 효과적으로 방지할 수 있었으며, 인장강도 88MPa를 갖는 건전한 레이저용접 심(seam)은 레이저 스캔속도를 150mm/min.로 함으로써 얻을 수 있었다.

L.D. Scintilla등<sup>22)</sup>은 Nd:YAG 레이저용접시 AZ31 마그네슘합금판의 표면에서 8mm의 거리에 위치한 동축노즐과 경사노즐에 대한 보호가스의 효과를 검토하였다. 표면부의 용접폭은 동일하나 용입깊이는 약간 증가하였으며, 용융부의 면적은 훨씬 많이 증가하였으므로 동축노즐보다 경사노즐이 마그네슘합금 용접에 효과가 더 뛰어난을 확인하였다.(그림 16 참조)

### 3.5 보호가스

용융 마그네슘합금은 낮은 점성과 표면장력으로 인하

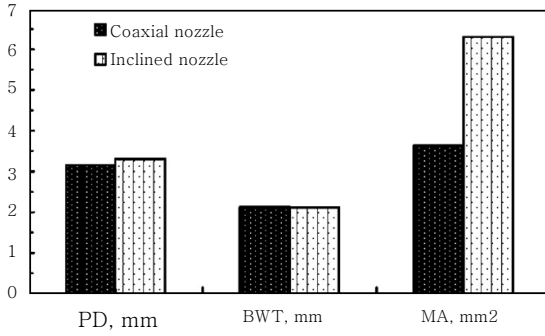


그림 16 용입깊이(PD), 비드폭(BWT), 용융면적(MA)에 대한 동축과 경사 노즐의 비교<sup>22)</sup>

여 새그 (sag) 심지어 드롭-쓰루(drop-through)까지 발생하기 쉬운데 보통 구리 혹은 스테인리스강이 백킹(backing) 재료로 사용되고 있다<sup>23,24)</sup>. 보호가스가 백킹재료로 적용되는 경우에는 새그가 감소하고 더 낮은 용접속도에서도 용접이 가능하며 루트부의 품질향상도 기대할 수 있다<sup>25)</sup>.

A. Weisheit 등<sup>26)</sup>은 AZ91합금에 헬륨, 아르곤, 질소를 사용해 본 결과, 헬륨이 표면조도, 용입깊이, 용입 형태가 가장 양호하였다. 또한 CO<sub>2</sub>레이저용접 시 아르곤보다 헬륨이 더 높은 인장강도를 나타내었다<sup>26,27)</sup>.

### 3.6 용가재(filler metal) 개발

마그네슘의 육방정 격자구조로 인하여 용가와이어는 높은 생산비때문에, 보통 2mm 이상의 직경으로 된 와이어가 사용되고 있지만<sup>26)</sup> 직경이 1.2mm인 용가와이어까지 개발되어 있다<sup>39)</sup>. 이러한 직경이 큰 와이어는 원래 GTAW 혹은 GMAW용접을 이용한 마그네슘 주조합금의 보수용접을 위하여 개발되었다.

용가재의 사용은 더 높은 전력과 더 늦은 용접속도가 요구된다. 용가재는 모재보다 용융점이 낮고 더 넓은 응고범위를 가져야 양호한 용접성을 나타낼 수 있고 아크용접에 대한 균열이 발생되지 않는다. 주조제품의 보수용접은 색상조합을 맞추고, 갈바닉효과를 최소화하고 후속되는 열처리에 따른 동일한 품질특성을 맞추기 위하여 모재와 같은 조성으로 선택을 해야 한다. 예를 들어 아크용접에서 AM과 AZ계 용가합금은 AM과 AZ계 와이어(wire)를 선택하고, AZ61A, AZ92A, AZ101A 및 EZ33A계 용가합금인 경우에는 봉(rod)을 선택한다<sup>28)</sup>. Mg-Zn-Zr주조합금에서 희토류원소 특히 란탄을 함유한 Mg-Zn-Zr-La계 용가재의 사용은 조대한 결정구조의 수지상 조직을 미세하게 하여 용접성을 향상시킨다. 특히 란탄은 저용점 공정성분의 부피비율을 증가

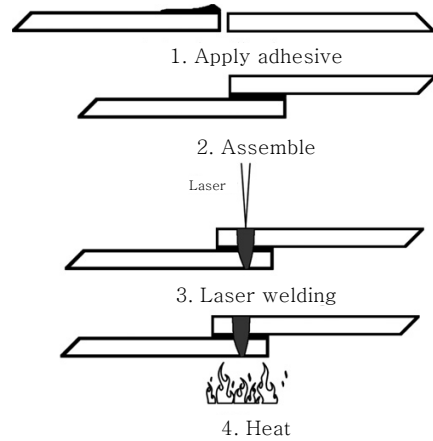


그림 17 에폭시를 중간층으로 삽입한 압출 AZ61 마그네슘합금의 접합방법<sup>30)</sup>

시켜 용접되는 동안에 입계에 발생하는 고온균열을 억제시킨다<sup>29)</sup>.

### 3.7 용접결함 방지기술

L.M. Liu 등<sup>30)</sup>은 압출 AZ61 Mg합금에 대하여 그림 17과 같은 방법으로 에폭시 접착제를 사용한 레이저용접에 의한 접합시험 결과, 단순한 접착제에 의한 접착방법이나 레이저용접방법에서보다 용접결함을 감소시켜 접합부강도를 상승시켜줄 뿐만 아니라 균일한 강도분포, 응력집중의 완화, 내피로성의 향상 및 에너지 흡수를 향상시켜주는 역할을 하고 있음을 확인하였다.

D. Min 등<sup>31)</sup>은 고온 압출된 AZ61 마그네슘합금에 대하여 저출력 Nd:YAG 레이저용접한 결과, 입열량이 증가함에 따라 용입깊이가 증가하였는데, 특히 낮은 용융점을 가진 화합물의 용해를 촉진시켜 그림 18에서 보는 바와 같이 기공과 마이크로기포의 평균직경이 감소하고 응고균열과 액화균열의 형성이 감소하는 경향을 보이고 있음을 확인하였다. 그리고 크레이터(crater)의

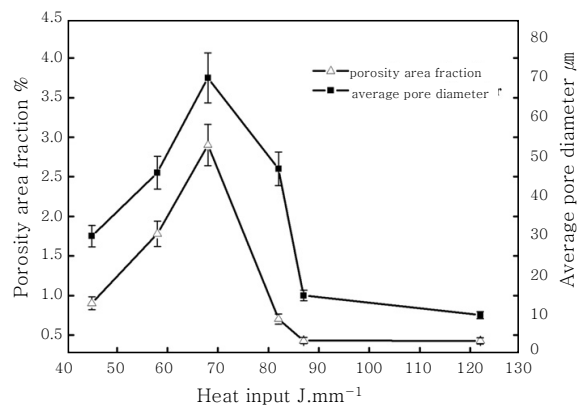


그림 18 입열량에 따른 기공면분율과 평균기공직경<sup>31)</sup>

형성은 입열량의 증가에 따라 직선적으로 증가하여 원소의 회석현상과 용융지표면에서의 증기압의 상승을 촉진시키므로 저출력 Nd:YAG 펄스 레이저 용접을 적용하여 기공, 균열 및 크레이터의 단면적을 감소시킬 수 있었다.

마그네슘은 활성적이어서 고온에서 산소와 질소와 쉽게 반응하여 산화물과 질화물을 형성하게 되는데 Liming Liu 등<sup>32)</sup>은 레이저-TIG 하이브리드용접에서 기포(pore)의 발생 메커니즘을 그림 19에 나타내었다. 그림 19(b)에서 보듯이 용융지(molten pool)는 공기침투지역, 키홀지역, 아르곤보호가스지역으로 구성되어 있는데, 만약 레이저빔이 아르곤에 의해서 보호되지 않으면 공기는 용융지에 쉽게 침투되어 수소가 개입되지 않은 기포를 형성한다. 기포의 발생을 억제하기 위해서 그림 20에서 보는 바와 같이 보호가스는 동축(coaxial)에서는 아크의 안정성을 심하게 해치므로, 동축에서보다 측면에서 20° 혹은 30°의 각도로 복합적으로 취입하면 아크의 안정성이 높아져 기포는 거의 억제되어 비드의 형성을 완전하게 할 수 있다.

레이저용접에서 기공(porosity)의 발생은 용접공정인자<sup>33,34)</sup>에 크게 영향을 받는데, 다음과 같은 방법으로 감소시킬 수 있다.

- 냉각속도가 증가할수록 용융지 내에서 기공의 발생에 대한 핵생성과 성장에 대한 시간이 충분치 못하여 기공의 형성을 감소시킬 수 있다.
- 용접출력을 낮추거나 레이저빔 직경을 작게 하면 원

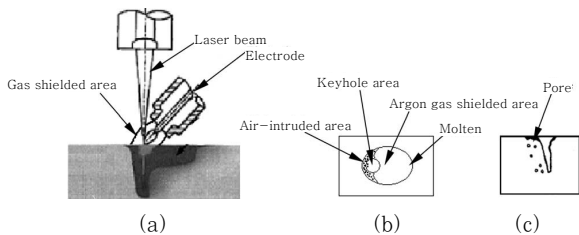
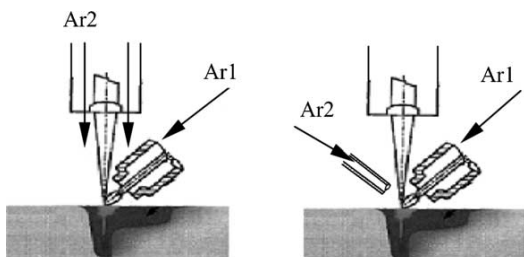


그림 19 기포(pore) 발생 메커니즘<sup>32)</sup>

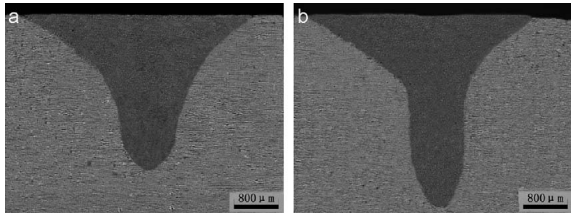


(a) Laser coaxial shielding (b) Laser lateral shielding  
그림 20 레이저-TIG 하이브리드용접시 보호가스 취입방법에 따른 차이<sup>32)</sup>

- 래의 기포의 부피율이 작아 기공의 형성이 감소된다.
- 용접입열량을 낮추거나 용입의 깊이를 감소하면 응고속도가 증가하여 기공의 발생이 줄어든다.
- 기공의 형성을 최소화하기 위해서는 기공의 밀도를 낮추고 용접 전후의 수소원을 제거하고 급속한 응고에 의해서 용융부의 수소과포화지역을 생성시켜야 한다.
- 용접하기 전에 모재와 용가재로부터 산화물과 오염된 표면층은 제거되어야 한다.
- 고급 보호가스(예, 이슬점(dew point)이 낮은 가스)를 선택하여야 한다.
- 용접균열의 주요원인은 주로 고온균열이라고 볼 수 있는데, 열영향부 액화균열, 응고균열 등으로 분류할 수 있다.
- AZ80, ZK60과 같은 열처리용 마그네슘합금은 높은 냉각속도에서 압축이 이루어지기 때문에 편석이 감소되어 액화균열이 감소되지만, 다이캐스팅용 Al함유 마그네슘합금은 낮은 용융점의 금속간 화합물을 입계에 형성시켜 용접열영향부에 액화균열을 조장한다<sup>35)</sup>.
- 용접열사이클이 일어나는 동안에 용융경계부에 인접한 입계에 액막이 형성되는데, 냉각시 이 액막의 존재로 열유기 응력이 축적되어 용접열영향부에 액화균열이 발생된다. 만약에 저용점의 공정(eutectic) 물질이 다시 채워지면 균열은 사라진다<sup>36)</sup>. 마그네슘합금의 레이저용접에서 합금조성, 용접공정 인자, 응고속도 및 접합부 형태는 액화균열의 발생에 모두 영향을 미칠 수 있으므로 향후 이에 대한 연구가 필요하다.
- Borland 이론에 의하면 낮은 분배계수와 높은 용해도를 갖고 있는 합금원소들은 큰 응고범위를 갖고 있기 때문에 응고균열을 촉진한다고 보고하고 있으며, 일례로 Mg-Zn-Zr, Mg-Al-Zn 등이 있다<sup>37)</sup>.
- 마그네슘접합부의 산화물 막의 형성을 방지하기 위해서는 산화개재물 함유량이 낮은 모재, 효과적인 보호가스, 용융지 내에서의 용융금속의 유동속도 제어 등을 조절해야 한다. 특히 CW CO<sub>2</sub> 레이저용접에 비해서, 높은 피크의 펄스출력을 가진 Nd:YAG용접에서는 표면의 산화물 층을 분산시키기 때문에 산화개재물 층의 형성을 억제한다고 보고되고 있다<sup>38)</sup>.

### 3.8 고출력(high power) 및 용접속도 향상

마그네슘의 고유한 특성으로 인하여 용접결함이나 기계적 성질의 저하를 가져오는 경우가 많으나 고출력용접을 적용함으로써 이러한 단점을 해소시킬 수 있다<sup>39)</sup>. 고전력 레이저용접기술은 자동차 휠의 허브(hub), 엔진의 브래킷(bracket) 및 도어부품 등에 적용이 기대된다.



(a) Not applied (b) High pulse current applied

그림 21 고에너지 밀도 펄스의 적용유무에 따른 용입깊이의 영향<sup>40)</sup>

Mg합금 AZ31B에 대하여 레이저 출력 300W, 아크 전류 100A, 용접속도 1000mm/min.로 펄스레이저 용접을 한 후 용접깊이의 차이를 그림 21에 나타내었다<sup>40)</sup>. 백그라운드 전류(130amp.)에서보다 높은 펄스전류(300amp.)를 적용한 결과, 용입깊이는 30% 이상이나 더 깊었다. 레이저-GTAW 하이브리드용접공정에서 용입은 레이저키홀의 형성과정을 가속화시킴으로써 향상시킬 수 있었다.

#### 4. 국내의 마그네슘 합금 레이저 기술 개발 현황

##### 4.1 국내학회 및 전문잡지에의 기술동향 분석 결과

마그네슘합금의 레이저용접에 관한 NDSL 검색결과, 국내 학회지 및 전문잡지에 2005년부터 게재되기 시작하였는데 2005년 1건, 2006년, 2007년, 2008년에는 각각 3건, 2009년 2건, 2010년 1건이 추진되었다.

그림 22는 대한용접접합학회를 비롯한 국내학회지 및 전문잡지에서의 게재 수 현황으로서 선진 외국에 비하여 부진한 실적에 머물러 있음을 알 수 있다.

발표기관에 따른 게재수를 그림 23에 제시하였는데, 주로 한국해양대, RIST, (주)성우하이텍에서 주도하고 있는 경향을 보이고 있다.

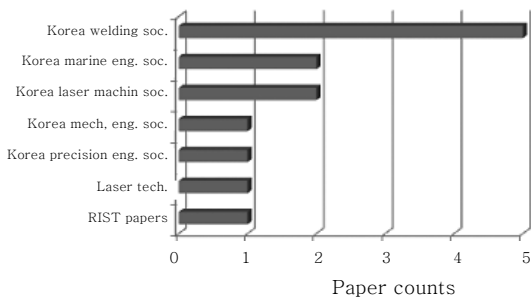


그림 22 국내학회지 및 전문잡지의 게재수

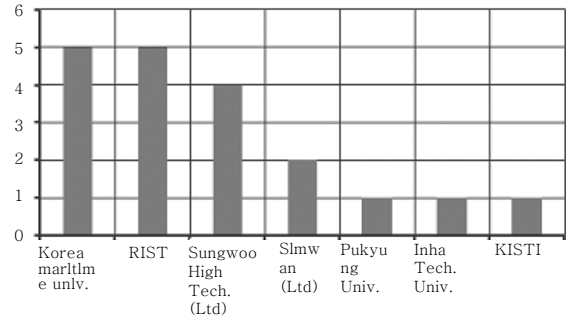


그림 23 발표기관에 따른 논문 게재수

#### 4.2 하이브리드 용접기술

포항산업과학연구원의 장웅성 등<sup>41)</sup>은 AA6061-T6 Al합금과 AZ31 마그네슘합금을 하이브리드 레이저-마찰교반용접기술을 확립하였는데, 제3의 극박판 Ni호일(foil)를 삽입하는 접합방법을 적용하여 Mg모재에 비하여 약 66%에 달하는 횡방향 인장강도를 얻었다. 여기에서 Ni은 접합계면을 따라 형성된 취약한 금속간화합물인 Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> 대신에 NiAl과 Ni<sub>2</sub>Mg를 형성시켜 접합부의 취성을 억제시키는 작용을 하였다.

#### 5 향후기술의 전망 및 정책제언

##### 5.1 하이브리드 용접기술

레이저용접을 이용한 하이브리드용접은 양호한 품질, 작업효율, 빠른 용접속도에 대한 장점으로 향후 바람직한 용접공정으로 기대되고 있다. 향후 하이브리드 공정(GTAW, GMAW, 플라즈마 아크, 마찰교반용접 등) 혹은 다른 종류끼리의 복합레이저빔을 이용한 다양한 기술개발이 추진될 것으로 전망된다.

##### 5.2 마그네슘합금과 이종재료 접합기술

여러 종류의 마그네슘합금, 이종금속(예, Mg-Al, Mg-steel, 복합재료) 사이의 이종접합이 이루어질 수 있는데, 중간 삽입재료로서 니켈, 구리 혹은 세슘을 극박(foil) 형태로 삽입하거나, 에폭시 접착제, PET(polyethylene terephthalate) 등과 같은 플라스틱이나 세라믹을 삽입하여 레이저용접에 의한 접합을 시도하여 최적의 중간 삽입체를 찾는 향후의 개발연구가 기대된다.

##### 5.3 용접결함(porosity, crack 등) 방지기술

향후 용접결함을 방지하기 위하여 ① 응고냉각속도의 증가, ② 용접출력을 낮추거나 레이저빔 직경의 감소,



③ 용접 입열량을 낮추거나 용입의 깊이를 감소, ④ 기공의 밀도를 낮추고 용접전후의 수소원을 제거, ⑤ 급속한 응고에 의한 용융부의 수소과포화지역을 생성, ⑥ 산화물과 오염된 표면층은 제거, ⑦ 고급 보호가스의 선택 등에 대한 활발한 연구가 이루어질 수 있을 것이다.

#### 5.4 보호가스 조절기술

마그네슘합금의 레이저용접시 강도, 표면조도, 용입 깊이, 건전한 용접빔 및 심형태를 양호하게 하기 위하여 보호가스로서 헬륨, 아르곤, 질소에 대한 효율적이고 경제적인 배합연구의 추진이 예상된다. 예를 들면 CO<sub>2</sub> 레이저용접시 아르곤보다 헬륨이 더 높은 인장강도를 나타내고 있으나 경제성을 감안한 값비싼 헬륨가스의 절감연구가 예상된다.

용융 마그네슘합금은 낮은 점성과 표면장력으로 인하여 용접결함(sag, drop-through 등)이 발생하기 쉬운데, 이를 방지하고 용융부의 면적을 증가시키고 품질을 향상시키기 위하여 보호가스 분출을 위한 최적의 노즐 경사각도의 연구가 이루어질 수 있을 것이다.

#### 5.5 고출력 및 용접속도 향상기술

향후 고출력 파이버 혹은 디스크 레이저를 이용한 마그네슘합금 접합부의 레이저의 용접성 보증기술을 확보하여야 할 것이다. 차세대 레이저기술로서 레이저원의 빔품질을 향상시켜, 더 낮은 입열량과 더 높은 조사(irradiance) 값으로 작은 지점에도 초점을 맞추어 용접할 수 있는 능력을 배양하여야 할 것이다.

마그네슘의 고유한 특성으로 인하여 용접결함이나 기계적 성질의 저하를 가져오는 경우가 많으나 고출력용접을 적용함으로써 이러한 단점을 해소시킬 수 있다. 고전력 레이저용접기술은 자동차 휠의 허브(hub), 엔진의 브레킷(bracket) 및 도어부품 등에 적용이 기대된다.

#### 5.6 허용오차 감소기술

마그네슘합금은 알루미늄이나 철강에 비해서 탄성계수가 낮아 탄성변형이 심하게 일어날 수 있으며 열적 팽창계수가 높아서 용접부에 변형(distortion) 현상을 일으키게 된다. 이 변형은 적당한 고정작업에 의해서 완화할 수 있지만 근본적으로 변형현상을 가능한 한 감소시킬 수 있는 연구가 필요하다. 낮은 입열량의 레이저용접으로 잔류응력과 변형을 감소시킬 수 있는 기술이 정착되어야 한다.

#### 5.7 원격제어 및 3D 용접기술

향후 레이저 용접법에서는 인프로세스(In-process) 모니터링이나 적응제어기술의 고도화와 접합부의 고속 검사시스템의 개발이 추진될 전망이다. 고품질의 레이저 용접부를 얻기 위해서는 신뢰성있는 모니터링시스템을 이용한 용접프로세스의 제어연구가 필요하다.

두께, 형태와 같은 여러 가지 기하학적인 형태를 제어할 수 있는 레이저용접기술이 미래에 개발될 수 있을 것이다. 특히 광섬유 전송을 이용한 Nd:YAG 레이저에 대한 쉬운 취급과 조절은 복잡한 형태에 대한 용접 기회를 제공하여 3D 용접을 행할 수 있는 기술이 정착되어야 할 것이다.

#### 5.8 정책제언

1) 총에너지 수요의 98%를 수입에 의존하고 있는 현시점에 자동차보급의 확대에 의해 고급 에너지인 석유와 천연가스의 소비가 증가하고 있어서 수송기기의 에너지 절감을 위한 경량화 기술개발 필요성이 더욱 증가하고 있다. 특히 에너지를 많이 소비하는 자동차를 비롯한 선박, 비행기 등 수송기기의 에너지 절감에 필요한 경량화 기술개발, 즉 초경량 마그네슘소재에 집중적인 연구개발투자가 필요하다.

2) 마그네슘 판재는 철강 판재류에 비해 가격이 약 8배 수준이나 무게가 철강재의 25%, 알루미늄의 70%로 가장 가벼운 금속소재이며, 플라스틱에 비해 재활용과 전자파 차폐 등에서 높은 경제우위를 보이고 있으며 국내 시장규모가 1,000억원 정도 예상되고 있어 마그네슘 소재의 활용연구사업이 향후 더욱 활기를 띠 것으로 예상하고 있다. 따라서 향후 산학연의 체계적인 연구와 국가적인 지원체제가 필요하다.

3) 포스코는 2018년까지 단계적으로 연산 10만톤까지 마그네슘제련사로 거듭 성장이 예상되는 단계에 있으며 2008년 7월 연산 3000톤 규모의 마그네슘 판재 공장을 준공한 바 있다. 국내의 마그네슘산업은 중국, 인도, 브라질 등의 신흥국의 도전에 직면에 있고 미국, 일본, 독일 등 선진국과 경쟁해야 하는 어려운 여건에 놓여 있으나 경쟁력 있는 기술체제를 형성할 수 있는 정책의 마련이 필요하다.

4) 현재 마그네슘합금에 대한 레이저용접공정은 아직 초창기에 처해 있는 실정에 있으므로 우리나라의 경량 수송기기 접합기술에 대한 연구개발활동을 촉진하고 이를 위한 연구개발 사업에 국가의 적극적인 지원을 강화할 필요가 있다.

5) 에너지 다소비산업인 공업의 특성상 환경문제를

고려하는 측면에서도 마그네슘접합기술에 대한 정부차원의 정책적 배려가 필요하다. 마그네슘산업이 국가경제에 미치는 파급효과를 고려할 때 초경량 마그네슘접합 분야에 대한 산업정책은 IT산업, 반도체산업, 자동차산업 등과 동일한 수준으로 다루어져야 할 것이다.

6) 국내의 마그네슘소재의 기술발전을 위한 연구개발 전략으로서 「산학연 협력연구체제의 구축」, 「마그네슘산업분야 국책연구사업의 추진」, 「마그네슘접합연구구심체조직의 설치」 등은 중소기업이나 대학이 자율적으로 실행하기는 곤란하다. 여기에서 국가 연구개발사업의 예산과 정책을 담당하는 「교육과학기술부」, 「지식경제부」 등 관련부서의 정책적지원이 필요하다.

## 6. 결 언

1) 마그네슘합금은 실용금속 중에서 가장 우수한 비강도 경량특성과 진동흡수성, 전자파 차폐성 등의 특성으로 인해 각종 수송기계와 휴대용 전자기기분야에 그 수요가 급증하고 있으며, 이의 실구조물 조립기술로서 레이저 용접이 가장 우수한 용접방법으로 평가되어 있다.

2) 마그네슘합금의 레이저 용접에 관한 연구는 1990년대 후반부터 시작되었으며, 최근 2,3년 전부터 비교적 활발한 연구활동이 이루어지고 있으나 본격적으로 실용화 단계까지는 와 있지 않다.

3) 용접방법은 레이저-GTAW하이브리드용접, 대상재료는 AZ31전신재에 관한 연구가 가장 많이 이루어졌다.

4) 마그네슘합금과 철강 또는 알루미늄합금, 비정질 합성수지와 이종재료 접합연구가 이루어지고 있으며, 이때 사용한 용접방법은 레이저-GTAW 하이브리드 용접방법이 가장 많고, 접합재료 사이에 중간층을 삽입하여 접합강도를 높이는 방법이 가장 효율적인 방법으로 인식되고 있다.

5) 마그네슘합금의 레이저 용접을 실용화하기 위해서는 접합부의 강도향상과 용접결함을 최소화하기 위한 보호가스, 출력조정, 용접속도 등 여러 가지 용접조건 확립에 관한 많은 데이터 축적이 급후 요구되고 있다.

6) 외국에 비해 국내에서의 마그네슘합금 레이저 용접연구는 매우 미진한 현상에 있으며, 향후 체계화된 안정된 레이저 용접기술의 확립을 위해 산 학 관 연계의 협력 연구 개발 시스템 구축이 절실히 요구되는 시점에 와 있다.

## 후 기

본 기술해설은 한국과학기술정보연구원이 교육과학기술

부의 과학기술진흥기금으로 수행하는 ReSEAT 프로그램의 성과물입니다.

## 참 고 문 헌

1. A. H. Wang et al. : Nd:YAG laser butt welding of a 12 vol.% SiC particulate-reinforced magnesium alloy composite *Materials Letters* **61**(2007), 4023-4026
2. 이복영 등 : 마그네슘합금의 최신 동향 및 레이저 용접 특성, *KWJS*, **25-1** (2007), 485-491 (in Korean)
3. 地西 澈, “マグネシウム合金の航空機への應用”, *金屬*, **80-8** (2010), 664~667, 2010 (in Japanese)
4. 마그네슘 신기술 교육 워크샵, 한국마그네슘기술연구조합, 2005. 5 (in Korean)
5. G.Padmanahan 등, Influences of Welding Processes on Microstructure, Hardness, & Tensile Properties of AZ31B Magnesium Alloy, *J. of Mater. Eng. and Performance*, **19-2** (2010), 155-165
6. N.Afrin 등, Microstructure and Tensile Properties of Friction Stir Welded AZ31B Magnesium Alloy, *Mater.Sci. Eng.*, **A,472** (2008), 179-186
7. P.Cavaliere 등, Superplastic Behaviour of Friction Stir Processed AZ91 Magnesium Alloy Produced by High Pressure Die Cast, *J. Mater. Process. Technol.*, **184** (2007), 77-83
8. X.H.Wang 등, Microstructure and Properties of Friction Stir Butt-Welded AZ31 Magnesium Alloy, *Mater.Sci. Eng.A*, **431** (2006), 114-117
9. X. Cao et al. : A review of laser welding techniques for magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology* **171** (2006), 188-204
10. R.S. Huang et al. : Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process, *Materials Science and Engineering A* **447** (2007), 239-243
11. L. M. Liu., X. Zhao : Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser-GTA hybrid welding, *Materials Characterization*, **59** (2008), 1279-1284
12. Zhi Zeng et al. : Numerical and experiment analysis of residual stress on magnesium alloy and steel butt joint by hybrid laser-TIG welding, *Computational Materials Science* **50** (2011), 1763-1769
13. Xiaodong Qi, Gang Song : Interfacial structure of the joints between magnesium alloy and mild steel with nickel as inter-layer by hybrid laser-TIG welding, *Materials and Design* **31** (2010), 605~609
14. L. Liu et al. Microstructure of laser-TIG hybrid welds of dissimilar Mg alloy and Al alloy with Ce as interlayer, *Scripta Materialia* **55**(2006), 383-386
15. Liming Liu, Xiaodong Qi : Strengthening effect of nickel and copper interlayers on hybrid laser-TIG welded joints between magnesium alloy and mild steel, *Materials and Design* **31** (2010), 3960~3963
16. Xiao-dong Qi, Li-ming Liu : Fusion welding of Fe-added lap joints between AZ31B magnesium alloy and 6061 aluminum alloy by hybrid laser-tungsten inert gas welding technique (2011)

17. Sierra G, Peyre et al. : Steel to aluminium key-hole laser welding. *Mater Sci Eng A-Struct.* **447** (2007), 197-208
18. Bing Tan et al. : Middle-thickness magnesium alloy CO<sub>2</sub> laser-MIG composite welding process, NO 52 Inst. of China North Ind.(China), (2008) published as CN101434011
19. Kai Chen et al. : Method for reducing laser welding pores of cast magnesium alloy, Univ. Beijing Technology(China), (2009) published as CN101502918
20. M. Wahba et al. : Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate, *Journal of Materials Processing Technology* **211** (2011), 1166-1174
21. L.M. Liu., H.Y.Wang : The effect of the adhesive on the microcracks in the laser welded bonding Mg to Al joint *Materials Science and Engineering A* **507** (2009), 22-28
22. L.D. Scintilla et al. : Nd:YAG laser weldability and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy butt joints, *Journal of Materials Processing Technology* **210** (2010), 2206-2214
23. K.G. Watkins : H.I. Kaplan (Ed.), *Laser Welding of Magnesium Alloys*, Magnesium Technology 2003, TMS Annual Meeting and Exhibition, San Diego, CA, March 2003, 153-156
24. J. Wegrzyn, M. Mazur, A. Szymanski : Development of a filler for welding magnesium alloy GA8, *Weld. Int.* **2** (1987), 146-150
25. C. Lehner, G. Reinhart, L. Schaller : Welding of die cast magnesium alloys for production, *J. Laser Appl.* **11-5** (1999), 206-210
26. A. Weisheit, R. Galun, B.L. Mordike : CO<sub>2</sub> laser beam welding of magnesium-based alloys, *Weld. Res. Suppl.* **74-4** (1998), 149-154
27. H. Hiraga et al. : Effects of the shielding gas and laser wavelength in laser welding magnesium alloy sheets, *Quart. J. Japan. Weld. Soc.* **19-4** (2001), 591-596
28. W.R. Oates : *Welding Handbook*, eighth ed., American Welding Society, Miami, Florida (1996) 121-162
29. V.I. Lukin, I.S. Dobrynina : Weldability of cast magnesium alloys of the Mg-Zn-Zr system, *Svarochnoe Proizvodstvo* **45-4** (1998), 6-8
30. L.M. Liu, D.X. Ren : Effect of adhesive on molten pool structure and penetration in laser weld bonding of magnesium alloy, *Optics and Lasers in Engineering* **48** (2010), 882-887
31. D. Min et al. : Effects of heat input on the low power Nd:YAG pulse laser conduction weldability of magnesium alloy AZ61, *Optics and Lasers in Engineering* **49** (2011), 89-96
32. Liming Liu et al. : Pore formation during hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B--mechanism and remedy, *Materials Science and Engineering A* **390** (2005), 76-80
33. H. Zhao, T. DebRoy : Pore formation during laser beam welding of diecast magnesium alloy AM60B - mechanism and remedy, *Weld. J.* **80-8** (2001), 204S-210S
34. M. Pastor, H. Zhao, T. DebRoy, Continuous wave-Nd:yttrium- aluminium-garnet laser welding of AM60B magnesium alloys, *J. Laser Appl.* **12(3)** (2000) 91-100
35. M. Marya, G.R. Edwards : The laser welding of magnesium alloy AZ91, *Weld. World* **44-2** (2000), 31-37
36. U. Draugelates, A. Schram, C. Kettler : Welding of magnesium alloys, *Magnesium Ind.* **1(3)** (2000) 41-45
37. M. Marya, G. Edwards, S. Marya, D.L. Olson : Fundamentals in the fusion welding of magnesium and its alloys, in: *Proceedings of the Seventh JWS International Symposium*, Kobe, 20-22 November (2001) 597-602
38. Z. Sun, D. Pan, J. Wei : Comparative evaluation of tungsten inert gas and laser welding of AZ31 magnesium alloy, *Sci. Technol. Weld. Join.* **7-6** (2002), 343-351
39. J. Dai et al. : Microstructure and Mechanical Properties of High Power CO<sub>2</sub> Laser Welded Joint of Mg-Rare Earth alloy NZ30K, *Physics Procedia* **5** (2010), 511-516
40. L. Liu, X. Hao, Improvement of laser keyhole formation with the assistance of arc plasma in the hybrid welding process of magnesium alloy, *Optics and Lasers in Engineering* **47** (2009), 1177-1182
41. W. S. Chang et al. : Microstructure and Mechanical Properties of Hybrid Laser-Friction Stir Welding between AA6061-T6 Al Alloy and AZ31 Mg Alloy, *J. Mater. Sci. Technol.*, **27(3)**, (2011) 199-204
42. Seokjun Ha : Improvement of ductility in magnesium alloy sheet using laser scanning treatment, *Materials Letters* **64** (2010), 425-427



- 김영식
- 1944년생
- 한국과학기술정보연구원
- 용접부 파괴와 강도, 용접공정, 재료공학
- e-mail : yskim@hhu.ac.kr



- 유호천
- 1951년생
- 한국과학기술정보연구원
- 용접야금, 용접공정, 재료공학
- e-mail : yooho278@resear.re.kr