자동차 산업에서 마그네슘 합금의 용접기술

윤 병 현 · 장 웅 성

Welding Technology of Magnesium Alloy for Automobile Industry

Byoung-Hyun Yoon, Woong-Seong Chang

1. 서　　론

최근 선진국을 중심으로 세계 각국은 각종 환경 규제를 강화하여 환경오염을 억제하려는 노력을 기울이고 있다. 특히 세계적으로 5억대가 넘는 자동차에서 배출되는 배기가스는 환경오염과 지구 온난화의 주요 원인으로 지적되고 있다. 우리나라의 자동차 수 역시 1400만대를 넘어서고 있고 1998년에는 OECD 국가 중 한국이 CO_2 배출량 증가율 1위를 차지하는 불명예를 가지고 있다. 그리고 석유 자원 역시 그 한정된 매장량으로 인하여 석유 자원의 효율적인 사용의 중요성이 부각되고 있는 현실에서 결국 세계적으로 자동차 및 항공기 등의 수송기기의 연비향상에 대한 욕구가 증대되어 가고 있다.

자동차의 경량화를 위해 알루미늄, 마그네슘, 강화 플라스틱등 많은 재료가 사용되고 있고 그 중에서도 최근에 마그네슘 합금의 사용이 급증하고 있는 상태이다[1].

그림 1 은 전 세계의 마그네슘의 생산량을 나타낸 그림으로 1996년에 28만톤 이던 생산량이 중국의 가세로 2001년에는 약 44만톤 정도 생산되면서 가격이 하락하였다. 1996년에 2,600$/톤 하던 마그네슘이 2001년에는 1,300$/톤 로 약 50% 정도로 가격이 하락하면서 마그네슘합금의 수요가 급증하는 추세이다(그림 2)[2].

마그네슘 합금은 밀도가 알루미늄 합금의 2/3, 철강의 1/5 수준으로 현재까지 개발된 합금 중 가장 낮은 밀도를 가지고 있으며 여타 경량 재료와 비교하여 손색이 없는 비강도를 갖고 있다. 이외에 진동, 충격, 전자파동에 대한 흡진성이 탁월하고 전기, 열전도도, 가공성 및 고온에서의 피로, 충격 특성이 우수하여 자동차, 항공기, 방위 산업 및 일반 기계 등에 경량화 소재로서 요구되는 여러 우수한 특성을 지니고 있다. 이러한 마그네슘 합금은 여타 경량재료에 밀려 그 사용량이 미미했지만 세계적으로 에너지 절약 및 환경 공해 규제가 대폭 강화됨에 따라 자동차, 항공기 수송 수단의 소재 경량화가 매우 긴박한 과제로 떠오르면서 마그네슘 합금의 사용이 증가하고 있는 추세다.

특히 자동차 산업의 중심지인 미국을 선두로 하여 각국은 대기 정화법을 개정하여 자동차 배기가스 규제기준을 더욱 강화하고 있다. 예를 들어 미국의 경우 CAFE(Corporate Average Fuel Economy) 기준을 강화하는 브라이언 법안을 제정하여, 1996년까지는

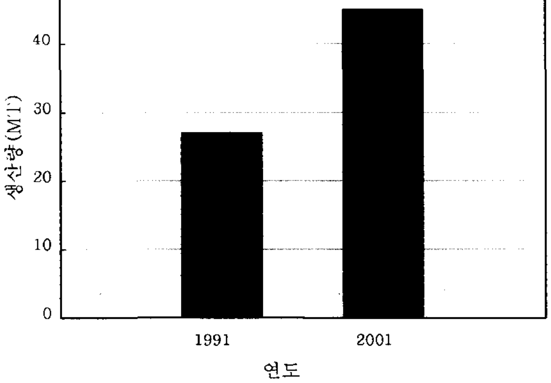

그림 1 마그네슘(Mg) 생산 현황

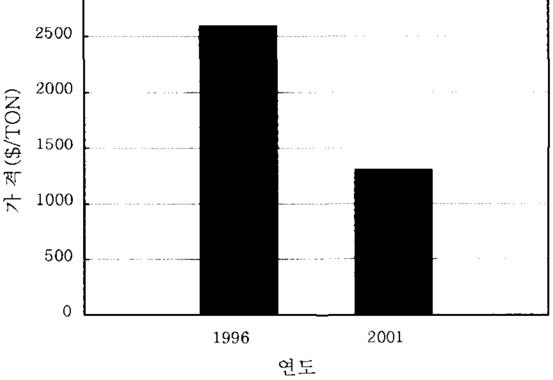

그림 2 마그네슘(Mg)의 가격 현황.

20%(평균 34.4 MPG, 14.6km/ℓ), 2001년까지는 40%(평균 40.2 MPG, 17km/ℓ)의 연비향상을 달성해야 한다고 규정하고 있다. 결국 세계 유수의 자동차 생산업체에서는 이러한 강화된 기준에 대한 대처 방안으로, 보다 성능이 우수한 자동차를 개발하기 위하여 자동차의 연비향상에 대한 막대한 투자와 연구개발을 수행하고 있다.

자동차의 연비는 주로 엔진 출력 향상, 유선형 차체를 이용한 공기저항 감소, 차체의 소형화 및 자동차의 경량화 등을 이용하여 향상시킬 수 있다. 이러한 방안 중에서 엔진효율의 향상이나 공기저항의 감소는 설계 측면에서 고려해야 하는 것으로, 현재 기술개발이 한계에 도달하여 실제 급격한 개선이 어려운 실정이다. 또한 차체의 소형화는 연비향상에 가장 확실한 방법이 되지만, 보다 안전하고 안락하며 큰 차를 원하는 소비자들의 욕구를 만족시키지 못하고 있다. 결국 연비 향상을 위한 방안으로서 자동차 부품의 경량화가 가장 확실하고 유력한 방안으로 제안되고 있으며, 이미 이에 대한 많은 연구가 진행 중이다.

일반적으로 자동차의 경량화 방법에는 첫째는 저밀도의 경량재료를 사용하는 것이고 둘째는 고강도 또는 높은 탄성계수를 갖는 재료를 사용함으로써 사용재료의 부피를 줄여 경량화를 도모하는 방법이 있다. 경량화 재료로서는 높은 비강도를 가지는 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 및 강화 플라스틱이 많이 사용되고 있는 상황이다[3-6].

이렇게 전 세계적으로 마그네슘의 사용이 증가하면서 마그네슘의 용접성에 대해서도 그 관심이 증가하고 있다. 마그네슘 합금의 용접은 다양한 용접방법의 적용이 가능한 것으로 알려져 있다. 대부분의 마그네슘 합금은 낮은 입열량과 빠른 속도로 쉽게 용접 되어질 수 있다. 그러나 마그네슘 합금의 낮은 용융점, 낮은 기화점, 산소와의 빠른 친화력, 금속간 화합물의 생성 등과 같이 용접에 제약을 주는 인자들이 많기 때문에 쉽게 용접을 하기 어렵다. 이러한 인자들을 정확하게 이해하고 고려한 다음 용접을 실시해야 하며 마그네슘 합금에 적용되는 각각의 용접법에 따라 물리적, 화학적 특성과 기계적 특성이 달라질 수가 있다. 따라서 본 논문에서는 자동차 산업에 사용되고 있는 마그네슘 합금의 현황과 앞으로의 전망 및 마그네슘 합금에 적용되고 있는 용접법에 따른 그 특성을 알아보고자 한다.

2. 마그네슘 합금의 특징과 종류

2.1 마그네슘 합금의 종류

마그네슘 합금은 Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr, Mg-Th의 3종류로 크게 구분할 수 있고 제조 방법에 따라 주물용 합금, 다이캐스팅용 합금, 전신재 등으로 나누어진다.

마그네슘 합금 중에 가장 널리 사용되는 계열은 Mg-Al-Zn 계열이다. 이 계열은 강도를 증가시키기 위해서 적정량의 Zn이 첨가된다. Zn 첨가하면 응고시 고온 균열 감수성이 증가하기 때문에 그 첨가량은 1%이하로 제한되고 있으며, 이 계열은 용접성과 주조성이 우수하여 가장 널리 사용되고 있다. 다이캐스팅용 Mg-Al 계열은 부수적인 첨가 원소에 따라 크게 AZ계열과 AM계열, AS계열로 나누어진다. AZ 계열은 비강도, 주조성 및 내식성이 우수하며, AM계열은 AZ계열보다 연성과 충격강도가 높고, AS계열은 내크리프 특성이 개선된 합금이다. AZ계열은 Al 양이 많이 첨가될수록 Al과 Mg의 반응으로 수많은 석출물이 생성되어진다. 이러한 석출물에 의해서 고강도의 마그네슘 합금을 얻을 수 있는 것이다. 그러나 Al양이 너무 많아지면 그만큼 연성이 저하되어 취성이 커지므로 Al양은 10%를 넘지 않아야 한다.

현재까지 세계 곳곳에서 마그네슘 합금 연구가 많이 진행되어 지고 있다. 알루미늄의 경우는 오랜 연구 과정에서 많은 합금이 생성되어졌고 상용화가 되고 있지만 마그네슘 합금은 그렇지 못한 것이 현 실정이다. 향후 마그네슘합금이 이러한 알루미늄과 플라스틱 등의 경합재료에 대하여 더욱 안정적인 가격 경쟁력을 확보하기 위해서는 새로운 제조 공정 개발에 의한 제조 원가의 저하뿐만 아니라 원재료비를 낮추기 위한 노력도 병행되어야 할 것이다. 따라서 마그네슘 합금의 가공기술 중의 하나인 용접기술의 개발은 중요한 요소이다.

2.2 마그네슘 합금의 특징

마그네슘 합금의 밀도는 표 1에서 보는 바와 같이 1.738g/cm^3 정도로 알루미늄 합금의 2/3, 철강의 1/5수준으로 현재까지 개발 된 합금 중 가장 낮은 초경량 구조용 금속재료로, 비강도가 우수하고, 진동, 충

표 1 대표적인 마그네슘합금의 특성

성질	값	성질	값
원소기호	MG	융점(℃)	659
원자번호	12	비점(℃)	1103
원자량	24.32	인장강도(MPa)	270
결정구조	HCP	용융잠열(cal/g)	89
밀도 (g/cm3, 25℃)	1.738	열전도도 (cgs, 0-100℃)	0.40

격 및 전자파 등에 대한 감쇄능과 전기 및 열전도도가 탁월하다. 또한, 가공성도 우수하여 복잡한 형상도 쉽게 가공이 가능하다.

대표적인 자동차용 마그네슘 합금으로는 AM60B, AZ91D 및 ZE41A 등이 있다. AM60B합금은 연성 및 인성이 우수하고, AZ91D합금은 기계적 성질, 주조성 그리고 내식성이 우수하며 ZE41A 합금은 고온 특성이 우수하여 175℃까지 사용될 수 있는 합금이다. 이러한 자동차용 마그네슘 합금의 기계적 특성을 표 2에서 비교하였다.

2.3 자동차용 마그네슘 합금의 적용

마그네슘 합금의 주요 소비 산업은 자동차 산업으로 전체 마그네슘 소비량의 70% 이상을 차지하고 있다. 그림 3 은 미국 자동차 3대 메이커의 마그네슘 소비량을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 자동차 산업에서 마그네슘의 소비량은 급격한 증가 추세에 있다.

회사별로 큰 차이를 나타내는 것은 제작하는 부품 수의 차이에 의한 것이 아니라 부품의 크기에 따른 것이다. 이러한 마그네슘은 그 특성상 자동차 산업에서 하중을 많이 받지 않는 부품에 많이 사용되어지고 있다. 예를 들어 GM의 캐딜락에는 실린더 헤드 커버 및 오일 필터 케이스에 마그네슘 합금이 사용되고 있으며, 혼다의 NSX에서는 실린더 헤드 커버, 인테이크 매니폴드 커버 및 챔버 등에 사용되고 있다. 또한 벤츠의 500SL에는 시트 프레임에 마그네슘 합금을 적용하고 있다. 표 3은 자동차 부품의 특성에 따른 마그네슘 합금의 적용 예를 나타낸 것이다.

그림 4는 실제 자동차에 사용되어지고 있는 마그네슘 부품을 나타낸 그림이다. a는 압출에 의해 만들어진 Mg합금의 window frame 이고 b는 VW/Audi에서 AZ91을 사용한 B80 자동차 기어 변속기 틀이다. c는 Mg합금으로 만들어진 Steering Wheel이고 d는 고강도 고인성을 나타내는 Hybrid demonstrator hood이다. 외판은 1.3mm두께를 가지는 Mg 합금으로 만들어졌고 내판은 1.1mm두께를 가지는 Al 합금으로 만들어졌다. e는 Mg합금으로 만든 Air housing 과 Air cap 이다.

국내 자동차 회사에서도 자동차 부품에의 마그네슘 합금 적용에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

현재 연구가 진행되고 있는 마그네슘합금을 이용한 자동차 부품은 실린더 헤드 커버, 타이밍 벨트 커버, 스티어링 휠 코어, 트랜스미션 케이스 등이 있는데 실린더 헤드 커버나 스티어링 휠 코어는 이미 실차 적용에 상당히 가까운 단계에 도달해 있다. 앞으로도 국내 자

표 2 대표적인 마그네슘합금의 특징

	AZ60B	AZ91D	ZE41A	AS41
항복강도 (MPa)	94	160	138	80
항복강도 (MPa)	197	230	193	160
연신율 (%)	4.5	3	8	-
경도(HB)	50	63	62	60

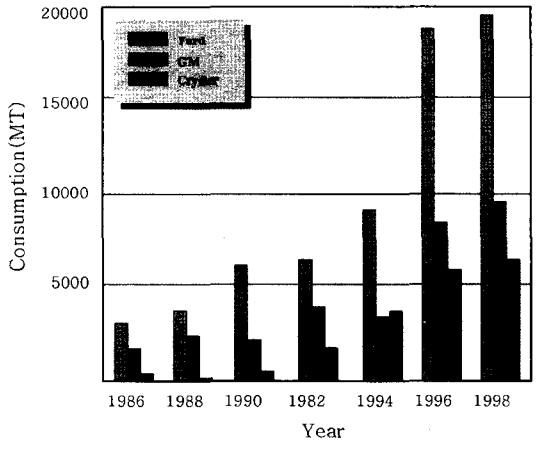

그림 3 미국 3대 자동차 메이커의 마그네슘 소비량

표 3 자동차에 적용되는 마그네슘합금 부품

특 징	적용 부품
경량성, 가공성, 치수 안정성, 저가, 다이캐스팅 용이성	Cylinder head cover, Clutch, Transmission housing
경량성, 가공성, 저가, 다이캐스팅 용이성	Carburetor
경량성, 방진성	Pan, Pan housing
경량성	Grill, Panel, Clutch pedal bracket
경량성, 인성	Seat frame

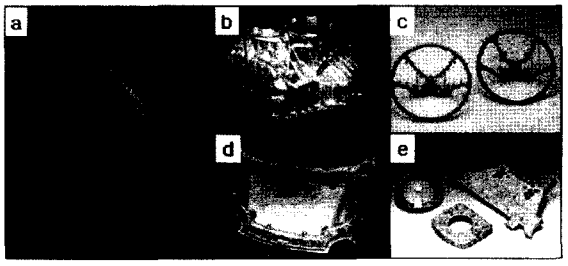

그림 4 실제 사용되는 마그네슘 합금 부품

동차 업계에서 자동차 부품에 마그네슘 합금의 적용범위는 점차 늘어날 것으로 예상되고 있다.

2.4 대표적인 경량 자동차의 사례

미국에서는 1998년부터 신형차의 2%를 전혀 배기가스를 내지 않는 무공해차로 해야 한다는 규제를 정해놓고 자원 절약과 온난화 대책을 목표로 한 초저연비 차세대 승용차가 개발되고 있다.

유럽과 일본에서도 3L로 100km를 주행한다는 직접분사식 터보 디젤 엔진을 탑재한 3리터카의 개발이 각 자동차 회사에서 진행되어 최근 그 결과물이 미래형 리터카로 속속 출시되고 있다. 여기서는 전 세계적으로 주목 받고 있는 경량 자동차의 사례를 들어 보겠다.

그림 5는 현재 전 세계에서 실용화되고 있는 경량 자동차의 예를 들어놓은 것이다. a는 1999년 세계 최초로 독일 폭스바겐에서 출시한 3리터카인 루포 TDI이다. 독일에서 발매를 시작한 폭스바겐 루포는 가격이 2만6천9백 마르크 (약 1천7백만원)에 배기량이 1200cc 밖에 되지 않지만 세계 자동차 전문가들의 관심을 한몸에 받고 있다. 그 이유는 바로 기름 3L로 100km를 주행할 수 있는 초저 연비차이기 때문이다. 이 차는 1L당 주행거리가 33.3 km나 돼 우리나라에서 판매되고 있는 보통 경차의 연비(수동변속기 기준)가 18~21km/L인 것과 비교하면 거의 2배에 육박하는 초절약형 차인 셈이다. b는 루포와 같은 플랫폼으로 만들어진 세아트 아로사이다. 세아트 아로사는 1.4L TDI엔진을 장착하여 4.3리터로 100km를 달릴 수 있다. c는 3.4리터로 100km를 주행할 수 있는 MCC 스마트로서 세계에서 가장 작은 디젤 CDI 엔진이 탑재된다. d는 혼다에서 발매한 하이브리드 카인 VV이다. 혼다가 발표한 VV는 2인승의 스포츠카 타입이며, 고성능의 VTEC 엔진에 소형 직류 모터를 조합한 하이브리드 파워 유니트 '혼다 IMA 시스템'을 채용했다. 3L로 100km를 갈수 있는 소위 3리터카로 시판되고 있다. e는 디젤 2.5 TDI엔진이 장착된 아우디 A4이다. 연비와 파워, 배기가스등에 모두를 만족시킬 수 있는 모델이다. f는 BMW 530D이고 리터당 16.9km를 달리는데, 이는 국내의 웬만한 준중형차보다 좋은 연비를 나타내고 있다.

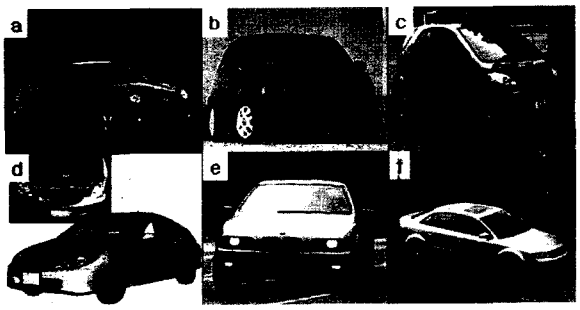

그림 5 실용화되고 있는 자동차의 예

표 4는 전 세계적으로 우수한 연비를 나타내는 자동차들의 연비 비교한 것이다.

3. 마그네슘 합금의 용접성

마그네슘 합금이 산업현장에서 매우 중요한 소재로 떠오르면서 그에 따른 용접의 중요성도 부각되고 있다. 마그네슘 합금의 용접은 크게 3가지 방법으로 나누어진다. 첫째는 일반 아크 용접(GMAW, GTAW)이고 두 번째는 고밀도 고에너지 용접(Laser, Electron Beam), 세 번째는 비 용융 용접(FSW)으로 나눌 수 있다. 이 장에서는 마그네슘 합금에 적용되어지는 용접방법과 그 장단점을 알아보았다.

1) GMAW에 의한 마그네슘 합금 용접성

GMAW(Gas Metal Arc Welding)는 용접할 부분에 송급되는 와이어와 그 주위에 쉴드가스(활성, 불활성, 혼합)를 흘려주면서 아크로 용접하는 용접법이다. 마그네슘 합금 용접은 1924년부터 행하여져 왔고 1960년대에는 마그네슘 합금의 GMA용접이 두께 4.5mm 까지 용접을 하게 되었다. GMAW의 가장 큰 특징은 DCEP 전원을 사용해야 한다는 것이다. 이는 표면에 마그네슘 산화물층이 있기 때문에 DCEN으로는 용접을 하기 힘들고 DCEP로 용접을 하면 청정작용으로 마그네슘 산화물층을 자연스럽게 제거 후 용접할

표 4 자동차 종류에 따른 연비 순위

순위	메이커	모델	100km주행시 연료소모량
1	VW	Lupo 1.2 TDI	2.7/2.99/3.6 (37/33.4/27.7km/l)
2	AUDI	A2 1.2 TDI	2.99(33.44km/l)
3	MCC	smart 800CDI	3.4(29.4km/l)
4	SEAT	arosa 1.4TDI	4.3(23.25km/l)
5	Au야	A3 1.9 TDI	4.3(23.25km/l)
6	VW	LUPO 1.7 TDI	4.4(22.72km/l)
7	OPEL	corsa 1.7TD	4.7(21.27km/l)
8	MB	A160 CDI	4.8(20.83km/l)
9	MCC	smart 600	4.9(20.40km/l)
10	MB	A170 CDI	4.9(20.40km/l)

수 있게 된다. 그리고 또 다른 장점은 GMAW 용접은 이미 많은 다른 재료에서 널리 사용되고 있기 때문에 그 조건만 바꾸어서 마그네슘 합금에 바로 적용이 가능하다는 것이다. 반면에 마그네슘의 낮은 기화점(1100℃)으로 인하여 용융된 마그네슘 합금이 아크열에 의하여 증발해버리면서 많은 스패터를 형성할 수 있다는 단점이 있다. 또한 다른 공정보다 상대적으로 낮은 용접속도를 가지기 때문에 생산성에 문제가 있으며 아크 용융 용접이므로 용접 후 심한 뒤틀림을 동반한다. 이러한 뒤틀림을 방지하기 위해 용접 전에 단단하게 클램핑 작업을 해야만 한다. 이와 같은 단점으로 인해 마그네슘합금 용접에 GMAW 공정은 실제로 많이 이루어지는 편은 되지 못한다.

마그네슘 합금의 MIG 용접은 굉장히 많은 스패터를 동반한다. 이러한 스패터를 줄이기 위해 그림 6에서는 두 가지 방법을 사용하였다[4]. 첫 번째 방법은 매우 빠른 아크 단락 사이클(short-circuiting-arc)을 사용하는 것이고 두 번째 방법은 그래프에서 보듯이 큰 사이클 다음에 작은 사이클을 동반하게 한 것이다. 이런 방법으로 용융된 용융 풀은 어떠한 스패터도 없이 매우 좋은 용융 풀을 형성하게 된다. 그림 7은 AZ61을 GMA용접한 용접부 조직 사진이다[5].

그리고 용접부의 강도는 어떤 용접재료를 사용하느냐에 따라 달라지는데 적절한 용접재료의 사용 시 약 모재 강도의 80%까지 나올 수 있다. 또한 파단 강도 역시 모재의 75%까지 올릴 수 있다. 이러한 마그네슘 합금에 GMAW의 적용을 향상시키기 위해서는 용접부 특성 파악과 표면층 잔류 응력을 제거하여 용접부 파단 강도를 높이는데 많은 노력이 필요하다.

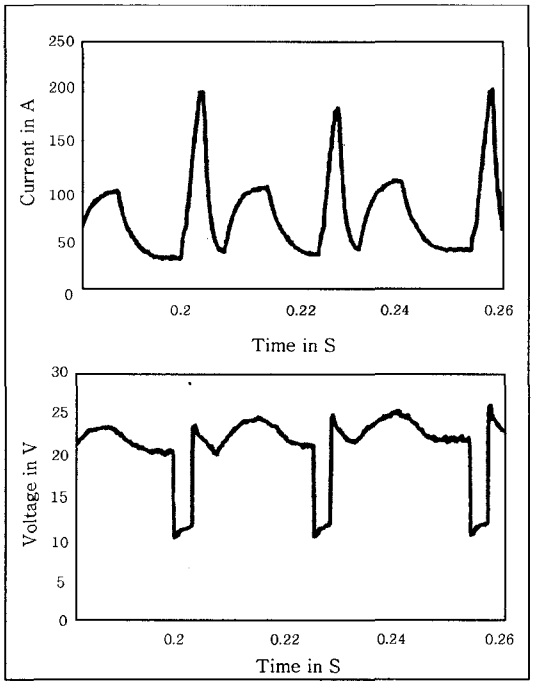

그림 6 용접 전력 특성

2) GTAW에 의한 마그네슘 합금의 용접성

GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)는 불활성 가스(아르곤, 헬륨) 분위기에서 비소모성 텅스텐 전극과 모재 사이에 아크를 발생시켜 용접하는 방법이다. GTAW는 현장에서 GMAW보다 더 많이 사용되고 있다. GTAW도 GMAW와 마찬가지로 DCEN으로는 용접이 되지 않는다. DCEP나 AC전원을 사용하여야만 클리닝 작용으로 마그네슘 산화 피막을 제거하고 용접이 가능하다. AC전원은 박판과 후판 모두 양호한 용접성을 나타내고 우수한 클리닉 효과를 나타내며 DCEP는 용입이 얕기 때문에 박판 용접에 적당하다.

마그네슘 합금의 GTAW적용시 장점은 클리닝 작용으로 인한 표면 산화물의 제거와 입열량 조절이 GMAW 보다 간편하고 용이하다는 것이다. 그리고 낮은 입열량으로 높은 질의 용접부를 형성할 수 있다. 또한 GTAW의 소모성 전극은 경제적인 측면에서 매우 이익이 된다. 하지만 용접속도가 낮고 전극의 소모가 심하여 용접 개시는 물론 아크의 형상변화와 용접품질에 나쁜 영향을 미친다. 그림 8은 AZ31B-H24 합금의 전형적인 광학 현미경 사진이다. 온도가 높은 아크열로 인해 용접부 조직이 매우 조대해졌다는 것을 알 수 있다.

용접부 조직이 HAZ에 비해 매우 미세한 것은 용접부의 급속한 냉각속도로 인해 나타난 결과이고 HAZ는 가장 취약한 부분이고 용접부와 비교하여 볼 때 조대한 입계구조를 가지게 된다. HAZ의 입자를 미세화시킴으로서 열영향부의 취약함을 보완해야 한다.

열영향부의 취약함은 $Al_{12}Mg_{17}$ (β-상) 금속간 화합

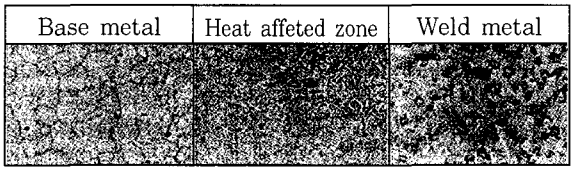

그림 7 AZ61합금의 GMA 용접부 조직 사진

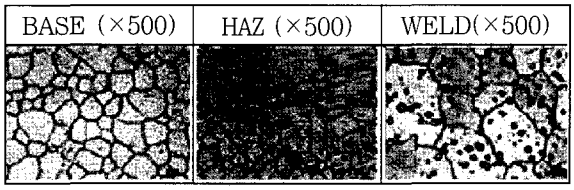

그림 8 AZ31B 합금의 GTA 용접부 조직 사진 (weld speed : 150mm/h, pulse frequency : 100Hz)

물의 생성으로 인해 발생한다. 열영향부 (HAZ)에서 $Al_{12}Mg_{17}$ 상은 용융풀에서 루트면으로의 용적 이행 시 단락이행과 관련하여 생성되고 이 상은 용접부에 기공을 생성시키고 HAZ의 기계적 특성인 연성뿐만 아니라 강도까지 감소시키는 취약한 금속간 화합물이다. 이런 금속간 화합물은 그림 9에서처럼 검은색으로 표시가 되고 흰색으로 표시되는 α-Mg 사이에 위치하고 있다[6]. 이것은 Mg 합금의 낮은 열용량과 우수한 열전도율, 그리고 $Al_{12}Mg_{17}$의 낮은 용융 온도로 인하여 지속적으로 결정입계에서 생기게 되는 것이다.

이렇게 GTA 용접한 마그네슘 합금은 표 5에 나타낸 바와 같이 항복 강도, 인장강도(UTS), 연신율이 모재 90%이상의 기계적 성질이 나올 수 있다[7]. 단, Al이 1.5%이상 첨가된 마그네슘 합금에서는 응력 부식 균열(SCC)이 생길 우려가 있기 때문에 응력 풀림 작업이 필수적으로 동반되어져야 한다.

한편, 마그네슘합금의 용접시 응고하면서 균열이 발생할 수 있는데 이러한 현상을 응고균열재현 실험을 통하여 평가한 결과를 나타낸 것이 그림 10이다. 그림에서 보듯이 용접기의 펄스 주파수에 따라 균열길이가 달라지는 것을 알 수 있는데 펄스 주파수가 30Hz 정도되면 최고균열길이와 총균열길이가 감소하여 전체 응고균열감수성이 줄어드는 것을 알 수 있다.

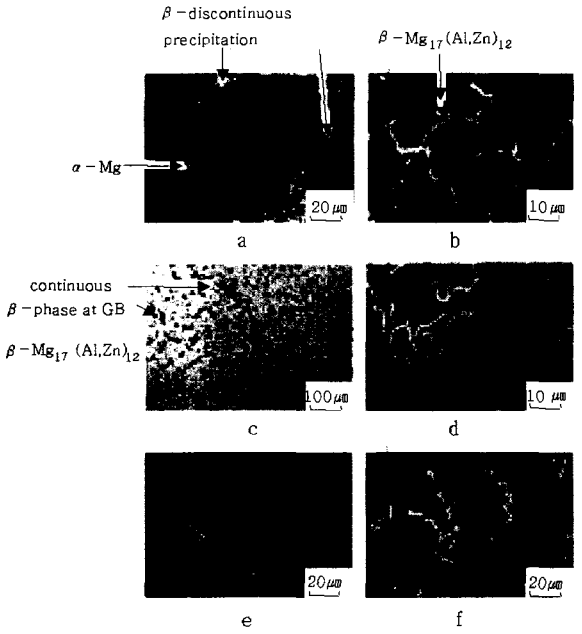

그림 9 GTA 용접부의 SEM 사진: (a) 모재, (b) 용착금속, (c,d) 부분용융영역, (e) 열영향부, (f) 재응고영역

표 5 AZ91D 합금 GTA 용접부의 기계적 성질

Sample		Stress		Elongation
		Yield (MPa)	UTS (MPa)	Uniform (%)
GTAW	T-specimen	105±5	131±10	0.7±0.1
	L-specimen	125±5	235±15	7.2±0.5

3) 마그네슘 합금의 레이저 용접성

레이저 용접은 매우 작은 점으로 집속된 레이저 광에서 변환되는 높은 밀도의 에너지를 이용한 용접이다. 대표적인 레이저로는 CO_2 레이저와 Nd:YAG 레이저가 있다. 이 레이저의 가장 큰 차이점은 파장이 틀리다는 것이다. Nd:YAG레이저는 파장(λ)이 1.06㎛이고 CO_2레이저의 파장(λ)은 10.6㎛로 10배정도 CO_2 레이저가 길다. 이로 인하여 Nd:YAG 레이저 용접이 CO_2 레이저 용접보다 더 양질의 용접부를 나타낸다. 이는 마그네슘 합금으로의 레이저 빔의 흡수가 좁은 파장영역을 가지는 Nd:YAG 레이저가 더 좋기 때문이다.

마그네슘 합금의 레이저 용접 적용은 다른 공정보다 널리 사용되고 있다. GTAW 공정과 비교하여 볼 때 훨씬 우수한 특성을 나타내는데, 모재 강도 대비 90% 이상의 이음부 효율을 가질 수 있다. 그리고 깊고 좁은 용입을 가지므로 열영향부 폭을 다른 아크 용접보다 많이 줄일 수 있다. 또한 주조 및 단조 마그네슘 합금에 적용이 가능하고 용접부 기공 역시 최소화시킬 수 있다.

그림 11 (a)는 두께 2.1mm AZ91을 CO_2 2KW 출력과 3m/min의 속도로 용접한 것이다[8]. 사진에서와 같이 매우 매끄러운 용접비드와 언더비드를 얻을 수 있다. 그리고 (b)는 두께 4mm WE43을 CO_2 2KW 출력과 3m/min 속도로 용접한 것이다. 비드는 양호하지만 언더비드는 약간의 결함이 존재함을 알 수 있다. 레이저 용접의 용접부 특성은 레이저의 초점이 가장 중요한 역할을 한다. 그림 12는 Mg합금에 CO_2레이저 용접을 행한 용접부 미세조직을 나타낸 것이다[9]. (a) 그림에서 좁고 깊은 용입이 얻어짐을 알 수 있고, (b)에

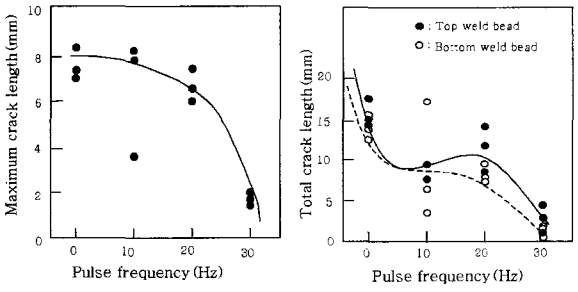

그림 10 AZ31 마그네슘합금의 응고균열감수성에 미치는 frequency의 영향

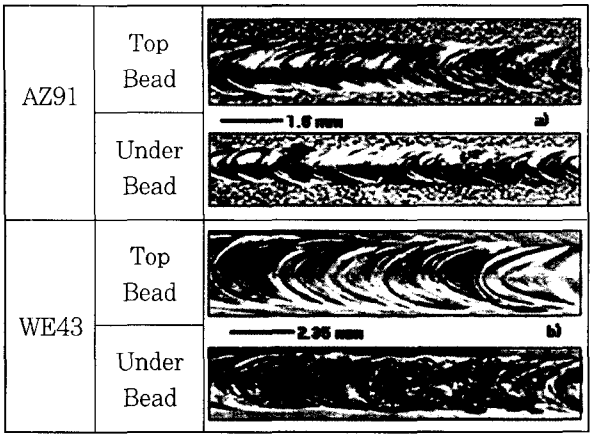

그림 11 마그네슘합금 용접부 비드 형상

그림 12 마그네슘합금 레이저 용접부 조직 사진 (a)용접 비드 형상 (b) 용착금속 (c)열영향부

서 용접부 미세조직이 GMAW 또는 GTAW보다 미세하다는 것을 알 수 있다. 이것은 매우 높은 고밀도의 에너지를 사용하여 매우 짧은 시간 내에 재료를 용융·응고시키기 때문이다.

레이저 용접은 고출력 에너지를 갖는 레이저의 사용으로 매우 빠른 속도의 용접을 할 수 있고 이에 따라 입열량이 작아지게 되고 가열 및 냉각시 그 온도 기울기가 매우 커지게 된다. 이로 인해 금속간 화합물 생성 기구인 확산 공정이 일어나지 못하게 함으로써 열영향부에서의 금속간 화합물 생성을 막을 수 있다.

이렇게 레이저의 고출력 고밀도 고에너지의 특징은 용접부에 취약한 금속간 화합물 생성을 막을 수 있고 뒤틀림 역시 최소화 시킬 수 있다. 결국 레이저 용접은 마그네슘 합금에서 매우 양질의 용접부를 생성할 수 있으며 앞으로 자동차 산업이 성장하면서 마그네슘 합금의 사용이 늘어나고 그에 따라 이 레이저 용접도 많이 적용되어 질 것이라고 생각된다.

4) 마찰교반용접(FSW)에 의한 마그네슘 합금의 용접성

기존의 마찰 용접이 부재를 회전시켜 접합하는데 비해 FSW 공정은 별도의 회전 tool을 부재의 맞대기 면을 따라서 이동함으로써 부재를 소성·유동시켜 고체 상태에서 접합하는 방법이다. 이러한 FSW는 현재 알루미늄 합금 용접에 있어서 최대의 기술적 진보로 인정받고 있다. 알루미늄 접합에서의 경험으로 얻어진 것들을 마그네슘 합금에 적용하고 있다. 마그네슘 합금에서 FSW 접합의 장점은 소모성 또는 삽입금속이 전혀 필요치 않다는 것이고 마그네슘 산화층 역시 툴의 회전에 의해서 자동적으로 제거가 되기 때문에 미리 제거할 필요가 없다. 뿐만 아니라 용융이 되지 않기 때문에 잔류응력이 다른 용융용접보다 극히 적고 뒤틀림 역시 매우 적게 나타난다. 자동화가 가능하고 모든 자세에서 용접이 가능하다. 용접부의 기계적 특성이 다른 용접법과 비교하여 볼 때 매우 우수한 특성을 가진다.

마그네슘 합금의 동종 접합은 재료에 따라서 약간의 차이가 있지만 TWI에서 접합이 가능하다는 것을 증명하였다. 가장 많이 사용되는 다이캐스팅 마그네슘 합금은 Mg-Al합금으로 AZ31과 AZ61, AZ91을 비교하여 보면 Al양이 증가할수록 마그네슘 합금의 FSW 접합은 하기가 힘들어진다. 그림 13은 Z31, AZ61, AZ91D를 FSW 접합을 했을 때 결함이 생기지 않고 양호한 접합이 가능한 영역을 표시한 것이다[10]. 그림에서처럼 AZ31은 넓은 영역에서 양호한 접합부를 얻을 수 있고 Al 함량이 증가할수록 양호한 접합부를 얻을 수 있는 영역이 줄어든다는 것을 알 수 있다. 그림 14는 AZ31B-H24 합금의 FSW 접합 된 시편의 단면을 절단하여 관찬한 조직 사진이다. 마크로 조직사진에서 양파 모양의 명확한 Stir Zone을 확인할 수 있다. 그리고 SZ영역의 미세 조직을 보면 모재와는 완전히 다른

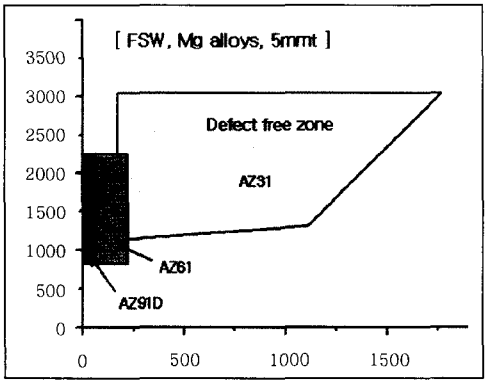

그림 13 마찰교반접합에서의 무균열 영역

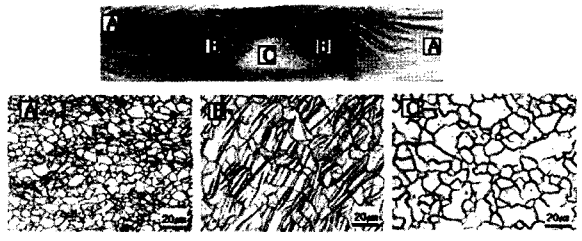

그림 14 마그네슘합금의 마찰교반접합부 조직 사진. (AZ31B-H24, 4mmt, 1000rpm-100mm/min)

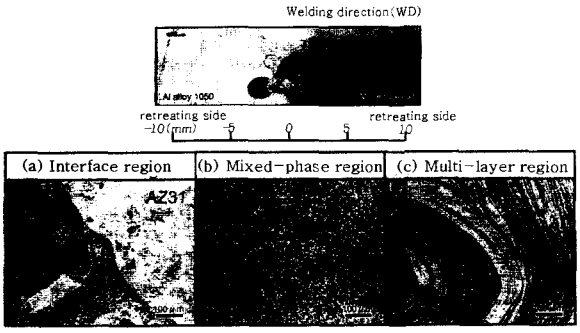

그림 15 알루미늄합금과 마그네슘합금간의 이종접합부 조직사진. (a)계면 영역, (b)혼합영역 (c)다층영역

새로운 결정이 재결정된 것을 알 수 있다. B사진에서 FSW의 물리적인 힘에 의해 연신된 조직을 명확히 확인할 수 있다.

또한 마그네슘 합금과 알루미늄 합금간의 이종 FSW 접합은 비용융 공정이기 때문에 취약한 금속간 화합물인 $Al_{12}Mg_{17}$의 생성을 억제하고 기존에 생성된 $Al_{12}Mg_{17}$ 화합물까지 분해시킴으로 이종 접합에서도 우수한 특성을 보이고 있다.

그림 15는 알루미늄 합금과 마그네슘 합금간의 이종접합 시편의 단면이다[11]. (b) 영역에서 Al과 Mg가 완전히 교반되어 있는 것을 알 수 있다. FSW를 이용한 이종접합은 용융용접을 사용했을 때보다 우수한 기계적 특성 및 외관확보가 가능하다. 그러나 용융 용접보다는 그 양이 적더라도 $Al_{12}Mg_{17}$ 금속간 화합물이 생기므로 주의가 필요하다.

그림 16은 Mg-Al계열 합금의 FSW 이음부 경도 분포를 나타낸 것이다[12]. 그림에서 보면 AZ31과 AZ61은 경도값이 모재와 용접부 모두 비슷하게 나타나지만 AZ91D합금은 SZ영역에서 경도값이 증가하는데 이는 알루미늄 양의 증가로 인해 모재에 대량 생성된 $Al_{12}Mg_{17}$ (β-상) 금속간 화합물이 FSW의 교반으로 인해 분해되면서 알루미늄이 입자 크기를 미세화게 만들어서 나타난 결과이다.

이와 같이 FSW 접합부는 GTA 용접보다 더 좋은 기계적 특성을 가진다. 종래의 용접법으로는 불가능한 저융점 접합뿐만 아니라 이종접합까지 가능하다. FSW는 현재 TWI가 특허로써 원천기술에 대한 권리를 보호받고 있어서 활발한 기술 적용이 제한받고 있지만, 선진 각국에서 다양한 응용 기술에 대한 특허를 출원하여 적용 범위를 확대해 나가고 있는 실정이므로 빠른 시일내에 자동차 분야뿐만 아니라 우주 항공분야 등 경량화 금속과 이종 금속을 사용하는 산업체에서 많은 적용이 있을 것으로 생각된다.

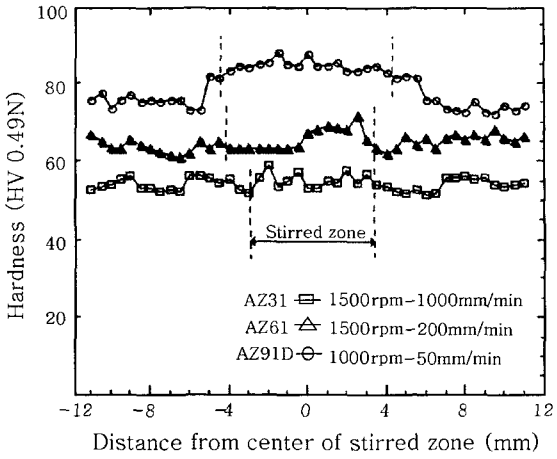

그림 16 마찰교반접합부의 경도 분포도

4. 맺 음 말

종래의 마그네슘 합금의 용접은 보수 용접처럼 그 공정자체가 매우 적은 부분을 차지하고 있었다. 그래서 주로 용융용접 (GMAW, GTAW)이 사용되어 왔지만 자유로운 설계와 더욱 복잡한 시스템이 적용되면서 더욱 구조적인 용접이 필요하게 되었다. 이러한 새로운 용접의 요구에 의해서 적용되어지는 것이 마찰교반용접, 레이저, 전자빔 용접 및 하이브리드 용접 등이다.

마그네슘 합금이 다른 합금과는 달리 용접성에 관여하는 인자가 많다는 것을 알았고 관여하는 금속간 화합물도 많다는 것을 알았다. 이러한 금속간 화합물의 생성은 일반적으로 기계적 특성을 강화하는 역할을 하지만 $Al_{12}Mg_{17}$ 같은 금속간 화합물은 용접성에 악영향을 미친다는 것을 확인하였다. 비록 기계적 특성과 내부식성을 강화하기 위해서지만 그것들은 또한 용접성에도 많은 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

종래의 용접법과 최근에 개발된 신 용접법을 사용하여 마그네슘 합금을 용접시 용접성에 대한 명백한 해석과 올바른 대처가 필요할 것이다.

현재 마그네슘 합금은 여러 분야의 자동차 부품 재료로 사용되고 있으며, 앞으로도 그 사용범위는 계속 확대될 것으로 전망된다. 그러나 국내에서는 마그네슘 합금을 이용한 자동차 부품의 생산과 마그네슘 합금에 적용되는 용접법 개발은 전무한 실정으로, 향후 지속적인 연구개발이 필요할 것이다. 즉, 합금 자체의 내식성 향상, 제품 표면 처리 기술 개발, 재활용 기술 개발, 우수한 기계적 특성을 가지는 용접부, 외관이 아름다운 용접 기술 개발 등과 같은 새로운 공정기술 개발 등의 문제점을 해결해야 할 필요가 있으며, 결국 이러한 분야의 연구 노력은 기술 개발 후발국으로서의 약점을 극복

하고 선진국과 어깨를 나란히 하면서, 오히려 보다 우수한 기술을 확보할 수 있는 가능성으로 나타나길 기대된다. 아울러 이러한 마그네슘 합금의 개발과 마그네슘 합금의 용접법 개발은, 최근 자동차 제조 기술상의 핫 이슈로 부각되고 있는 경량화에 있어서 가장 효과적이고 확실한 방안을 제시해 줄 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. ASM Specialty Handbook : Michael M. Avedesian, Magnesium and Magnesium Alloy, 12~25
2. Brian Coope, Magnesium-The dilemma in world supply, Materials World, **10-12** (2002), 14-15
3. Toshihiro Chikada : Light Alloy Parts for Automobiles, 경금속, **40-12** (1990), 945-950
4. Alternate Reduce Weight in Automotives, Advanced Materials and Process, **6** (1993)
5. Scot A. Arnold : Techno-Economic Issues in the Selective of Auto Materials, JOM, June 1993, 12-15
6. 신광선, 정화철, 나영기 : 자동차산업에서 마그네슘합금 적용 현황 및 부품제조기술, 제 12회 철강기술 심포지움, 대한금속/재료 학회, 2003, 63-80
7. JWS : Helmut Wohlfahrt, Joining of lightweight magnesium alloys by MIG-welding, proc. of the 7th Int. Symp., 2001, kobe, 377
8. JWS : Helmut Wohlfahrt, Joining of lightweight magnesium alloys by MIG-welding, proc. of the 7th Int. Symp., 2001, kobe, 377
9. JWS : Helmut Wohlfahrt, Joining of lightweight magnesium alloys by MIG-welding, proc. of the 7th Int. Symp., 2001, kobe, 378
10. Advanced Engineering Materials : Mohamed Dhahri, Laser Welding of AZ91 and WE43 Magnsium Alloys for Automotive and Aerospace Industries, **7** (2001, 3), 505
11. Joining Technology Group, Process Technology Division 2001 : Sun Zheng, A Comparative Evaluation on Micro-strusctures in TIG and Laser Welded AZ31 Magnesium Alloy, 5
12. Advanced Engineering Materials : Mohamed Dhahri, Laser Welding of AZ91 and WE43 Magnsium Alloys for auto-motive and Aerospace Industries, **7** (2001, 3), 507

· 윤병현(尹秉鉉)
· 1964년생
· RIST 용접센터
· 용접야금, 철 및 비철재료 용접
· e-mail : paekam@rist.re.kr

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