스틸과 알루미늄 합금 이종재료 차체개발을 위한 접합기술 현황

서 정* · 이제훈* · 김정오* ·
이문용** · 정병훈** ·
정군석*** · 강정윤****

*한국기계연구원,
**(주)성우하이텍,
***(주)한라이비텍,
****부산대학교

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 경량화, 모듈화, 전자화에 대한 관심이 집중되고 있으며, 특히 차량의 경량화는 연비의 향상 및 주행성능 향상 효과가 우수하여 알루미늄과 같은 경량소재의 사용이 요구되고 있다.[1-4] 차체 전체에 경량소재를 사용하는 것이 가장 좋은 방법이나 기존 스틸 차체의 강도나 강성을 만족시킬 수 없기 때문에 소재의 교체와 더불어 차체 또한 재설계되어야 하므로 기존의 스틸(steel) 모노코크(monocoque) 구조(Fig. 1)에서 알루미늄 도입이 가능한 스페이스 프레임(space frame) 구조(Fig. 2)가 개발되고 있다.

스페이스 프레임 구성을 위해서는 압출재나 액압성형재 등의 관재 결합이 필요하기 때문에 기존의 저항점용접 같은 접합방법은 적용되기 어렵다. 또한, 멤버(member)와 멤버가 연결되는 곳에는 더 큰 강성과 강도가 요구되기 때문에 기존의 철강재나 높은 강

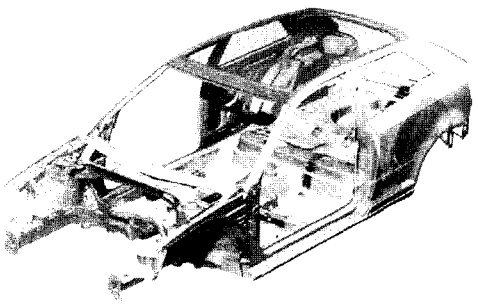


Fig. 1 Monocoque body structure

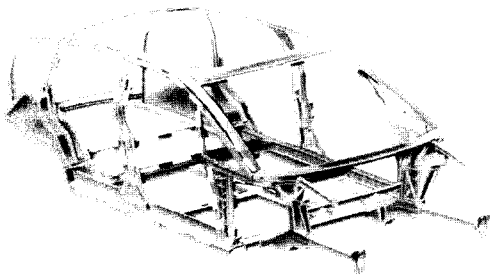


Fig. 2 Spaceframe body structure

도를 가지고 있는 재료의 사용이 요구되므로 스페이스 프레임 구조에서는 판재 결합과 이종재료 결합이 가능한 접합기술이 개발되어야 하며, 선진국에서 많은 연구가 진행중에 있다.[5-8)]

한편, 차체 전체를 알루미늄 스페이스 프레임으로 변경하기 위해서는 알루미늄의 성형문제, 강도(차체 재설계), 접합기술 등 관련 응용기술 부족하므로 차체에 부분적인 경량재 적용을 통한 경량화를 모색하고 있다. 따라서, 본 글에서는 그림 3과 같이 경량 알루미늄 프론터 언더 바디 (aluminum front under body) 부품과 철강소재 리어 언더 바디 (rear under body) 부품으로 구성된 이종재료 차체 개발을 위해 적용가능한 접합기술 개발 동향을 소개하고자 한다.

2. 국내 관련기술의 현황

기존 모노코크 스틸 차체의 경량화를 위해 스틸 판넬 TB(Tailored Blank) 레이저 용접기술은 국내 연구기관 및 자동차 업계를 중심으로 1992년도 부터 연구를 시작하여 현재 TB가 door inner, bump rail, side inner에 양산 적용되고 있다. 한편, 국내 자동차 업체의 알루미늄 차체 개발은 초기 단계에 있으며, 알루미늄 합금중 5xxx 및 6xxx 계열 냉간 압연 판재를 후보 재료로 선정하여 이들 후보 소재중 용접성, 성형성, 강도 등을 고려하여 적정 소재를 선정하는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 전기 전도도, 열전도도가 매우 크고 용융온도가 매우 높은 치밀한 산화피막이 덮여 있는 알루미늄 합금의 경우에는 기존의 spot 용접이 용이하지 않아 레이저 용접, 마찰교반용접, 복합열원용접인 하이브리드 레이저용접, 볼트나 리벳을 이용한 기계적인 접합, 접착재를 이용한 접합 등이 그 대상이 될 수 있다고 보고되고 있다.[5-8)]

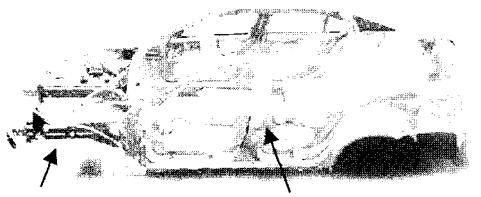


Fig. 3 BIW made of steel and Al alloy

2.1 전자기 성형에 의한 접합기술

전자기 성형 (EMF, Electro Magnetic Forming)에 의한 접합기술은 고강도의 자기장을 이용하여 강한 펄스 전기장을 직접 응용하여 고속(15~30m/s)으로 튜브를 확관 또는 축관을 하여 관형 부품을 접합하는데 사용되는 기술이다. 유도 전류와 자기장 사이의 상호작용으로 가공물에 균일한 내측 방향의 압력이 작용한다. 이 압력은 전류의 제곱에 비례하므로 압력도 진동하면서 감소

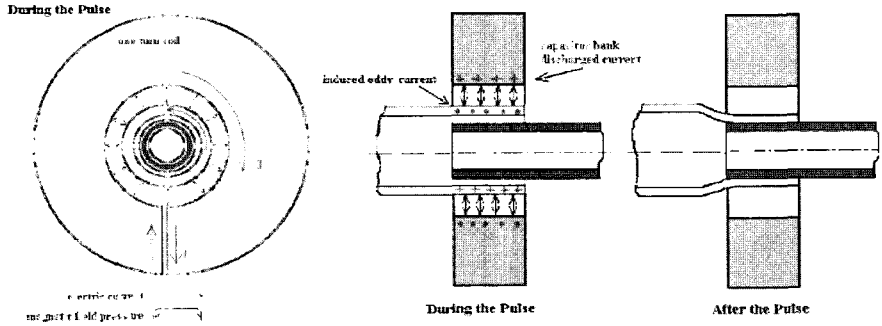


Fig 4 Principle of EMF welding

한다. 이 압력 펄스가 가공물의 항복 강도보다 크면 가공물은 소성변형하게 된다. 물리적인 접촉없이 가공이 가능하기 때문에 선진업체에서는 연구개발이 활발하게 진행 중이다.

국방과학연구소의 지원에 의해 1988년 서울대학교에서 성형분야 연구를 시작, 최근 자동차 접합기술로 적용하고자 연구중이나, 아직 실험실 수준이며, 업계에서는 EMF 관련기술을 이용한 자동차 부품 적용 사례 및 연구개발 사례가 전무하다.

2.2 레이저 용접 및 레이저-아크 용접 기술

레이저 용접은 용접 깊이가 깊으며, 열변형이 적고, 생산성이 높아 전 산업 분야에서 적용 범위가 크게 증가하고 있다. 한국기계연구원은 아연도금강판, 알루미늄합금, 이종두께 금속의 레이저 용접기술 및 주변장치 개발(1995, 통상부 공기반과제) 과제를 수행하였으며, 성우하이텍과 공동으로 경량차체개발을 위한 3차원 레이저 용접기술 개발(2001~2004) 과제에서 고출력 Nd:YAG Laser를 이용한 Al 5052 합금의 용접특성을 연구하였다.

현재 자동차 산업에서 용접용으로 사용하는 고출력 CO_2 레이저 및 Nd:YAG 레이저의 경우 Al과 같은 경량금속에는 흡수율이 매우 낮아 용접이 어렵다. 이를 극복하기 위해 하이브리드 레이저 용접 기술이 개발되고 있다. 하이브리드 레이저 용접은 레이저 용접과 아크용접의 장점을 이용한 복합용접 공정이며, 아크열에 의한 소재의 예열효과로 인하여 레이저빔의 흡수율이 향상되며, 아크열로 용접와이어를 용융시키므로서 레이저 빔의 손실이 적다. 또한, 소재 이음부의 간극을 용융된 용접와이어로 충진하므로서 보다 낮은 절단 품질 및 이음부 정렬도에서도 우수한 용접부 품질을 얻을 수 있는

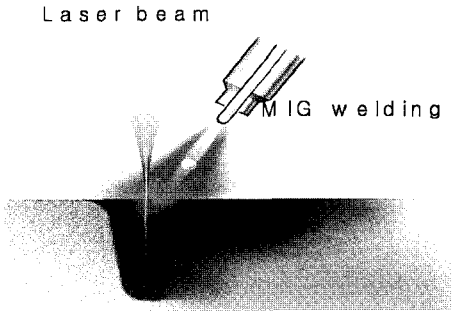


Fig. 5 Hybrid laser welding process

장점이 있다. 특히, Nd:YAG 레이저는 빔이 광케이블로 전송이 가능하여 복잡한 형상의 용접에 적합하며, 또한 파장이 짧기 때문에 재료에 대한 흡수율이 높고, 특히 플라즈마에 의한 간섭이 적기 때문에 하이브리드 레이저 용접에 유리하다.

레이저 아크 복합 용접기술은 레이저 용접을 사용하는 일부 자동차 산업과 중공업 및 연구소와 학교에서 부분적으로 연구가 수행되었으며, 이는 연구개발과 설비투자에 연구비가 많이 소요되는 용접과 같은 생산기반 기술에 대한 경영진의 R&D 투자가 적극적이지 않기 때문이다.

2.3 전자빔 용접 기술

집속된 전자를 금속에 조사하여 용융 접합하는 전자빔 용접은 최소의 입열로써 요구되는 금속재료의 두께를 한번에 접합시킬 수 있는 고에너지 접합법이다. 가속된 전자들이 접합금속에 충돌할 시 운동에너지가 열에너지로 변환되어 금속의 용융이 일어난다. 따라서, 재료의 반사율은 전혀 용접에 영향을 미치지 못하므로 알루미늄의 용접에 매우 적합하다. 그러나, 국내의 전자빔 용접의 활용은 제한된 부분에 머물고 있으며, 이는 전자빔 용접기술의 대중화가 미흡하고, 전자빔 용접장치의 고가에 기인한다. KIMM, 두산중공업, 한국웰테크, 한라이비텍, RIST

Table 1 Domestic trend of hybrid laser welding

연구기관	연구실	주요연구분야
한국과학기술원	용접자동화시스템연구실	Laser-GTAW 복합공정시 아크 플라즈마의 형상과 온도분포 측정과 monitoring
포항산업과학연구원	용접센터	규소가 3%이상 첨가된 전기강판의 용접을 위한 레이저 아크 복합용접
현대중공업	산업기술연구소 자동화연구실	레이저 아크 용접의 탄소강 적용성
조선대학교	선박해양공학과 구조/용접연구실	레이저 아크 복합용접부의 용입과 열분포 특성 및 용접잔류응력의 분포
한국생산기술연구원	생산기반기술본부 정밀접합/용접팀	조선산업 경쟁력 향상을 위한 레이저 아크 하이브리드 용접기술 개발
고등기술연구원	로봇/생산기술센터	알루미늄 압출재, 스페이스 프레임 및 파이프 용접에 Laser-MIG 하이브리드 용접 적용
자동차부품연구원 및 자동차 업계		하이브리드 및 연료전지 자동차 개발에 알루미늄 판재인 Hood, Door, Trunk Lid 등의 접합 공법으로 검토와 연구시도

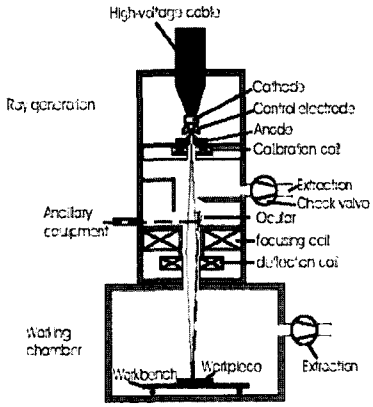


Fig. 6 EB welding system

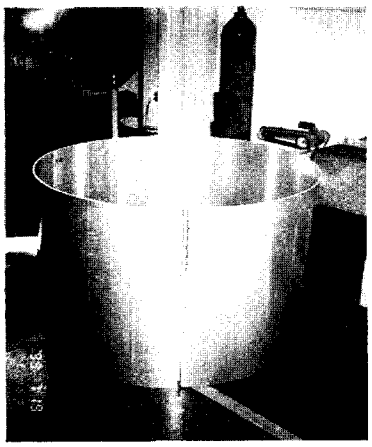


Fig. 7 EBW of Al tank

등에서 전자빔 용접기술 개발중이며, 특히, KIMM은 한라이비텍, 항우연, 두원중공업과 함께 1999년 Al 2000계열 합금의 전자빔 용접기술을 공동개발하여 이를 위성발사체 동체의 용접기술로 적용한 실적이 있다.

2.4 SPR (Self-Piercing Rivet) 접합 기술

SPR 접합기술은 금형을 이용하여 박판을 기계적으로 겹치기 접합시키는 기술이다. 재료층들은 pre-drilling이나 소음없이 맞물린 마찰 joint를 생성하는 것과 보조를 맞추어 rivet에 의해 연결된다. Rivet은 상위 재료를 통과하도록 설계되어 있고, 하위 재료 아래에 위치한 die로 향한다. 하위 재료는 관통되지 않았기 때문에, 결과적인 joint는 가스나 액체가 통하지 않는다. 전체 두께에 따라 두가지 이상의 재료의 층이 연결될 수 있으며, 연결되는 재료들은 setting head와 die 사이에 위치한다.

서울대, 연세대(대우자동차), 숭실대학교 등에서 접착재, Self-piercing rivet 등을 이용한 Al 합금 접합 특성을 연구해 왔으나, 단순시편 (부재)을 이용한 수준이며, 선진국

에서는 상용화된 공법이지만 국내 자동차 차체에 적용된 사례는 극히 적으며 경량 자동차 차체에 적용하기 위해 연구를 진행중이다. 현대자동차에서는 알루미늄 판재 제품인 Truck Lid의 접합공법으로 검토와 연구를 진행하고 있다.

2.5 Adhesive Bonding 기술

자동차 차체를 용접하는 방법 외 수지로 접착하는 방법을 일부 선진 자동차사에서 적용하고 있다. 접착재의 주요 기능은 물체들을 결합하는 것이며 일반적인 기계적 체결요소 보다 결합부의 응력을 균일하게 전달한다. 접착제를 사용하면 일반적인 기계적 체결방법에 의한 구조와 기계적으로 동등 또는 더 강한 구조가 될 수 있으며 가볍고 원가가 적은 구조가 된다.[4]

Adhesive bonding을 산업용으로 경량금속 접합기술에 적용하기 위하여 연구를 진행하고 일부 상용된 상품도 있지만, 차체 적용은 전무한 상태이다. 서울대학교 등 일부 대학에서 경량소재의 접합 특성 평가 위주로 연구를 진행해 왔으며, 현대자동차에서는 알루미늄 판재제품의 접합공법으로 검토와 연구를 시도하고 있다.

2.6 마찰교반용접

마찰교반용접(Friction stir welding, FSW)은 영국의 TWI에서 개발된 새로운 고상접합기술로 RIST, KIMM, 조선대, 성균관대 등에서 연구를 하고 있다. Tool의 회전력을 이용하여 소재와 마찰시 마찰열에 의해 소성유동이 생기고 혼합 및 접합된다. 현대자동차에서는 알루미늄 판재 제품인 트렁크 리드의 접합공법으로 검토와 연구를 시작하였다. FSW는 기존의 접합공정의 개념을 넘어선 획기적인 접합기술로 판재의 마찰압접이 가능하게 하였으며, 경제성, 환경친화성 등 여러 가지 측면에서 뛰어난 장점을 지니고 있어 향후 활발한 응용이 기대되고 있다. FSW 기술이 발표된지 10년이상 지났음에도 불구하고 아직 완전한 실용화를 위해서는 해결되어야 할 과제들도 많으며, 특히 TWI 가 순수한 연구개발기관인 대학이나 연구소에까지 연구개발에 대한 막대한 특허사용료를 요구하는 등 매우 배타적으로 특허권을 행사하고 있어 커다란 걸림돌이 되고 있다.(향후 3년이내 특허기간 완료) 그러나, FSW 기술은 앞으로 다양한 산업분야에서 광범위하게 사용될 것으로 기대된다.

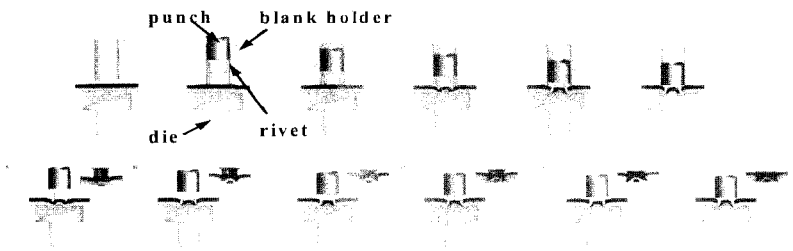


Fig. 8 SPR Processing

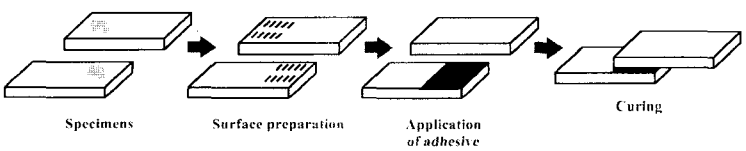


Fig. 9 Adhesive bonding

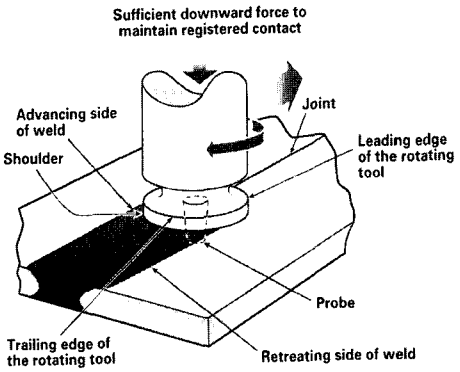


Fig. 10 Friction stir welding process

3. 국외 관련기술의 현황

생산되는 자동차의 대부분은 용접된 스틸 모노코크 구조이며, 스틸 모노코크 구조에 알루미늄을 적용하기에는 여러 난제가 있다. 한예로, 혼다사의 Acura NSX는 5xxx계 알루미늄 합금 판재와 6xxx계 알루미늄 합금 압출재를 사용하여 일체형 구조(모노코크방식)로 만든 차이다. 알루미늄 부품을 외장재, 패널, 여러 가지 엔진부품, 현가장치 부품 및 구동부 부품에 사용하여 자체 중량을 40%(135kg)이상 줄였으나, 낮은 성형성, 용접의 어려움으로 인해 생산시간, 부품수, 용접점수가 증가하고 금형 투자비용이 커서 모노코크 방식은 알루미늄에 적합하지 않음을 보인다.

1990년대 초반 Audi와 Alcan 컨소시움에서 자동차 차체에 알루미늄을 적용하기 위해 스페이스프레임 구조가 개발되었으며, 압출재나 액압성형재 등이 사용된다. 기존 모노코크 구조는 저항점용접에 의해 주로 제작되나, 스페이스 프레임 차체에는 여러 가지 접합방법들이 사용된다. (Table 2 참조) Audi

Table 2 Joining methods used in recent car

Model	Joining methods	Lengths
Ford Contour (Steel monocoque)	Spot welding	2630 points
Audi A8 (Al, spaceframe)	Spot welding MIG welding Self-piercing rivet Clinch	400 points 65 meters 1000 rivets 150 clinches
GM Precept (Al, spaceframe)	Spot welding MIG welding Self-piercing rivet	1600 points 15 meters 600 rivets
Audi A2 (Al, spaceframe)	Laser welding MIG welding Self-piercing rivet	35 meters 25 meters 1700rivets

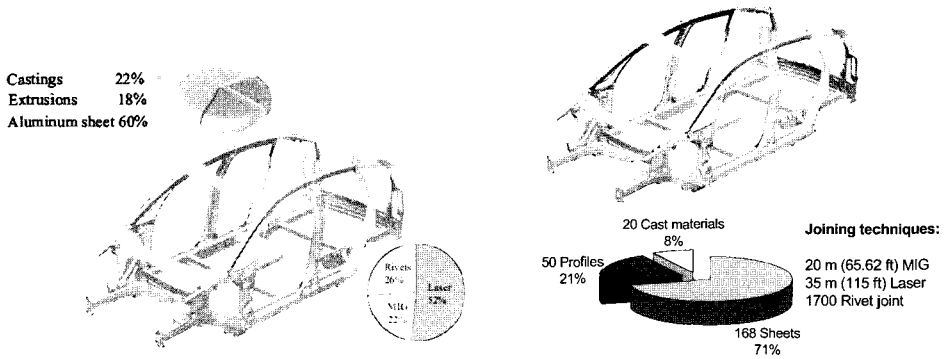


Fig. 11 Audi A2 spaceframe

A2 스페이스 프레임이 표준모델로 평가되고 있으며, 사용재료와 접합방법이 그림 12에 나타나 있다. Audi A2 스페이스 프레임은 상응하는 스틸 구조에 비해 43% 경량화되어 있다.

3.1 전자기 성형에 의한 접합기술

전자기 성형 (EMF, Electro Magnetic Forming)에 의한 부품 접합을 위한 장치가 이스라엘 pdffactory사에서 개발되었다. 원래는 전자기 성형을 위한 장치로 금속 성형장치이며, 전자기성형은 미국에서는 1960년 경 개발 및 실용화의 노력이 경주되어 산업적으로 이론적으로 많은 발전이 있었고, 일본에서

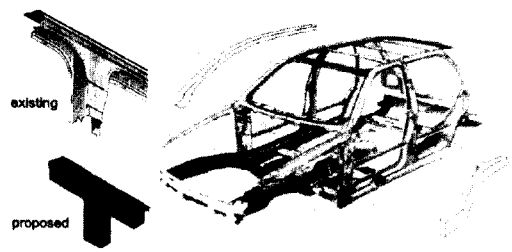


Fig. 12 Application of EMF welding

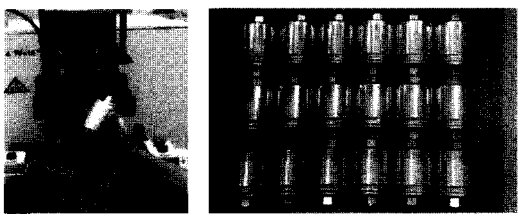


Fig. 13 Filter housing joining by EMF welding

도 1970년 초반에 연구가 시작되어 활발히 연구되었다.

3.2 레이저 용접 및 하이브리드 레이저 용접 기술

2002년과 2003년에 열린 ICALEO에서 발표된 기술자료를 조사 분석한 결과, 레이저 용접관련 논문은 미국 26편, 일본 13편, 독일 12편, 영국 9편, 핀란드 7편, 한국과 캐나다에서 4편을 발표하였다. 1970년대에는 미국에서 자동차 body의 3차원 레이저 심용접이 시도되었으나, 3차원 seam tracking 및 고정지그에 의한 판간극 관리의 어려움과 용접속도가 늦어 충분한 효과가 없었으나, 최근에는 고출력 레이저 및 seam tracking 장치가 개발되어 자동차 제조라인에 도입되어 성공적인 결과를 가져오고 있다.

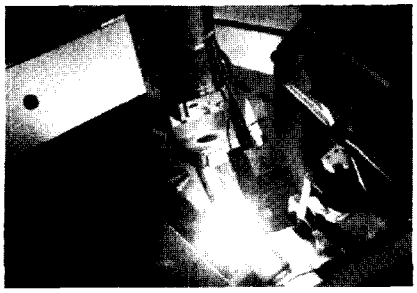
1970년대 영국에서 아크의 효과가 첨가된 레이저 용접기술에 관한 연구가 발표된 후 1990년에 미국, 일본, 유럽에서 본격적으로 개발된 레이저 아크 복합 용접기술은 20세기에 들어와 실용화가 본격적으로 추진되면서 경제적인 생산기술로 각광을 받고 있다. 독일의 VW, Audi 차체조립라인에 Nd:YAG 레이저 아크 복합용접으로 실차를 생산하였다.

3.3 전자빔 용접 기술

기존 고밀도 에너지 열원중 하나인 전자빔 용접은 레이저 용접에 비해 Al 합금 용

Table 3 Laser-Arc welding in car industry

기관명	적용대상	공정	년도
독일 Fraunhofer Institute	TWB	CO_2 Laser+TIG	1996
캐나다 Powerlasers Advanced Tech. Center	아연도금강판	Nd:YAG Laser+TIG	2000
독일 Laser Zentrum Hannover	HF tube	Nd:YAG Laser+MIG	2001
일본 Nissan	알루미늄	Nd:YAG Laser+MIG	2001
오스트리아 Fronius	헤드	Nd:YAG Laser+MIG	2002
일본 NKK	아연도금강판	Nd:YAG Laser+MIG	2002



Source: Audi

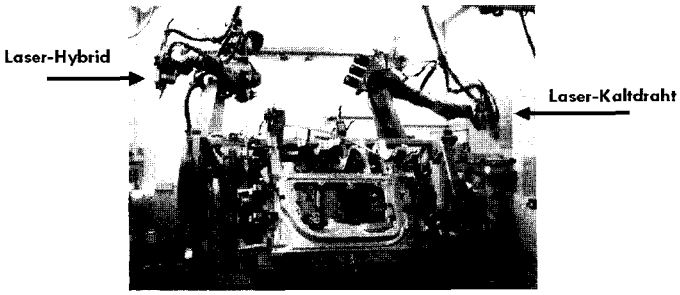


Fig. 14 Laser-Arc welding scene

접에 좀더 적합하며(방전 제어기술 발달), 진공중에서 용접을 하나 최근에는 non-vacuum 전자빔용접장치가 개발되었다.(Steigerwald Strahltechnik) VW은 점용접 강판 재료인 in - strument panel beam을 Al합금으로 대체하여 전자빔 용접구조로 하여 40% 경량화를 이루었다. 이 부품은 ALCAN에 의해 개발되었으며, AlMg3재료이며, 용접길이는 1,400mm이다.

3.4 SPR (Self-Piercing Rivet) 접합 기술

SPR (Self Piercing Riveting) 접합기술은 유럽의 알루미늄 차체에 양산적용시에는 필히 적용되는 기술이므로 자동차업계에서 하이브리드 및 연료전지 자동차의 경량 차체 적용에는 더욱 활발하게 적용되는 기술로 판단된다. 항공기 제작업체에서는 아직까지 용접기술보다는 Adhesive bonding 이나 리벳팅 등 기계적인 접합을 선호하고 있다. 한편, 선진 자동차업체인 Toyota, Nissan등 알루미늄 차체에 적용하여 양산 적용하였다.

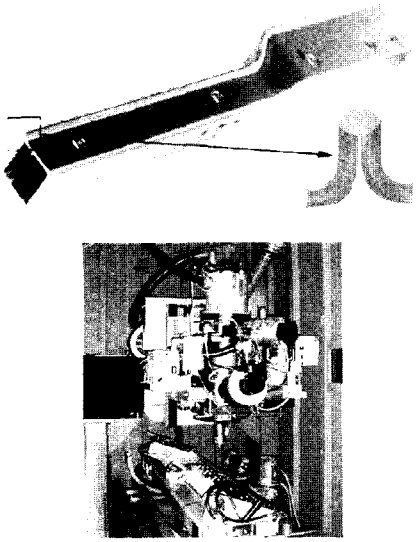


Fig. 15 Instrument panel beam by EB welding

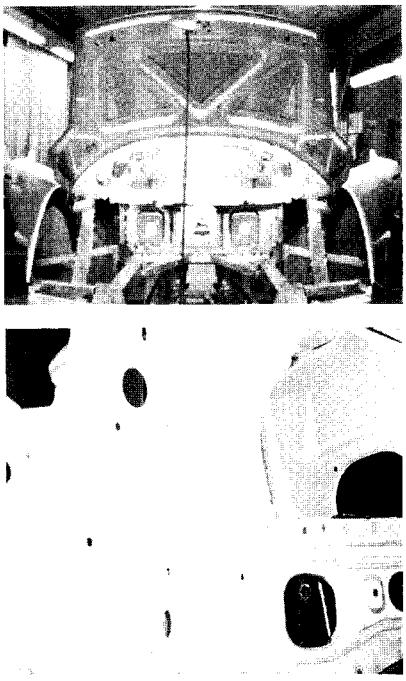


Fig. 16 Application of self-piercing riveting

3.5 Adhesive Bonding 기술

Adhesive bonding 기술은 독일의 IFAM 연구소에서 체계적인 연구와 data화가 완료되었지만 경량 차체 개발의 핵심기술로 판단하고 비공개 연구개발이 진행 중이다. 자동차업계외 항공 산업 및 군수산업에 적용을 위한 연구를 수행하고 있으며, 독일 BMW사에서 알루미늄 차체에 적용하기 위해 기계적인 접합과 동시에 적용하여 차체 부품 양산 적용고품질 공정 개발을 완료하였다.[4)]

3.6 마찰교반용접

1991년 영국의 TWI에 의해 개발된 새로운 개념의 접합기술인 마찰교반용접 기술에 가장 관심을 보이는 분야는 항공기 부품 제작 분야로서 미국에서는 국방성을 중심으로 2000년부터 막대한 연구비를 투자하고 있다. 지난 2000년 6월 미국에서 열린 국제항공재료학회 (AeroMet)에서는 약 30%의 연구발표가 마찰교반용접에 관한 발표일 정도로 지대한 관심을 보이는 기술이다. 일본도 통산성 산하의 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)를 중심으로 TWI로부터 라이센스를 받아 여러 중공업 회사와 항공 우주 관련 연구소들이 이 기술을 개발하고 있으며, 선진 각국에서는 이미 융점이 낮은 알루미늄계 합금의 접합에는 다양하게 적용하고 있다.

자동차 분야의 경우, 소량생산되는 차종과 부품부터 일부 적용되고 있으며(Toyota, Nissan 등 알루미늄 차체에 적용) 알루미늄 주물재와 마그네슘 합금에의 적용도 검토되고 있다. 현재까지 알려진 개발현황을 보면, space frame의 접합(Tower Automotive사), aluminum wheel(Kuka 등), intake manifold (Pipe & Die Cast 사), 트럭용 유압 lift panel, seat frame(SAPA Volvo 등), engine supporter mount(Tower Automotive사), suspension arm(최근 유럽의 여러차종에 탑재), tailored blank(판두께 차이 1:2), wheel rim, 로봇을 이용한 FSW 공정의 자동화(Neos, Giddings & Lewis, Hexapod, GKSS) 등이 발표되었다. 이스라엘에서는 레이저 시스템을 활용하여 개발한 laser-friction stir welding 기술은 노르웨이의 Norsk Hydro사에서 FSW 용접 tool 전방에 induction coil로 된 가열장치를 부착하여 제조한 heat source 위치에 700W multimode Nd:YAG 레이저 시스템을 대체함으로써 용접시료가 비금속이거나 혹은 비전도체일 경우에도 효과적이나, 용접생산성에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

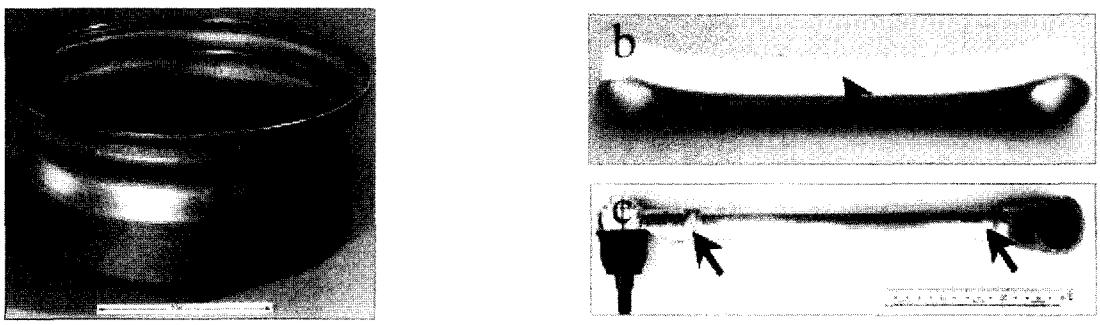


Fig. 17 Application of FSW
(a) wheel rim, (b) suspension link and (c) suspension arm

4. 결 언

본 글에서는 경량 알루미늄 프론터 언더 바디 (aluminum front under body) 부품과 철강소재 리어 언더 바디(rear under body) 부품으로 구성된 이종재료(하이브리드) 차체 접합기술의 국내외 개발 동향을 소개하였다. 끝으로, 국내의 현 접합기술상태의 취약성을 분석한 결과 다음과 같은 향후 전망을 예측할 수 있었다.

1. EMF 관련 기술은 다른 접합공정보다 청정하기 때문에 향후 자동차 부품 적용기술 개발시 각광받을 기술로 기대된다. 따라서, 생산성과 접합품질이 확보되면 실용화가 높은 기술이므로 접합기술 및 장치 국산화를 위한 산학연 협동연구가 필요하다.

2. 하이브리드 레이저 용접은 생산성과 용접품질을 동시에 향상시키는 것이 가능한 기술이나, 장비가격이 고가이며, 공정이 복잡하므로 체계적인 연구가 필요하다.

3. SPR 접합기술은 상용화된 기술이지만 리벳의 단가가 고가이며, 국내에서는 개발되지 않아 전량수입에 의존하는 실정이다. 따라서, 실용화 및 확대적용을 위해서는 리벳의 국산화도 시급하다.

4. Adhesive bonding 기술은 아직 차체 부품조립에 적용된 사례가 없기 때문에 검증된 data 산출과 접착재의 경우는 균일하게 도포하는 기술이 함께 개발되어야 실용화가 가능할 것이다.

5. 마찰교반용접은 다른 용접공법보다 설비가 간단하므로 생산성과 용접품질의 신뢰도가 확보되면 실용화가 조기에 이루어질 수 있다.

참 고 문 헌

1. "2004 자동차산업," 2004, 한국자동차산업연구소.
2. "자동차와 부품산업," April 2004, ADC, N 52, P 17.
3. "자동차 바디의 알루미늄화와 적용기술," 10월호 2004, 공업재료, P 10-14.
4. "이종재료를 이용한 경량 고강성 차체부품 개발," 지역중점사업 연구기획보고서 (2006).
5. Usami Tsutomu, "Recent Progress in Phosphating Process for Auto Body Aluminium Alloy Panels," Sumitomo Light Metal Technical Reports, 1997, 28.
6. Kogler, Carina G, "Aluminium in car body manufacturing," Journal for Exploration, Mining and Metallurgy v56, n6-7, 2003. p 335-337.
7. Decaillet, C.; Millet, P.; Saur, E. "Recent developments in aluminium sheet manufacture for car body panels," International Journal of Vehicle Design, v11, n3, 1990, p234- 245.
8. www.pdffactory.com