

알루미늄 기반 Advanced Multi-Material 기술의 선진 동향

이 목 영^{*,†} · 정 성 훈^{*}

^{*}포항산업과학연구원

Trends of Advanced Multi-Material Technology for Light Materials based on Aluminum

Mokyoung Lee^{*,†} and Sung-Hun Jung^{*}

^{*}Advanced Metallic Materials Research Department, RIST, Pohang 37673, Korea

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

(Received September 21, 2016 ; Revised September 27, 2016 ; Accepted October 10, 2016)

Abstract

Global warming is hot issue to keep the earth everlastingly. Despite the increase of the world population and the energy demand, the world oil supply and the oil price are hold the steady state. If we are not decrease the world population and the energy consumption, unforeseeable energy crisis will come in the immediate future.

AMT acronym of Advanced Materials for Transportation is a non-profitable IEA-affiliated organization to mitigate the oil consumption and the environment contamination for the transportation. In recent, Annex X Multi-materials Joining was added to enhance the car body weight reduction cause the high fuel efficiency and the low emission of exhaust gas. Multi-materials are the advanced materials application technology to optimize the weight, the performance and the cost with the combination of different materials such as Al-alloy, Mg- alloy, AHSS and CFRP.

In this study, the trends of AMT strategy and Al-alloy based multi-materials joining technology were review. Also several technologies for Al-alloy dissimilar joining were investigated.

Key Words : Car body, Weight saving, AMT, Multi-materials, Dissimilar joining

1. 서 론

전 세계의 인구는 연 평균 1% 이상 증가하고 있으며, 2016년 74억명을 초과하였다. 미국 Census Bureau 보고서에 따르면 2050년에 전세계 94억명 가량일 것으로 예측된다¹⁾.

지구온난화와 화석연료의 고갈은 인류의 생존을 위협하는 가장 중요한 문제이다. CO₂, NO_x, SO_x 등 온실가스는 지구온난화 및 대기오염의 원인인데, IPCC는 제5차 평가보고서를 통해 온실가스에 따른 기후변화를 예측하였다. 현재의 추세로 온실가스를 배출하면 2100년 CO₂ 가스의 농도는 936 ppm에 도달하고, 21세기 말 지구의 평균 기온은 1986~2005년에 비해 3.7 °C 오르고 해수면은 63 cm 상승할 것으로 전망하였다²⁾. 2013년 한국의 온실가스 배출량은 635.6백만 톤이고,

이 가운데서 수송부문은 13.8%에 해당하는 87.5백만 톤인데 산업부문에 비해 비용 투입 효과가 적어 중요 감축대상이 되고 있다³⁾. 자동차를 대상으로 하는 온실가스규제는 해당 차종의 평균 배출량이 법정 규제 한도를 초과하는 경우 초과된 양에 대해 과징금이 부과되는 제도로, 2020년 자동차 온실가스 및 연비규제 한도는 각각 97 g/km 및 24.3 km/L이다⁴⁾. 이는 2015년 기준 140 g/km, 17 km/L에 비해 30.7%, 42.9% 강화된 기준으로 자동차제조사에서는 기준 달성을 위해 차량 경량화를 통한 온실가스 감축 대책 적용이 필요하게 되었다.

한편, IEA(국제에너지기구)의 조사에 따르면 세계 에너지 수요는 연평균 1.65%씩 증가하여 2030년에 29000 Twh에 이를 것으로 보고하였다(Fig. 1)⁵⁾. 석유는 가장 보편적인 에너지원으로 인구증가 및 산업화에 따라 수요는 꾸준히 증가해왔다(Fig. 2)⁶⁾. 전체 에너지에서 석

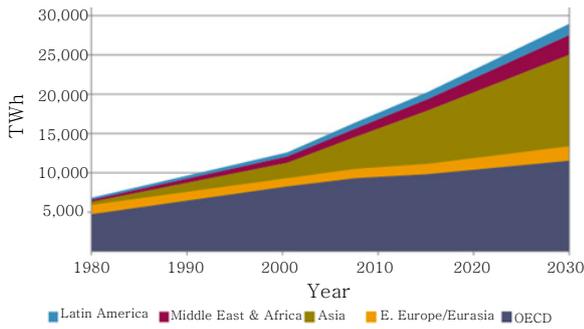


Fig. 1 World electricity consumption

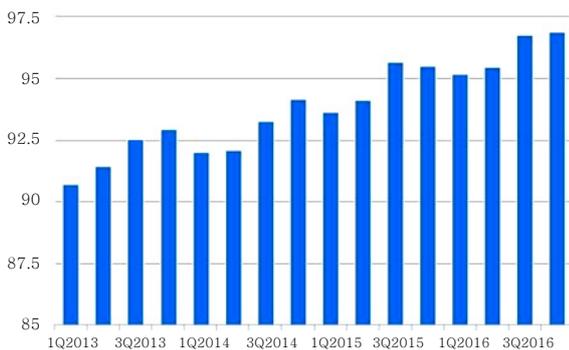


Fig. 2 World oil demand

유의 비중은 27%를 유지할 것으로 예상되며, 천연가스, 신재생 에너지 및 원자력 등 대체 에너지의 영향으로 연평균 0.42% 가량 감소할 것으로 전망된다. 그러나 2030년 까지 최대 에너지원 역할을 수행하고, 중장기적으로도 화석연료는 전체 에너지 공급원의 약 87%를 차지할 것으로 예측된다.

본 연구는 자동차 경량화를 위한 IEA 산하 AMT(Advanced Materials for Transportation)의 최근 활동 동향 및 알루미늄합금 기반의 Multi-materials joining 기술에 대한 개발사례를 알아보고자 하였다.

2. 본 론

2.1 IEA/AMT 개요

2.1.1 IEA(International Energy Agency)

Oil 공급 체계 붕괴에 대응하기 위해 1974년 설립된 자율기구로 현재 29개 회원국을 가지는 국제에너지 통계 및 분석에서의 최고 권위 기구이다. IEA의 목적은 회원국에 에너지 신뢰성과 변화에 대한 대응력 부여 하는 것으로, 에너지의 다양성, 효율, 유연성을 제고 / 경제 성장 및 에너지 빈곤 해소/ 환경을 고려한 에너지 생산 및 사용 / 경제 강국의 에너지, 환경문제 분담의 4가지의 활동 초점을 가진다. Fig. 3에 IEA의 조직도를 나타내었다.

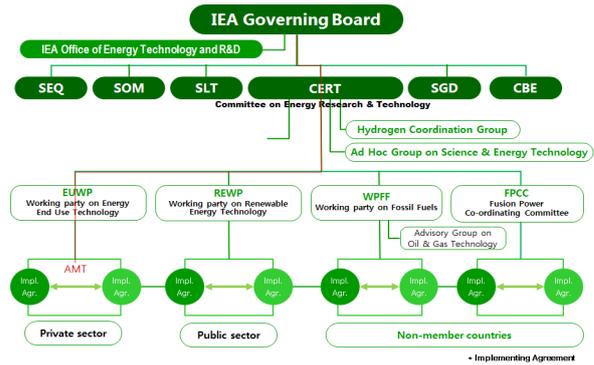


Fig. 3 IEA Organization

2.1.2 AMT (Advanced Materials for Transportation)
AMT는 IEA CERT(Committee on Energy Research & Technology) 산하의 EUWP(Working party on Energy End Use Technology)에 해당된다. AMT는 1985년 US DOE, US Army, NIST & ORNL 등에 의하여 설립되었으며, 현재 회원국은 미국, 독일, 캐나다, 영국, 핀란드, 호주, 이스라엘, 중국, 한국 등이다.

AMT의 목적은

- 수송 분야 에너지 소비 저감
- 환경 영향 저감
- 가입국의 network 구축 및 실질적 국제 협력
- 정보교환 및 leveraging efforts

이고, 신소재의 시험방법개발 및 표준화를 통한 수송기기 적용으로 지구온난화, 대기환경오염방지 및 연료의 경제성 제고를 목표로 하고 있다. AMT의 주제를 Table 1에 정리하였다.

2.1.3 한국의 AMT 활동

한국은 2013년 11월 AMT에 정식으로 가입하여, 열전기술을 시작으로 표면텍스처링, 코팅 및 다중소재접합 분야에서 활동하고 있다. 2015년 11월에는 EXCO Meeting 및 기술심포지엄을 주최하였는데, 6개국에서 40여명이 참가하였다.

2016년 주요 활동 계획은

- 전문가 네트워크 활용을 통한 정보 교환
- 해외의 자동차 관련 정책 및 기술 현황 조사
- 국내 대학 및 관련 기업에 정보 제공
- 신규 Annex “자동차용 환경소재 개발” 제안
- Sub-task 제안: multi-materials joining(Annex X)

이다.

2.2 Advanced Multi-Materials의 기술 동향

2.2.1 Advanced Multi-materials란?

종래의 Multi-materials는 자동차 차체 및 판넬에

Table 1 IEA IA AMT cooperative programs

Ann.	Cooperative Programs	Remark
I	Ceramics for Gas Turbine Engines	Finished
II	Ceramics for Advanced Engines and Other Conservation Applications	Finished
III	Contact Reliability of Advanced Engine Materials	Finished
IV	Integrated Engineered Surface Technology	Stephen M. Hsu
V	Environmentally Friendly Corrosion Protection Technologies for Magnesium Alloys Used in Transportation	Finished
VI	Low Cost Carbon Fibers and Composites for Transportation Applications	Finished
VII	Development, Evaluation and Standardization of Methods for Testing Mechanical Properties of Nano-materials for Application in Automotive Industries	Finishing
VIII	Development of Thermoelectric Materials for Waste Heat Recovery in Transportation Industries	Hsin Wang
IX	Friction Reduction and Lifetime Control by Advanced Coatings via Characterization, Modeling and Simulation	Kenneth Holmberg
X	Multi-materials Joining	ZhiliFeng

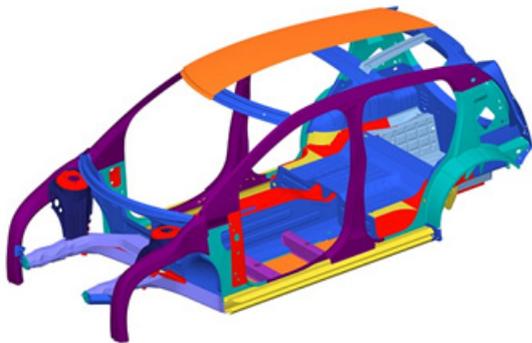


Fig. 4 Advanced multi-materials concept⁷⁾

강도 혹은 도금이 상이한 다양한 철강재를 혼합하여 적용한 반면, Advanced Multi-materials는 강도가 상이한 철강재 뿐만아니라 알루미늄, 마그네슘 및 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP) 등을 혼합 적용하는 확장된 개념이다. Fig. 4에 Advanced Multi-materials의 개념도를 나타낸 것으로, 다양한 색상은 서로 다른 소재가 적용되는 것을 표현한 것이다. 자동차 차체에서 각각의 부위는 요구되는 특성이 다양한데, 각 부위별로 최적의 소재를 융/복합하여 채용하므로써 경량화-성능-비용의 종합 만족도가 더욱 높아진다.

2.2.2 Advanced Multi-materials 동향

2011년 7월 29일 미국 오바마 대통령은 Ford, GM,

현대 등 13개 자동차사(VW 및 벤츠 제외)와 새로운 연비기준에 대한 합의를 발표하였는데, 2025년 모든 승용차 및 경트럭의 연비효율을 23Km/L 까지 증가시키는 것이다⁸⁾. 이러한 도전적인 배출가스 및 연비 기준을 달성하기 위해서는 종래의 철강위주의 차체로는 불가능하므로, 알루미늄, 마그네슘 및 CFRP 등의 적극적인 채용이 불가피해졌다. 자동차 소재로서 철강 이외의 소재를 적용하려는 시도는 오래 전부터 지속되어 왔으나, 다양한 기술적 문제 및 비용이 상승하는 한계에 봉착한 상태이다.

Fig. 5는 알루미늄, 마그네슘, CFRP 등 각각의 소재를 자동차 부품제조에 적용하는데 있어서 제반 문제점 및 선호도를 나타낸 것이다⁹⁾. 경량화 효과는 CFRP, 알루미늄 및 마그네슘이 가장 크고, 상용화를 위한 장벽은 원소재의 비용이다.

Fig. 6은 Advanced Multi-materials에서 각 소재에 대한 개발 단계 및 그에 대한 평균 비용을 나타낸 것이다⁹⁾. Advanced Multi-materials에서는 알루미늄 합금이 상용화에 가장 근접한 것으로 표현되었다.

2.2.3 Advanced Multi-materials 프로그램 사례

① MMLV 프로그램

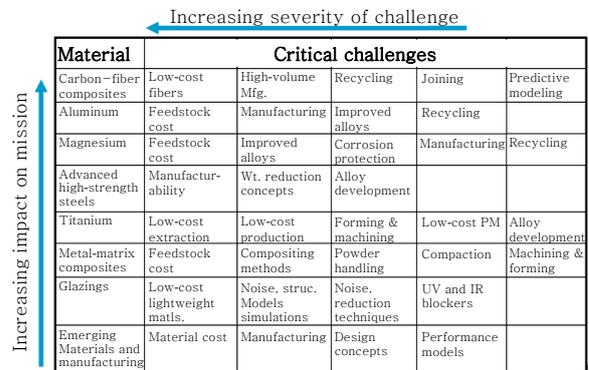


Fig. 5 Primary material challenges for advanced multi-materials

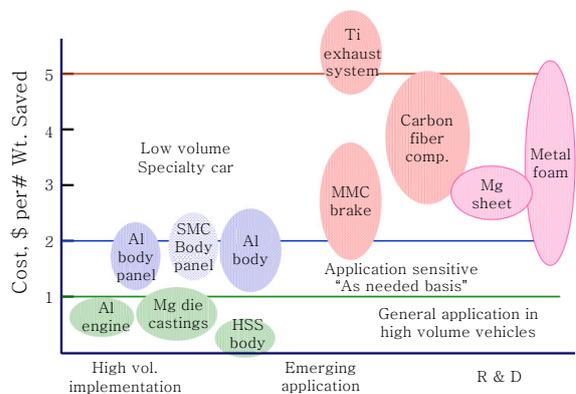


Fig. 6 Lightweight automotive materials-market penetration vs. cost

Table 2 Weight of MMLV parts

	Baseline	Mach I	Mach II
BIW	316.04	231.33	172.59
Closures	92.17	57.23	45.16
Chassis	89.07	52.9	30.8
Bumpers	20.38	11.13	11.13
Total	517.66	352.59	259.68

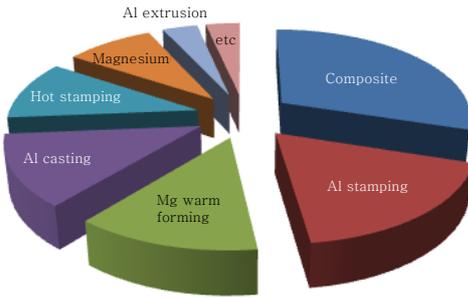


Fig. 7 Fraction of materials for Mach II



Fig. 8 Design of MMLV concept car

미국 DOE에서는 2012.2~2015.9 Ford 및 Magna사를 주축으로 MMLV(Multi-Material Lightweight Vehicle) 프로그램을 수행하였다. 이 프로그램에서는 Fusion 모델을 기본으로 Multi-material을 적용하여 획기적인 경량화를 달성하고자 하였다. Table 2은 MMLV 차량의 각 part 별 중량을 기존의 차량과 비교하여 나타낸 것으로, BIW 기준 Mach I 및 II에 대해 각각 74.71kg 및 143.45kg이 감소되었다. Fig. 7은 Mach II에 적용된 소재의 비율을 나타낸 것으로 알루미늄이 34.2%로 가장 많이 사용되었으며, 복합재료와 마그네슘은 각각 29.9% 및 21.8%가 사용되었다. 철강은 Fusion에서는 92.7%가 사용되었으나, Mach I에서는 26.8% 및 Mach II에서는 Hot stamping 8.8%로 급격히 감소되었다. Fig. 8에 Mach II에서 제작한 concept car의 외관을 나타내었다¹⁰⁾.

② EOLAB 프로그램

프랑스 Renault사는 차체 중량을 획기적으로 감소시

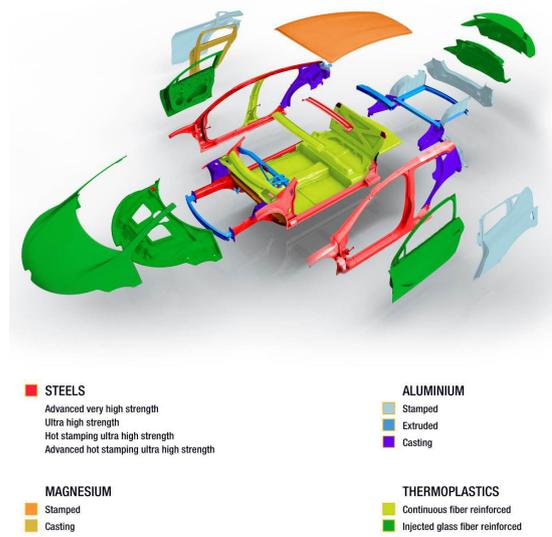


Fig. 9 EOLAB's ultra-light body concept

키기 위하여 1리터/100km (CO₂ 22g/km)를 목표로 EOLAB 프로그램을 수행하고 있다. Renault 사의 전략은 총 100개의 혁신적인 기술을 접목하여 B segment platform을 대상으로 Minimising weight, Aerodynamic design 및 Z.E. Hybrid를 구현하는 것이다.

차체의 무게를 최소화하기 위하여 “the Right Material in the Right Place”라는 슬로건하에 Fig. 9에 나타난 것과 같이 초고강도강, 알루미늄, 마그네슘 및 플라스틱을 혼합하여 채용하였다. 특히 포스코 마그네슘판재를 채용하여 종래 10kg의 철강 roof의 무게를 4.5kg으로 감소시켰는데, 이는 차체의 무게 중심을 낮춰 주행성능을 크게 향상시킨다¹¹⁾.

③ 자동차사의 경량화 동향

Global major 자동차사 모두 차체의 경량화 프로그램을 진행하고 있다.

- Ford는 2014년 디트로이트 모터쇼에서 알루미늄 바디의 F-150 픽업 모델을 발표하였는데, 도어, 후드, 사이드 패널 등에 알루미늄을 채용하여 무게를 317.5kg 가량 감소시켰다. 또한 대량생산 모델로 알루미늄 바디를 조립하기 위하여 구조접착제, 리벳 및 점용접을 적용하였다.
- GM 또한 2018년까지 알루미늄을 전면 적용한 픽업트럭을 개발하기 위하여 Alcoa 및 Novelis와 공급계약을 체결하였으며, 2019년형 Chevrolet Silverado와 GMC Sierra에 알루미늄 차체를 적용할 계획이다¹²⁾.
- Benz는 알루미늄의 적용에 가장 적극적이데, 대량생산 차량까지 Multi-material을 적극적으로 적



Fig. 10 Aluminum sub-frame by honda

용하여 Premium 선두를 유지하는 전략을 수립하였다. Bremen 및 Sindelfingen 공장에 알루미늄의 생산과 조립설비에 450백만유로 이상을 집중적으로 투자하여, C-Class는 UHSS 5.4%, 알루미늄 7.6% 및 S-Class는 UHSS 10.8%, 알루미늄 14%를 적용할 계획이다¹³⁾.

- BMW는 "Project i"를 통해서 CFRP를 선도적으로 양산화하였으며, 5 Series의 '17년 모델에 HPF 22%, AHSS 18%, Al 10% 등 경량소재를 대량 적용할 예정이다¹⁴⁾.
- Volkswagen은 8개 승용차 Brand를 대상으로 다양한 경량소재 적용을 추진 중인데, Audi와 Porsche 등 Premium brand에 알루미늄을 적용해 경량화 극대화를 추진한다. 2015년 Porsche 911 Roof에 포스코 Mg 판재를 적용하였으며, Panamera에 확대적용을 진행중이다. VW은 그룹차원에서 다양한 경량소재를 검토하여 Feasibility가 검증되면 전체 그룹사로 확대한다는 전략이다¹⁵⁾.

Honda는 경량화가 뛰어난 알루미늄 합금제 프론트 서브프레임을 개발하여 '사람과 자동차의 테크놀로지전 2016' (2016년 5월 25~27일 피시픽 요코하마)에서 발표하였다. Fig. 10에 알루미늄합금 서브프레임을 나타내었는데, 마찰교반접합기술을 사용하여 알루미늄과 철강을 접합하고 평균 벽두께는 3mm 가량이며 종래와 비교하여 무게가 20% 감소되었다¹⁶⁾.

2.3 알루미늄 기반 MMI 접합 기술 현황

알루미늄합금은 가격-성능-양산성 등에서 미래형 자동차용 소재로 가장 유망한 것으로 전망된다. 그러나 알루미늄합금은 기존의 철강소재 위주의 용접방법으로는 용접이 어려운 것으로 알려졌다. 아래에 알루미늄합금의 용접에 적합한 공정에 대하여 소개하였다.

- 저항 spot 용접
차체 조립공정에서 저항 spot 용접은 가격-성능-생산

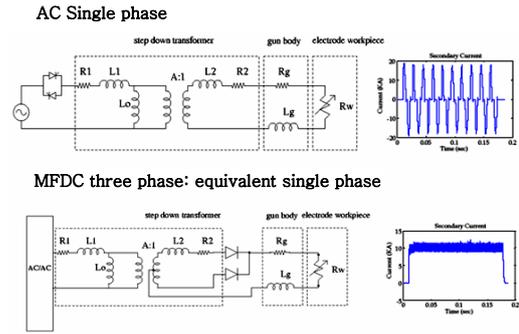


Fig. 11 Comparison of AC and MFDC power source

성 측면에서 타의 추종을 불허하는 경쟁력을 갖고 있으며, 알루미늄 기반 MMI 접합에서도 반드시 기술이 확보되어야 한다. 그러나 알루미늄은 전기전도도 및 열전도도가 높기 때문에 저항용접이 쉽지 않다. 알루미늄합금을 저항 spot 용접하기 위해서는 역율이 높은 MF(medium frequency) DC 전원을 사용하는 것이 추천된다(Fig. 11)¹⁷⁾. 알루미늄은 그 자체로 전기전도도가 높기 때문에 저항이 높은 물질이 표면에 코팅 혹은 오염되는 경우 전극이 급격히 손모된다. 전극은 전기전도도가 높은 RWMA Group A의 Class 1 Cu-Cr 재질 및 접촉면적이 넓은 R형이 추천된다. 알루미늄합금의 저항 spot 용접은 높은 전류가 흐르고 판재 혹은 전극표면의 오염에 의하여 쉽게 arcing 혹은 expulsion이 발생하므로 피용접재 및 전극 관리뿐만 아니라 안전에도 각별히 주의를 하여야 한다.

- 아크용접

Filler를 사용하는 아크용접은 3D 구조의 박판용접 부에서 강도를 확보하기 용이하므로 저항 spot 용접과 함께 차체 조립공정에 가장 널리 사용되는 공정에 해당한다. 알루미늄합금은 표면의 산화물에 의하여 아크의 안정성이 낮으므로, 용접전원에는 표면청정작용을 위한 AC 성분이 포함되어야 한다. 알루미늄합금의 아크용접은 비교적 널리 사용되고 있지만, 이종용접에서는 IMC(inter metallic compound)에 의한 용접부 강도 저하를 초래하므로 저입열 용접이 이루어져야 한다. 알루미늄합금의 저입열 용접을 위한 용접기가 많이 개발되어 있으며, 대표적인 것으로는 용접전원과 와이어 동작을 연동제어하는 Fronius 사의 CMT process이다¹⁸⁾.

- 레이저 용접

레이저 용접은 대기중에서 고밀도로 집속된 고휘도의 빔을 사용하는 것으로, 최근 Audi, VW 등에서 적용이 확대되고 있다. 레이저 용접은 투자비 및 유지비가 많

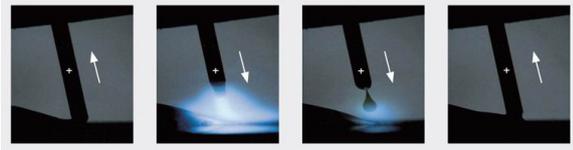


Fig. 12 CMT process concept

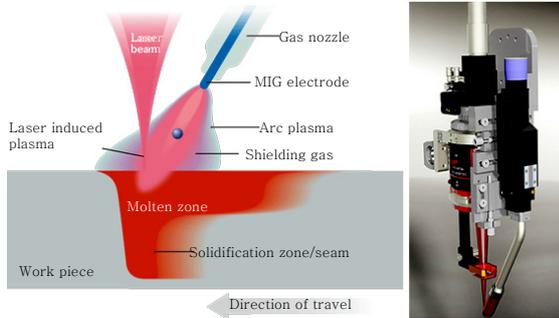


Fig. 13 Schematics and head-set of laser hybrid welding

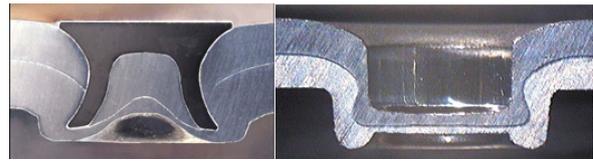
이 소요되므로 핵심부품 혹은 고급차종 위주로 적용이 되는데, Multi-material이 다량 적용될 것으로 예상되는 미래형 자동차의 제조에 강점이 높다. 알루미늄합금의 용접에는 레이저는 Disk, Fiber 및 Diode 레이저 등이 적합하며, 3차원 이음부에는 레이저 하이브리드 용접이 널리 사용된다(Fig. 13)¹⁹⁾.

- 마찰교반용접

마찰교반용접은 핀의 교반작용에 의하여 비교적 두꺼운 소재도 심용입(penetration welding)이 가능하여 최근 사용이 증가하고 있다. 특히 접합부의 최고 가열온도가 모재의 용점보다 낮기 때문에 작업환경이 청결하고, 용접부 성능이 우수하고, 에너지 소모가 적은 장점이 있다. 알루미늄합금은 마찰교반용접의 경쟁력이 높으며, 특히 이종접합시 타 공정대비 성능이 우수하다.

- 기계적 체결

기계적 체결은 IMC를 형성하지 않기 때문에 이종접합에 널리 사용되고 있다. 기계적 체결에는 Hemming, Clinching, Mechanical interlocking, Threaded fasteners, Self-tapping screws, Hole and thread forming screws, Blind rivet nuts and bolts, Solid rivets, Blind rivets, Lockbolts, Self-piercing rivets, Clinch riveting 등 다양한 공정이 개발되어 있다. 그러나 기계적 체결은 완벽한 접합이 이루어지지 않기 때문에 내구 혹은 피로에 제약이 있으며, 소모재에 따른 무게 및 비용이 상승하는 단점이 있다. Fig. 14에 SPR 및 clinching 접합부 단면을 나타내었다²⁰⁾.



(a) SPR (b) Clinching

Fig. 14 Examples of mechanical fastening

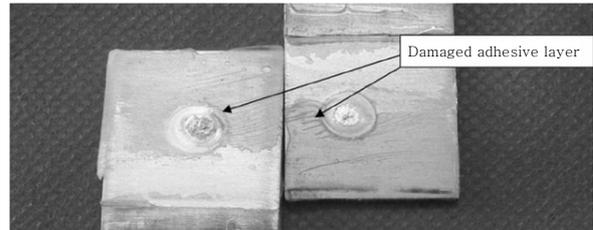


Fig. 15 Appearance of spot weld bonding

- 본딩

본딩은 낮은 온도에서 경화되고 피접합재와 결합력을 갖는 filler를 이용하여 접합하는 것으로 소음차폐 혹은 이종접합에 널리 사용되고 있다. 또한, 본딩은 경화에 시간지연이 생기는데, 이러한 특성을 이용하여 비교적 넓은 면적을 동시에 접합이 가능하므로 생산성이 높은 장점이 있다. 그러나 소재 표면의 상태에 따른 접합강도의 변동이 크고 그 변동을 예측하기가 어렵다. 또한 접착재 자체의 화학적인 열화를 방지하기가 어려우므로 내구성을 보증하기가 쉽지 않다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 하이브리드 본딩이 사용되기도 한다(Fig. 15)²¹⁾.

2.4 MMI 관련 RIST 연구 현황

RIST는 “용접센터” 기반구축사업을 통하여 다양한 장비를 구축하였다. MMI 관련 주요 장비로는 대출력 레이저 용접기, Digital pulse MIG 용접기, CMT Process, 초음파용접기, MPW (Magnetic Pulse Welding), 회전마찰용접기, 마찰교반용접기, 마찰점용접기 등이 있다. 주요 연구실적으로는 고강도 및 표면처리 철강 용접, 마그네슘 용접 등이 있으며, 이종접합은 마그네슘/알루미늄 이음부에 대한 마찰교반용접, 레이저용접, MPW 접합, 초음파용접 및 마그네슘/철강 이음부에 대한 레이저 브레이징 등이 있다. 마그네슘/철강 레이저 브레이징에서는 철강표면에 다양한 금속을 도금하였으며, 니켈을 도금하고 열처리를 통하여 도금층의 밀착성을 향상시켜 350N/mm의 접합강도를 확보하였다. 또한 본 레이저 브레이징 기술을 자동차 부품 양산에 적용할 수 있도록 wire feeder를 통한 filler의 연속 공급에 의한 레이저 브레이징 기술을 개발하였다.

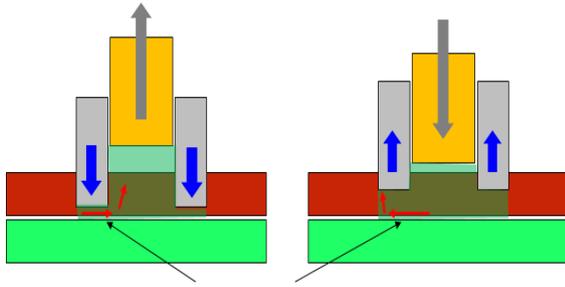


Fig. 16 Concept of friction flow joining technology

한편 경량소재의 이종접합을 위하여 판상의 재료 유동에 의한 “Friction Flow Joining” 기술²²⁾을 개발하였다. 이 기술은 종래의 R-FSSJ(refill friction stir spot joining)²³⁾를 개량한 것으로 Fig. 16의 개념도에 나타낸 것과 같이 용접시 재료의 유동이 하부 판재 표면을 따라 면상으로 유동하면서 청정작용을 하여 이종접합부에 대해서도 접합강도가 크게 증가하였다. AZ31 마그네슘 합금과 A6061 알루미늄합금을 Friction Flow Joining 기술로 접합하여 4kN 이상의 우수한 접합강도를 확보하였다.

3. 결 론

미래형 자동차를 위한 MMI 기술의 동향을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 건강한 지구, 지속가능한 사회를 위하여 배출가스 및 연비 규제는 필수 불가결하다.
- 2) 신규의 배출가스 및 연비규제에 대응하기 위하여는 Multi-material을 적극적으로 활용하여야 한다.
- 3) 알루미늄합금은 Multi-material 상용화를 기본 소재이다.
- 4) Multi-material 상용화를 위해서는 획기적인 이종접합기술의 진보가 선행되어야 한다.
- 5) Multi-material 기술을 확보한 기업 혹은 국가는 global market의 선도자가 될 것으로 전망된다.

References

1. World Population - Total Midyear Population for the World: 1950-2050, *Census.gov*. July (2015), Retrieved March 7 (2016)
2. IPCC, Fifth Assessment Report 2013, <https://www.ipcc.ch/report/ar5>
3. 온실가스종합정보센터, 2015년 국가 온실가스 인벤토리 보고서 (in Korean)
4. 환경부 보도자료, 차기(2016년~2020년) 자동차 평균 온실가스연비 기준(안), (2014.9.5) (in Korean)
5. OECD/IEA, World Energy Outlook (2009)
6. OECD/IEA, Oil market report (2016)
7. World Auto Steel, Future Steel Vehicle, www.worldautosteel.org
8. The Washinton Post, 2011.7.29
9. M. S. Kozdras, Canmet MATERIALS, *Natural Resources Canada*
10. Tim Skszek, Jeff Conklin, Vehma International Matt Zaluzec, David Wagner, Multi-Material Lightweight Vehicles: Mach-II Design, *Ford Motor Co.*, 2014.6.17
11. Renault Press Kit, 2014.9.16.
12. 글로벌윈도우, 변화하는 미국 자동차 산업, 철강 대체재 알루미늄, 2014.3.28 (in Korean)
13. *Automotive News*, 2016.8.1
14. *BMW report*, 2015.1
15. *VW lightweight report*, 2014.10
16. *Nikkei Technology*, 2016.5.26.
17. 3D EM Simulation of a resistance spot welding gun, <https://www.cst.com>
18. CMT: Three letters that stand for the stablest weld process anywhere in the world, <http://www.fronius.com>
19. Laser hybrid welding: Powerful factory floor process, *Industrial Laser Solutions*, 2013.9.4
20. TOX®-Clinching & Sheet Metal Joining, <http://www.tox-us.com>
21. Raul Campilho et al., *International Journal of Adhesion and Adhesives* 37, September 2012, 86-95
22. Mokyoung Lee, Comparison of conventional and re-filled Fssj of Mg/Al dissimilar joint, *Abstract of KWJS*, 61 (2014), 95 (in Korean)
23. US2002-172816 Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding