

자동차용 알루미늄 합금소재

Aluminum Alloy Products for Automobile Use

정 영 훈
Y. H. Chung



정 영 훈
• 1951년 11월생
• 한국과학기술 연구원 금속연
구부
• 금속재료 및 알루미늄 합금

1. 서 론

자동차는 안전하고 안락하며 성능이 좋아야 한다. 소비자는 값싸고, 유지비가 적게 들며, 개성적인 차를 원하고, 생산자는 기술 집약적이고 생산비가 적게 드는 것을 선호한다. 사회적으로 보면 배기가스 공해가 낮고 연비가 높으며, 폐차시 재활용율이 높아서 환경을 오염시키는 폐기물이 적어야 한다. 이런 요건들을 만족시키려면 자동차 무게를 감량하는 것만이 유일한 해결책이다.

역사적으로 경량 자동차는 성능을 향상시키기 위하여 개발되었다. 그러나 오늘날은 자동차의 성능개선과 함께 공해방지 및 에너지 자원의 절약이 경량 자동차 개발의 목표로 발전되었다. 즉, 자동차 경량화의 목표는 단순한 차량무게의 감량이 아니며, 충분히

안전-안락하고, 경제적이면서도, 환경보호 기능을 갖춘 자동차로서 무게를 최소화하는 것이다. 이와 같이 팽범위하고 일견 서로 상충되는 경량화 조건을 충족시키려면 기술적 측면으로나 환경보호 측면으로나 알루미늄 소재를 사용하는 것이 적절한 답이다.

지금까지 발표된 연구결과들을 보면 자동차 부품중 많은 부분의 알루미늄화 대체가 가능성이 입증되고 있다^{1)~4)}. 알루미늄 자동차는 철강제 차에 비하여 무게가 50%정도가 가볍고, 하중에 견디는 강성과 내식성이 우수하며, 신뢰성과 방어적인 안전성이 높다. 또한 소음도 적고, 보수유지가 용이하다. 그러나 알루미늄 차를 실용화 하려면 소재업체로부터 정확한 용도를 가진 최선의 합금소재를 적기에 안정적이고 경쟁력 있는 가격으로 공급받는 것이 중요하다. 최근 자동차 제조업체에서는 알루미늄 소재업체와 함께 알루미늄 자동차 개발을 공동추진하여 상호 보완적인 기술개발과 개발기간 단축에 괄목 할 만한 성과를 거두고 있다^{1) 2)}.

일본에서는 지난 20년간 전 차종에서 대략 20% 정도의 자동차 무게가 감소되었으나 최

근에는 승용차의 고급화에 따른 탑재부품 증가로 경량화 속도가 크게 둔화되었다³⁾. 일본 자동차 업계는 이를 보완하기 위한 차체의 알루미늄화 개발을 적극 추진하여 알루미늄 소재를 사용한 후드와 웬더 및 트렁크 리드의 개발에 이어 현재 도어의 알루미늄화를 연구 중에 있다. 향후 성형성과 용접성이 개선되고 전해부식 문제가 해결되면 그 개발속도에 따라서 알루미늄 차체 개발이 전차종으로 확대될 전망이며, 2000년경에는 전 알루미늄 자동차의 등장이 예견된다⁴⁾.

2. 자동차의 알루미늄화 개발 배경

2.1 연비와 배기가스 규제

자동차의 배기가스 규제는 환경보호가 목적이다. 1990년 개정된 미국의 대기정화법에 따르면 1996년도 승용차 모델은 모두 표 1의 규제한을 지켜야 하며, 다시 2004년도 모델부터는 허용한을 이보다 50% 낮게 설정한 규제기준을 모든 승용차가 만족시켜야 한다⁵⁾.

효율적인 에너지 자원의 활용을 목적으로 시작된 자동차의 연비규제는 해마다 규제수준을 높혀가면서 고연비의 자동차 개발을 유도하고 있다. 미국에서 Corporate Average Fuel Economy(CAFE) 규제가 처음 실시된 1978년에는 승용차의 평균연비가 20mpg 정도였으나 1990년 이후에는 27mpg 수준으로 향상되었다⁷⁾. 그러나 미국에서도 승용차와

표 1 미 연방정부의 승용차 배기가스 규제⁶⁾

| 구 분 | 배기가스 규제(g/mile) | | | |
|------------------|-----------------|-----|-----|------|
| | NMHC | CO | NOx | PM |
| 1990년 개정 규제기준 | 0.25 | 3.4 | 1.0 | 0.08 |

단, NMHC : Non Methane Hydro-carbonate
NOx : 질소 산화물, PM : 입자상 물질

경트럭은 각종 안전장치와 편익부품의 많은 탑재로 80년대 후반부터 연비향상 폭이 낮아졌다. 따라서 연비향상을 더욱 촉진하기 위하여 제안된 규제법안이 1989년 제기된 Bryan법안이다. 이 법안에서는 1988년도의 연비실적을 기준으로 1995년에는 20%, 2001년에는 40%로 연비를 향상시킬 것을 요구하고 있다⁶⁾.

자동차 업계에서는 엄격한 배기가스 규제로 완전연소를 위한 부대설비의 탑재가 필요하고, 연비향상을 위하여는 자동차의 무게를 줄여야 하기 때문에 자연스럽게 다양한 경량 소재를 사용한 자동차를 폭 넓게 연구하게 되었다. 미국의 자동차 업계와 소재업계는 미국 정부기관과 컨소시엄을 구성하여 2000년까지 50mpg(mile/gallon)의 연비를, 다시 2010년 이후의 차세대 자동차는 현재 세대급의 기능과 탑재면적을 유지하면서 80mpg급의 연비를 가질 것을 목표로 설정하였다¹⁾. 미국의 자동차 업계에 의하면 이와 같은 고연비 자동차의 개발은 차체무게를 현재보다 40~50% 줄이고, 탑재부품 무게를 30% 가량 가볍게 하며, 주행중 공기저항을 0.3에서 0.2로 40% 경감시키고, 타이어의 마찰저항을 현재보다 40% 적게하면 실현 가능할 것으로 추정하고 있다.

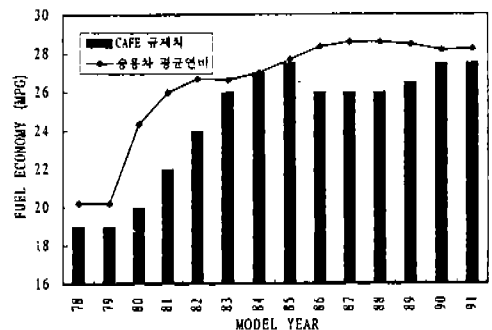


그림 1 CAFE규제에 의한 연비기준과 승용차의 평균연비 변화⁷⁾

2.2 환경과 안전성 인자

Aluminum Association에서 검토한 바에 따르면 현 기술로도 알루미늄 소재의 사용량을 높이면 자동차 크기와 안전도는 전과 같이 유지한 상태에서 무게를 25% 가량 감소시킬 수 있다고 한다. 그러면 연비는 20% 정도 향상되고 유해 배기가스의 방출량을 20% 감소시킬 수 있다. 1991년 미국에서 판매되고 있는 모든 자동차를 이 기준으로 경량화하면 폐차할 때까지 18,300만 바렐의 연료가 절약되고 탄산가스 방출량이 6,500만톤 이상 적어진다⁸⁾.

알루미늄 자동차 구조물은 철강재보다 50% 정도 두껍기 때문에 충돌시 결정적으로 안정성이 높아진다. 두께와 강도의 상호관계를 보면 충돌사고에서 알루미늄 구조물은 절반의 무게로 철강재와 같은 안전도를 보인다. 이와 같이 알루미늄 자동차의 충돌시 충격흡수의 우수성은 차체가 가벼워짐에 따른 정지 및 운행조작의 용이성도 함께 작용하여 운전자의 안전도를 크게 높여준다.

한편 폐기물 매립에 관한 Environmental Protection Agency(EPA) 규제는 자동차 제조자와 수요자 모두에게 차량폐기 단계에서 심각한 문제를 던져준다. 자동차는 설계 단계부터 재사용을 고려하여 분해공정을 예상하고 제조되어야 하며, 비독성의 재생가능 소재를 사용해야 할 필요가 있다. 알루미늄의 재생성은 알루미늄 소재의 사용을 자연스럽게 해준다. 자동차에서 나오는 폐 알루미늄 소재는 85% 이상이 재활용 가능하며, 폐 알루미늄을 재활용할 때에는 원광석 채련에 드는 에너지의 95%를 절약할 수 있다⁹⁾.

2.3 경량화 소재의 선택

자동차는 구동부분과 차체부분 및 부속부품으로 대별할 수 있다. 구동부분과 차체부

분은 기능과 설계 및 생산공정이 모두 다르기 때문에 경량화를 위하여 사용되는 소재의 선택기준도 다르다. 구동부분의 부품에는 그 기능과 용도에 따라서 많은 부분이 알루미늄화 되었으며 앞으로 더욱 많은 부품이 알루미늄 소재로 대체될 전망이다.

차체는 승용차의 경우 강재로 만들면 320kg~360kg 정도의 무게가 되며 알루미늄 업계와 강화 플라스틱 업계에서 모두 경량화 대체에 관심이 높은 부분이다. 강화 플라스틱 소재는 성형성이 좋고 무게감량 효과가 뛰어난 장점이 있지만 가격이 비싸고 폐기물 처리가 곤란해서 대량 활용에는 한계가 있다. 한편 알루미늄 소재를 보면 경쟁소재인 기존의 강재에 비하여 원소재 가격이 비싸서 아직도 자동차 차체에의 본격적인 활용에 어려움이 있다. 그러나 장기적으로 return scrap 등을 사용하여 원소재를 제조하면 제조단가를 낮출 수 있는 가능성이 있고, 강화 플라스틱 등을 사용할 경우 우려되는 폐기물 처리비용이 거의 들지 않으며, 사용수명이 끝난 후에도 재활용성이 높아서 선진국에서는 차체 알루미늄화를 심도있게 추진하고 있다.

2.4 지금까지 알루미늄 합금 소재의 사용 경과

지금까지 미국에서 알루미늄 소재가 자동차에 사용된 역사를 살펴보면 1960년대 중반까지는 부속 부품으로 사용된 알루미늄 소재가 주종을 이루어 32kg/대 정도의 미미한 수준이었다. 1970년대 후반의 에너지 파동이후 알루미늄은 사용량이 꾸준히 증가하여 1990년에는 평균 사용량이 68kg~77kg/대 정도의 수준까지 증가하였다. 이와 같은 사용량 증가는 2000년 이후까지 이어질 것으로 보이지만 그 증가 폭에 대하여는 113kg/

대로 부터 272kg/대 까지 작지 않은 이견이 있다⁸⁾. 증가량을 113kg/대 수준으로 보는 견해는 알루미늄 가격이 극적으로 낮아지기 어려워서 적용 부품의 포화가 곧 일어나게 된다고 예상한 것이다. 한편 272kg/대까지 큰폭의 증가는 환경보호와 연비향상을 위한 규제가 더욱 심각해지고 제조기술은 급속히 발전하여 전 알루미늄 자동차가 일반화 되는 경우를 상정한 예상 값이다. 현 시점에서 알루미늄 소재의 평균 사용량은 차량무게의 6% 정도로 113kg/대의 수준이다⁹⁾. 따라서 2010년 까지 알루미늄 소재의 예상 사용량을 150kg/대 ~ 200kg/대 수준으로 보는 견해도 있다. 한편 지금까지 자동차에 사용된 알루미늄 소재를 제조공정별로 분석해 보면 그림 2에 보이는 바와 같이 주조재가 주종이며 알루미늄 사용량의 거의 95%를 차지하고 있다¹⁰⁾. 그러나 앞으로는 주조재와 함께 구조부에 활용하기 위한 가공재의 사용이 큰 폭으로 늘어날 전망이다.

2.5 알루미늄 판재성형 기술

알루미늄 판재를 성형할 때는 결함발생을 억제하는 것이 가장 중요하며, 재료특성, 공구설계, 성형조건 및 윤활성에 따라 성형결과가 좌우된다. 성형가공은 크게 보면 deep

drawing, stretching 및 bending의 형태로 나눌 수 있으나 일반적으로 자동차 부품은 복합적인 가공으로 제조된다.

알루미늄 소재는 강재에 비하여 재질 이방성이 크고 신율이 낮아서 deep drawing형 가공을 가하면 코너부분에 주름이 잘 잡힌다. 따라서 알루미늄 소재의 성형에는 코너부의 예각을 피한 알루미늄용 금형의 전문적인 설계가 필요하다. 또한 알루미늄 소재는 탄성계수가 낮아서(강재의 1/3수준) 성형가공 후 탄성반발과 휨이 크게 나타난다. 따라서 2차교정으로 2% 이상의 변형이 가해져야 탄성반발에 의한 치수오차를 극복할 수 있다³⁾.

고용경화형 합금인 Al-Mg계 5181합금은 성형성이 좋아서 자동차에 많이 쓰이나 Lüder band와 stretcher strain 발생으로 가공면이 거칠고, 가공경화가 급격히 일어나서 내장부품에만 주로 쓰인다¹¹⁾. 비열처리형 합금으로 0.3%Cu와 1%Zr이 첨가된 Al-Mg계 합금과 시효경화형 합금인 Al-Cu계와 Al-Mg-Si계 합금은 외장재로 쓰인다. 이 합금들의 성형결과를 보면 Lüder band는 나타나지 않으나 stretcher strain은 나타난다. 조질압연 도는 롤 레벨링 등으로 소량의 냉간가공을 가하면 stretcher strain의 발생도 해결할 수 있지만 성형성이 저하된다¹¹⁾.

6016합금은 자동차 차체용 판재에 적절한 재질특성과 성형성 및 내식성을 갖고 있다¹¹⁾. 특히 압연표면에 적당한 무늬를 만들어주면 성형성이 크게 개선된다. 그러나 이와 같이 표면무늬는 윤활제를 많이 잔류시켜서 도장공정에서 문제를 유발하기도 한다. 최근 압연롤에 적당한 무늬를 만드는 방법으로 isomill, laser texturing, EDT(electro discharge texturing) 및 슛-피닝 등 다양한 방식이 개발되고 있다¹¹⁾. 특히 알루미늄 판재의 어떤 표면상태가 윤활 도장 및 성형성에 최적인지는

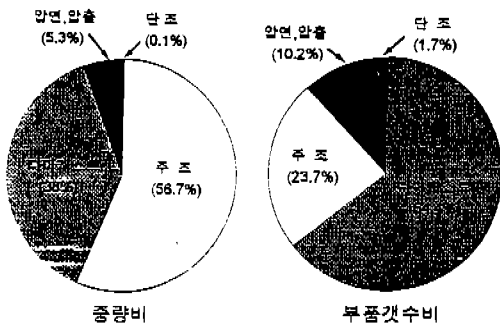


그림 2 자동차에 사용되는 알루미늄 소재의 종류별 중량 비율

알려져 있지 않아서 이 분야에 대한 연구가 많이 필요하다.

한편 재료의 고유특성인 m (strain rate sensitivity)값과 n (strain hardening coefficient)값이 성형성에 미치는 영향에 관하여도 많은 연구가 필요하다. 대부분의 알루미늄 합금은 상온가공이 적당치 않다. 상온은 가공경화 속도가 지연되기에는 너무 온도가 높고, m 값이 커져서 necking발생을 저지하기에는 너무 온도가 낮기 때문이다. 따라서 알루미늄 합금은 대부분 necking발생을 막을 수 있는 온간 또는 열간성형으로 가공한다. 비열처리계 Al-Mg계 합금의 경우 적절한 성형온도는 $250^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$ 이다¹¹⁾. 이 합금계는 가공경화 효과를 얻어야 하므로 성형 가공은 가능한한 최저온도에서 해야 한다. 그러나 동적회복이 잘 일어나는 낮은 온도에서 가공속도를 빨리하면 성형성이 나쁘다.

열처리형 합금에서는 성형과 용체화처리를 함께 할 수 있는 가능성이 연구되고 있다. 그러나 성형온도의 상한은 cavitation발생으로 제한되어 적용 가능한 온도범위에 제약이 있다. 최근에는 복합성형 기술이 소개되어 초소성 성형과 냉간성형의 조합 또는 냉간성형 후에 국부적인 초소성 가공의 적절한 적용을 시도하는 연구도 활발하다.

2.6 알루미늄 소재의 접합성

자동차의 내장재와 외장재를 접합하는데는 hem franging과 점용접이 가장 널리 쓰인다. 최근 개발된 알루미늄 소재는 합금에 따라서 두께의 0.3~1.0배 이내의 반경까지 hem franging접합이 가능하며, 접합결과도 신뢰할만 하다¹²⁾. 그러나 180° 변형이 필요한 hemming sector는 가공이 불가능해서 Roped hem이 필요하다. 기계적 접합은 특히 보이지 않는 부분에 적용되며, 정하중에 대

하여는 점용접한 소재의 50%~80% 수준, 동하중에 대하여는 점용접한 소재와 비슷한 수준의 접합강도를 보이고 있다¹³⁾. 한편 접착과 기계적 접합을 동시에 사용하면 거의 리벳팅 결과에 비견되는 접합강도를 갖는다. 기계적 접합은 생산단가가 싸고 시설비, 공구수명, 생산속도에서 점용접에 비하여 훨씬 유리하기 때문에 매력이 있다. 한편 점용접으로 Mg함량이 높은 합금을 용접하려면 소재표면의 청결유지가 중요하다¹³⁾. 특히 알루미늄 합금의 점용접에서 경제성을 높히려면 알루미늄 pickup을 막아서 전극봉 수명을 연장하고, 연속작업시 균일한 용접결과를 보장할 수 있는 용접장치와 기술 및 소재개발이 필요하다.

3. 자동차용 알루미늄 소재의 사용현황과 전망

3.1 자동차 구동부품의 알루미늄화 개발

구동부품의 알루미늄화는 엔진부품중 무게가 가장 무거운 엔진블럭과 경량화 효과가 큰 밸브계통을 중심으로 부품개발이 이루어졌다. 지금까지 엔진에는 많은 알루미늄 소재가 사용되어 왔고 더 많은 알루미늄 소재가 사용될 전망이다. 실린더 블럭과 오일팬에 알루미늄 소재를 쓰면 대단한 무게 감량과 함께 동력전달계의 강성이 개선되어 소음이 줄어든다. 엔진헤드와 실린더 블럭에 대하여는 혼다사의 엔진블럭, 포드사의 모듈러 엔진, 클라이슬러사의 V-10엔진, GM사의 Northstar와 Saturn엔진 등의 선행개발이 많이 이루어졌다. 2000년까지 미국내 생산되는 엔진의 25%가 알루미늄 합금계 엔진블럭으로 바뀔 전망이며 대형엔진부터 순차적인 대체가 예상된다⁸⁾.

자동차 엔진을 알루미늄화 하려면 설계,

생산공정, 재료선택의 세가지 인자가 중요하다. 설계측면에서 보면 sleeve와 실린더 보어에 대한 선택과 open 또는 closed deck의 설계 등이 중요한 인자이다. 생산공정 측면에서 보면 지금까지 거의 모든 주조공정(고압주조, Squeeze casting, Verticast 등)이 알루미늄 블럭제조에 사용되고 있어서 제조공정은 제한요소가 되지않으며, 실린더 bore liner의 삽입방식과 결합조건을 선택하는 정도가 공정상 고려 사항이다.

한편 엔진블럭용 소재로는 경금속 복합재와 주조용 알루미늄 합금재 사이의 선택이 가능하지만 소재 가격면에서 주조용 알루미늄 재가 훨씬 유리하다. 주조용 알루미늄 합금재는 가볍고, 내마모성이 좋으며 수명도 철강재보다 길다. 특히 최근에는 liner설치에 금속결합으로 주변소재와 liner사이의 견고한 결합을 이룰 수 있는 주조기술이 개발되어 제조비 절감과 무게감량 및 엔진성능 개선에 공정 선택의 폭이 넓어졌다⁸⁾. 일반적으로 알루미늄 실린더 블럭에는 실린더 bore가 마모되는 것을 방지하기 위하여 주철 슬리브가 함께 쓰인다. 그러나 알루미늄계 슬리브를 쓰면 절삭가공 비용이 싸고, 무게도 가벼워서 연비개선과 엔진성능 향상에 유리하다.

엔진 구동부의 무게를 감소시키면 연비향상에 더욱 효과적이다. 밸브 리프터의 core는 고강도 내마모 알루미늄 합금 단조재로 만들 수 있다. 실린더 헤드와 마찰되는 바깥쪽을 철계합금으로 내마모 coating하여 만든 알루미늄계 부품은 기존의 철계보다 40% 이상 가볍다. 밸브 리프터가 가벼워지면 밸브의 스프링 부하와 마찰력이 줄어서 거의 1% 정도의 연료비 절감을 가져올 수 있다¹⁰⁾. 엔진 부품중 rocker arms, 피스톤, 오일팬, 엔진커버, 에어 클리너 커버, intake manifold, 각종 펌프와 변속기 부품 및 케이스와 엔진

지지부 부품 등에 알루미늄 소재가 쓰이고 있다.

3.2 자동차 차체의 알루미늄화 개발

자동차 차체는 크기와 중량면에서 경량화 대체에 매력력이 있다. 기존 자동차에서는 많은 철강 부품을 용접하여 차체를 만들며, 이 부분의 무게가 320kg~360kg이다. 자동차의 강성은 성형 조립된 차체가 대부분 지지하기 때문에 차체를 스탬핑된 철구조물의 집합체라고 부른다. 알루미늄 업계와 강화플라스틱 업계는 모두 차체 소재에 관심을 갖고 있다. 소재기술과 성형기술의 급속한 발전으로 알루미늄 업계는 새로운 자동차 차체개발에 적극적이다. 알루미늄 차는 무게감소와 함께 승차감이 뛰어나고 구조강성이 높다. 또한 소음, 진동, 거칠기 특성은 알루미늄 차가 가장 우수하며, 특히 충격흡수 능력이 뛰어나서 운전자의 안전도가 높다.

1980년대부터 시작된 알루미늄 차에 대한 대대적인 연구로 승용차의 무게는 150kg이상 감소되었으며, 전 알루미늄 자동차의 제조가 가능해 졌다. 구미과 일본에서는 수년 전부터 CAFE규정을 충족시키기 위하여 알루미늄 소재를 사용한 여러가지 자동차 모델을 연구하여 새로운 모델로 제작한 Acura NSX 스포츠카, Audi A8, Jaguar XJ220 등이 개발되었다. 포드사에서는 시험용으로 Taurus/Sable를 변형시켜 40가지의 알루미늄 소재를 사용한 차종을 개발하였고, GM사에서는 알루미늄 구조 전기자동차를 발표하였다¹¹⁾. 새로운 모델의 자동차에 사용된 알루미늄 소재의 사용량과 제조공정상의 특징을 표 2에 정리하였다. 여러 새로운 자동차 모델에는 서로 다른 기술이 사용되고 있으며, 사용한 알루미늄 합금 종류와 형태가 모두 다르다. 이는 자동차를 알루미늄화하는데 적

표 2 새로운 알루미늄 차체 모델 개발에 사용된 알루미늄 소재

| | Acura NSX | Audi A8 | Ford AIV | 대륙횡단 경주차 | GM impact car |
|----------|---|---|--|---|--|
| 알루미늄 사용량 | 차체에 210kg | 차체에 224kg | 차체에 198kg | 차체에 157.7kg | 차체에 134kg |
| 주 사용 소재 | 판재, 압출재 | 판재, 압출재 | 판재 | 압출 튜브재 | 압출품, 주조품 |
| 차체무게 감량비 | 40% | 37% | 46% | 20% | — |
| 특징과 장점 | 1. 자동차의 모든 부품을 최대한으로 알루미늄화 (총 427kg 사용) 2. 2차 경량화 효과는 고려치 않음 3. MIG 용접과 점용접법 사용 | 1. 용융용접과 커플링 유닛 사용 2. 내외부 패널을 모두 스탬핑 소재로 사용함 | 1. 내외장재 접합에 점용접과 접착접합법을 동시에 사용함 2. 현가장치는 무게감소량을 고려하여 작게 설계함 | 1. 차체 구조부를 압출재 튜브로 만듦 2. 스포크 카로 안전도가 중요함 | 1. 소량 생산에 적합함 2. 전기 자동차 모델로 구조부 중량을 최소화 함 |

용할 수 있는 설계와 공정기술의 가용범위가 넓음을 보여준다.

혼다사의 Acura NSX는 5000개 알루미늄 합금 판재와 알루미늄 합금 패널 및 6000개 알루미늄 합금 압출재를 사용하여 일체형 구조로 만든 차이다. 부품은 MIG와 점용접으로 접합시켰다. 알루미늄 부품을 외장재, 패널, 여러가지 엔진부품, 현가장치 부품 및 구동부 부품에 써서 강재를 쓸 경우에 비하여 차체무게를 40%(135kg) 이상 줄였다. 이 모델에서는 부품을 기존방식으로 결합했기 때문에 2차적인 무게절감 효과까지 고려하면 대단한 무게감량 수준이다.

Jaguar XJ220은 전 알루미늄 구조부와 스킨재를 사용하여 한정 생산한 슈퍼카이다. 알루미늄 판재와 하니컴 샌드위치 패널로 대부분의 구조부를 만들었다. 전방의 충격흡수대는 Al-Mg합금 판재로 Alcan사에서 개발한 접착제와 리벳을 써서 만들었다. 이 충격흡수대는 충격에 잘 견디고 쉽게 교체할 수

있음이 입증되었다.

Audi A8은 Alcoa사의 알루미늄 가공기술을 기초로 개발한 알루미늄 공간 골조(space frame)를 사용한 자동차이다. 이 차에서는 성형한 알루미늄 압출재를 용융용접과 고연성 알루미늄 주물로 만든 coupling을 써서 조립하였다. 골조는 알루미늄 패널을 써서 완성시켰고, 여닫이 부분은 스탬핑한 알루미늄 판재로 만들었다. 압출 금형은 스탬핑 금형보다 값이 싸기 때문에 생산량이 100,000대/년 이하로 적을 때에는 압출재를 많이 쓴 이 설계가 매력이 있다. 또한 압출재를 사용하면 스탬핑 소재의 조립에서 필요한 2~3단계의 공정을 한 번으로 줄일 수 있다.

포드사에서 Taurus/Sable을 기반으로 설계한 40종의 알루미늄 자동차들은 Alcan에서 개발한 용접법으로 스탬핑 판재를 조립한 일체형 설계로 되어있다. 접착법과 점용접법을 함께 적용하여 소재 두께와 무게는 줄이고 차체의 강성과 내피로 특성을 향상시켰

다. Body in white 상태로 강재차량에 비하여 무게를 170kg 줄여서 47%의 무게감소를 실현시켰다.

GM사의 전기자동차 EV1등은 재충전 거리를 길게 하기 위하여 약 450kg의 무거운 배터리를 장착해야 하므로 다른 부품의 무게는 줄여야 한다. 당연히 알루미늄 소재가 가장 생산비가 적게드는 선택이 될 수 밖에 없다. 최근 발표된 GM사의 EV1도 Alcan사의 AVT 용접 접합방식을 채택했으며, 알루미늄 판재를 주조재와 압출재에 접합시켰다. 이 방법은 생산량이 적은 차종에 적합하며, 무게감량에 아주 효과적이다.

클라이슬러사에서 제작한 Neon Lite는 기존 차종인 Neon의 구조와 크기 및 성능을 유지하면서 알루미늄 일체형 구조로 개발한 모델이다. 알루미늄 엔진블럭과 다른 구성부품을 알루미늄 또는 마그네슘 합금으로 제작하여 1,200kg 정도의 표준중량에서 318kg의 무게감소를 이루었다²⁾. 주로 열처리형 AA6111 알루미늄 합금을 사용했으며 도장처리 과정에서 시효경화 효과를 얻을 수 있었다. 구조물은 점용접, 리벳 또는 용융 용접법으로 조립했으며 용융 용접법이 가장 우수한 결과를 보였다.

레이놀드사가 지원하여 제작한 미국 스포츠 카 클럽의 대륙횡단 경주차는 튜브형 공간골조를 가진 모델이다. 사용 부위별로 압출 튜브재의 형상과 두께를 달리하고, 모서리 부위를 보강함으로써 철강재 차보다 구조강성이 2.5% 개선되었다. 공간 골조부의 중량은 알루미늄 압출재를 사용함으로써 157.7kg이 되어 철강재를 사용한 경우보다 약 20%의 중량감소가 이루어졌다²⁾.

르노(Renault)와 하이드로 알루미늄사 등 여러분야의 소재업체가 공동으로 추진한 유럽의 모자이크 계획에서는 Renault Clio를

기초한 중형세단과 소형세단에서 차체구조부의 가능한 중량절감 범위와 이에 따른 효과를 연구하였다. 중량절감 효과는 복합재 내장패널과 알루미늄 공간골조를 사용한 것이 25%의 무게절감을 이루어 가장 우수했다. 이 연구에서는 공간골조에 압출재를 사용하고 부품은 용융 용접하는 방법을 택하고 있다²⁾.

한편 이와같은 전체적인 알루미늄 설계개발과 병행하여 여러 가지 차체부품의 알루미늄화는 더욱 폭넓게 이루어졌다. 세계적인 알루미늄 업체들은 자동차 업체와 공동으로 자동차 생산에 적합한 합금과 제조공정을 개발하고, 향후 실용화에 대비하여 열처리형 합금과 비열처리형 합금의 장단점을 평가하였다. 지금까지 비열처리형 합금은 성형성과 내식성이 좋지만 강도가 낮고 표면에 lüder line이 나타나서 외장재료의 사용이 기피되어 왔다. 한편 Al-Cu계 또는 Al-Mg-Si계의 열처리형 소재는 T4상태에서 어느정도의 성형성이 있으며, 페인트 베이킹 공정에서 강도가 높아져 내외장재로 사용된다⁸⁾.

최근에는 합금을 개량하거나 laser textured roll을 사용한 표면특성 개선으로 판재 성형성을 높이는 연구가 심도있게 추진되었다. 또한 dent저항을 높이고, 점용접성을 개선하며, 내식성과 도장성을 향상시키려는 연구가 심도있게 추진되어 많은 성과를 거두고 있다.

3.3 기타 여러 가지 부속부품의 알루미늄화 개발

1) 현가 장치(front suspension member) 과 엔진 mounting bracket¹⁴⁾

차체와 마찬가지로 전방 현가장치는 스태มป์핑 용접용 강재로 만든다. 이 부품에 알루미늄 합금을 쓰면 강성이 높아서 무게감소와

함께 소음이 줄어든다. A356-T6 주조재는 후방 현가스프링의 지지부를 만드는데 사용된다. 강도와 신율이 6061-T6 단조재와 유사하고 피로특성이 우수하며 제조비가 훨씬 낮아졌다. 더욱이 알루미늄 주조품은 운전시 안정감과 안락감을 더해준다. 비슷한 효과가 엔진 bracket에 적용할 때도 얻어질 수 있다.

2) 알루미늄 범퍼 강화재¹⁴⁾

알루미늄 압출재로 그림 3과 같이 범퍼 강화재를 만들면 무게감소와 함께 강성이 향상된다. 기존강재와 비교하면 범퍼 보강부의 예각 모서리와 내부 rib은 압출재로 쉽게 만들 수 있다. 알루미늄 압출재는 좌석의 골격과 좌석이동 레일에 쓰인다.

3) 알루미늄 운전대 골조¹⁴⁾

오늘날 에어백은 운전자의 안전을 위하여 널리 쓰인다. 에어백 채용에 따른 무게증가를 상쇄하고 떨림을 방지하기 위하여 그림 4와 같이 알루미늄 튜브와 다이 캐스팅한 중심축 연결부가 쓰인다.

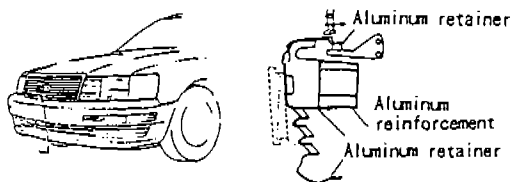


그림 3 알루미늄 범퍼 강화재

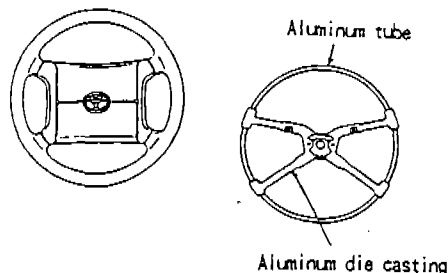


그림 4 알루미늄 운전대 골조 모양

4) Differential carrier⁹⁾

Amcast사에서는 주철재인 포드사 신형 F-series 픽업트럭(1996)의 differential carrier를 알루미늄 주조재로 대체 개발하였다. 원래 무게 18kg이고 진동과 소음이 심한 주철 부품을 중력주조법을 쓴 알루미늄 주조재로 9kg으로 감소시켰다. 현재 콘트롤 arm, 브레이크 캘리퍼 등도 알루미늄화가 이루어졌다¹⁵⁾.

5) 휠⁸⁾

휠에는 알루미늄 가공재와 주조재가 현재 기본부품 또는 선택사양으로 사용되고 있으며 세계적으로 100개가 넘는 생산업체가 있다. 휠의 경우는 외관이 우선 중요하며, 다음으로 무게와 가격이 중요하다. 가장 인기가 있는 것은 one piece형의 저압주조품이나 현재 스퀴즈 주조나 진공주조법 등 다양한 공정들이 연구되고 있다. 일부 주조재와 가공재가 함께 쓰인 조립형도 사용되고 있다. 대부분의 휠 제조기술은 알루미늄업체와 휠 전문업체에서 개발개선되고 있다. 현재 추진되고 있는 연구는 합금개선으로 피로강도를 높히거나, 공정개선으로 가공성과 저주기 피로특성을 개선하는 연구가 이루어지고 있다. 또한 컴퓨터 컨트롤 되는 flow forming으로 A356합금을 사용한 주조품의 rim부위를 가공하여 무게를 10% 줄이면서 형상변화의 유연성을 그대로 가지고 leak율을 개선한 공정이 연구되고 있다.

6) 열교환기와 기후조절 장치(히터와 에어컨디션)⁸⁾

알루미늄 열교환기는 구리에 비하여 가볍고 값싸고 열교환 능력이 개선되는 장점이 있다. 포드사는 이 분야의 선구자이며, GM사는 1997년까지 북미에서 사용되는 승용차와 경트럭의 라디에이터를 현재의 60%수준에서 전량 알루미늄제 부품으로 대체할 예정

이다. 특히 CFC냉매를 대체한 신냉매를 사용하는 에어컨디션에서는 높은 열교환 능력이 요구되어 미세 정밀형 튜브재의 개발이 필요하다. 현재 국내에서도 열교환기용 Zn clad형재 및 미세정밀 튜브 압출재가 개발되어 실용화 되었다.

4. 향후 자동차용 알루미늄 소재의 기술적인 미해결 과제

대량생산 기술로 차체 부품을 알루미늄화 하는데 필요한 사항을 표 3에 정리하였다^{2), 3)}. 자동차 차체에 알루미늄 소재가 대량으로 사용하려면 용접부 또는 접합부의 신뢰성이 높아져야 하며, 값싼 성형공정과 접합기술이 개발되어야 한다. 단조재의 경우, 일부는

표 3 알루미늄 차체의 대량생산을 위한 필요 사항^{2), 3)}

| 항목 | 필요사항 |
|--------------|--|
| 소재개발 | 1. 고성형성 소재개발(가공경화형 합금) 2. 고 bake hardening 소재개발 (열처리형 합금) 3. 가격 경쟁력이 있는 소재 및 가공기술 개발 |
| 성형가공 기술 | 1. 알루미늄용 금형설계 2. 적정 성형조건 개발 |
| 조립 접합기술 | 1. 스팟용접의 연속작업성 향상 2. 기계적 접합성 개선 3. 이종금속 접합 및 전해부식 방지 기술 개발 |
| 표면처리 및 도장 기술 | 1. 이종금속 속의 동시 화성처리기술개발 2. 알루미늄 판재의 내사청성 향상 대책 |
| 기 타 | 1. 차체 설계 및 생산공정 적정화 개발 2. 접합부 설계 및 적정 접합기술 개발 |

press forming과 단조로 만들어야 하며, 제조단가를 낮추기 위한 공정기술이 개발되어야 한다. 단조재에 견줄 수 있는 고급 주조품을 만드는 주조기술이 개발되면 값싼 주조품으로 단조재를 대체할 수 있다. 새로운 대체재료에 대한 경제성은 원소재 가격과 함께 생산비용을 생산규모에 따라 평가해야 한다. MIT의 Materials Systems Lab.에서는 갈바닉 스틸을 외장과 내장재에 사용하는 것을 기 준하여 Ford Taurus의 후드를 연간 500,000 개 생산할 때의 가격을 소재별로 비교하였다 (그림 5 참조). 이 분석 결과에 따르면 갈바닉 스틸은 가격이 \$0.7/kg인 반면에 알루미늄은 \$4.00/kg이다⁴⁾. 알루미늄은 가볍고, 재생성이 있지만 경량화 효과만으로 철강재를 대체하기에는 가격이 너무 비싸다. 철강재, 플라스틱 등 다른 경쟁소재와 비교한 경량성 이외의 결정적인 장점이 있어야 가격이 비싼 약점을 보완할 수 있다.

자동차에 사용되는 패널 소재의 두께는 표 4에 소개하는 바와 같이 소재의 강성, dent 저항성, Member rigidity, 피로강도 및 충격 강도에 의해서 결정된다³⁾. 소재 두께를 결정하는 인자는 소재의 사용부위에 따라서 그 중요도가 다르다. 외판재는 강성과 dent저항성 및 충격강도에 의해서 소재두께가 결정되

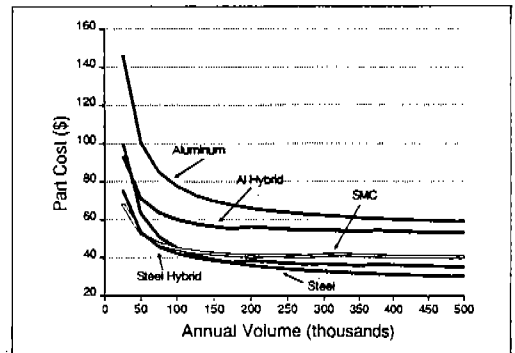


그림 5 소재별 자동차 후드의 제조비용 비교⁴⁾

표 4 자동차 패널소재의 두께를 결정하는 인자³⁾

| 특성 부품 | 차체 패널두께를 지배하는 인자 | | | | | 부품 예 |
|--------------|---|--|--|--------------------------------|--|--|
| | 패널 강성 | Dent 저항성 | Member 강성 | 피로 강도 | 충격 강도 | |
| 외장재 | ◎ | ○ | | △ | ○ | Hood outer Door outer Trunk Lid outer |
| 내장재 | ◎ | △ | ○ | ○ | ○ | Floor, Dash, Hoodledge |
| 구조재 | A | | ◎ | ○ | ○ | Body side member Cross member Cowl box |
| | B | | ○ | ◎ | ○ | Side member Differential mount member |
| | C | | ○ | ○ | ◎ | Door guard bar Sidel member 좌석강화 벨트 |
| 이론적인 상관관계 | $S \propto E \cdot t^m$ $P_b \propto E \cdot t^3$ $f_p = t \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | $P_d \propto \sigma_{ys} \cdot t^2$ $E_d = \frac{\sigma_{ys}^2 \cdot t^4}{S}$ | $K_b \propto E \cdot t$ $f_b = t \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | $\sigma_d \propto \sigma_{TS}$ | $P_c \propto t^{1.85} \cdot \sigma_{ys}^{0.575}$ | |

단, ◎표는 가장 강한 지배인자. ○표는 강한 지배인자. △표는 약한 지배인자를 표시함.

부분구분 중 A는 강성이 주로 지배하는 부품,

B는 파단까지의 기간(endurance)이 주로 지배하는 부품,

C는 강도가 주를 지배하는 부품을 표시함.

수식중 S : Stiffness(강성), σ_{ys} : 페인트된 패널의 항복강도, E : 탄성계수, t : 패널두께,

E_d : Dent저항 에너지, K_b : 부품의 굽힘강성, m : 패널 형상계수(1~3값), σ_s : 피로강도,

f_p : 부품 자연 진동수, P_b : 탄성 bucking 하중, σ_{TS} : 인장강도, ρ : 밀도,

P_c : 정적인 파단하중, P_d : 동적인 파단하중 임.

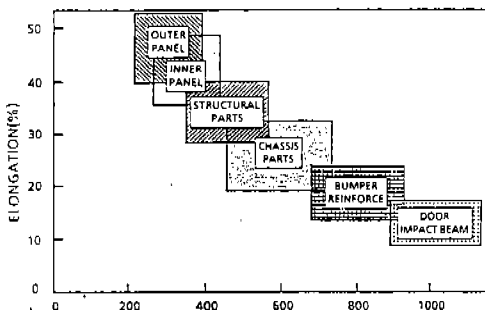


그림 6 자동차에 쓰이는 강재의 사용부위별 강도와 신율³⁾

며, 구조부에 쓰이는 소재는 member rigidity와 피로강도, 및 충격강도가 중요하다. 따라서 자동차용 알루미늄 소재를 개발할 때에는 두께를 줄이기 위하여 가중치가 높은 인자를 고려해야 한다. 한편 그림 6은 자동차 부위별로 소재가 가져야 할 강도와 신율특성의 수준을 보여준다³⁾. 외피소재의 경우 성형성이 좋아야 하므로 상대적으로 신율이 높은 소재가 필요하다. 그러나 범퍼 강화재나 자동차 문의 충격 완충대 등은 충격시 심한 변

표 5 알루미늄 합금의 자동차 적용 분야^{(7), (15)}

| 부품명 | 제조공정 | 사용합금 | 경량화율(%) | 경쟁소재 |
|--------------------------|------------|------------------|---------|---------------|
| (엔진 및 구동 부품류) | | | | |
| * 엔진 블럭 | 금형주조, 저압주조 | ADC12, 4C, A390 | 30 | 주철, Mg합금 |
| 오일 팬 | | - | 20 | Mg합금, Plastic |
| Intake 밸브 | | - | 60 | Ti합금, 세라믹 |
| * Pulley | 냉간단조 | 2017 | 50 | MMC, 플라스틱 |
| * Connecting rod | 열간단조 | 6061 | 50 | P/M합금, MMC |
| * Valve liter | 냉간단조 | 4XXX | 50 | Ti합금 |
| * Engin Support Bracket | 용탕단조 | 4CH | 50 | Mg합금 |
| * Oil Pump Housing | 주조단조 | 1B | 60 | - |
| Front Clutch Reainer | | | 60 | Mg합금 |
| Reaction Shaft Supporter | | | 60 | - |
| * 트랜스미션 케이스 | 금형주조 | ADC12 | - | Mg합금 |
| * 실린더 헤드 커버 | 금형주조 | ADC12 | - | 플라스틱 |
| * 콤프레서 하우징 | 진공금형주조 | ADC12 | - | |
| * 피스톤 | 중력주조 | 8A, 8B, 8C | - | MMC |
| * Intake manifold | 저압주조 | 2B | - | 플라스틱 |
| * 휠 | 주조, 열간단조 | 4CH, 6061 | - | Mg합금 |
| (샷시 부품류) | | | | |
| Pedal 류 | | | 30 | Mg합금 |
| * Steering Wheel | | - | 15 | Mg합금, 고력강 |
| * Upper Arm | 용탕단조 | 4CH | 40 | Mg합금 |
| * Knuckle | 용탕단조 | 4CH | 50 | - |
| * Brake Caliper | 용탕단조 | 4CH | 30 | MMC |
| * Hub | 열간단조 | 6061 | 30 | MMC |
| * Lower Arm | 열간단조 | 6061 | 40 | - |
| Brake Drum | | | 40 | 고력강 |
| * Differential Case | 중력주조 | 2A, 2B, 4B | 60 | Mg합금 |
| * Suspension member | 저압주조 | 4CH | - | - |
| * ABS housing | 용탕단조, 주조단조 | 4CH, 1B | - | - |
| * 에어컨 콘덴서 튜브 | 압출 | 1050, 3003, 4343 | - | - |
| | | 7N01 | - | - |
| * Radiater 부품 | 압연 | 3003, 4045, 4343 | - | - |
| | | 7072 | - | - |
| (차체 부품류) | | | | |
| * Hood | 압연 | 5182, 5052, 6xxx | 45 | Plastic |
| * Trunk Lid | 압연 | 5182, 5052, 6xxx | 50 | Plastic |
| Door | | | 40 | Plastic |
| * Body Sheet | 압연 | 5052, 6xxx | 50 | Plastic |
| * Bumper Impact Beam | 압출 | 7003, 6061 | 30 | Plastic |
| Seat Rail | | | 30 | - |
| * Space frame 연결부품 | 진공금형주조 | Al-Si계 | - | - |
| * Space frame | 압출 | 6N01 | - | - |
| * 범퍼 | 압출 | | - | - |

형이 일어나지 않아야 하므로 강도가 높은 소재가 필요하다. 그러므로 자동차 부품중 많은 부분을 알루미늄화 하려면 각 사용부위에 알맞는 특성을 가진 소재를 다양하게 개발하는 것이 필요하다.

자동차의 차체 구조물과 외피에는 평균 113kg/대 정도의 알루미늄 소재가 사용되고 있다⁹⁾. 현재 자동차에 사용되고 있거나 개발 단계에 있는 알루미늄 합금 부품을 표 5에 정리하였다^{7), 15)}. 표 5에서 부품명 앞에 별표를 한 부품은 1996년 현재 선진국에서 이미 알루미늄화 개발이 완료되어 승용차에 사용하고 있는 부품을 표시한다.

4. 국내의 자동차 알루미늄화 개발 현황

국내 자동차 업계에서도 구동부품과 차체 부품의 알루미늄화 개발을 추진하여 상당부분 성과를 거두었다. 국내의 자동차 알루미늄화 개발은 우선 외산소재를 들여와서 엔진 부품 또는 열교환기 부품을 알루미늄화 하는 것으로 시작하여 국산화 개발을 추진하였으며 차체부품에 쓰이는 fender, 자동차 문, 트렁크 리드 등의 알루미늄화도 연구개발 중이다²⁾. 엔진부품으로 발브류와 에너컨 콘텐서 튜브, ABS 브레이크 하우스, 휠 및 기타 지지부품 등은 이미 알루미늄으로 국산화되어 시판차량에 장착되고 있으며, 알루미늄 합금 주조 휠은 소재까지 완전한 국산화가 이루어졌다. 앞으로 각종 부품의 알루미늄화 개발에서는 원소재의 국산화가 시급하며, 차체부품에서는 소재개발과 병행한 성형 및 접합기술의 개발이 우선 필요하다고 보인다.

장기적인 관점으로 볼 때, 국내 자동차 업계도 현재의 부품단위의 대체개발 단계를 탈피한 알루미늄 차체모델의 개발과 소재개발이 필요하다. 이와 같은 새로운 알루미늄 자

동차 모델의 개발은 전반적인 공정설계와 구체적인 소재기술 및 조립기술의 개발이 동시에 요구되기 때문에 알루미늄 업계는 물론, 철강업계와 플라스틱 업계까지 기술적으로 상호보완하고 다른 한편으로는 서로 경쟁하는 복합구조의 공동개발 시스템을 가져야 한다고 판단된다. 이런 점에서 사용자인 자동차 업계는 뚜렷한 개발목표와 계획을 제시하여 소재업계 또는 부품 가공업계의 지향성 있는 연구개발을 이끌고, 상호보완과 경쟁을 조성 조절하는 역할을 분담해야 한다.

한편 자동차 알루미늄화를 위하여 알루미늄 소재업계에서 선결해야 할 문제는 소재가격을 최대한 낮추는 것이다. 선진국에서는 현재의 \$4/kg의 알루미늄 합금소재 가격을 \$2/kg내외까지 낮추기 위한 노력을 하고 있다. 이와 같은 가격 구조를 가지려면 필연적으로 \$1/kg수준인 알루미늄 scrap을 사용하여 자동차용 고급 소재를 만들 수 있어야 하고, 제조비용을 \$1/kg수준으로 낮추어야 한다. 현재의 기술과 생산공정으로는 재질과 비용면에서 이 수준까지 가격을 낮추는 것은 거의 불가능해 보이지만 이러한 시도는 최선의 가격 경쟁력을 갖추기 위한 노력으로 보여서 시사하는 바가 크다.

5. 결 언

알루미늄 소재는 무게가 가벼울 뿐만 아니라 자동차의 안전성을 높이고 소음과 진동을 억제하는데 상당히 좋은 특성을 보여주고 있다. 또한 폐차시 재활용율이 높아서 다른 경쟁소재에 비해서 환경보호 측면에서도 아주 유리한 고지를 점령하고 있다. 자동차를 알루미늄화 하기 위한 소재기술과 조립기술은 상당한 수준까지 개발되어 선진국에서는 기술적인 문제를 거의 해결한 상태에 와

있다. 그러나 아직 국내에서는 소재개발이 미흡하며, 특히 판재성형과 집합기술이 부족해서 전반적인 기술 고도화가 시급히 요청된다.

한편 세계적으로 볼 때 현시점에서 자동차에 알루미늄 소재를 대량으로 사용하기에는 원소재 가격이 너무 비싸다. 또한 성형가공과 용접접합 공정의 생산성이 낮아서 강재를 사용하는 경우에 비해 생산단가가 높다. 따라서 알루미늄 제조업계에서는 저렴한 가격으로 소재를 공급할 수 있는 방법에 대한 깊이 있는 연구를 해야 한다. 또한 여러 자동차 부품에 따라 요구 특성을 충족시키면서 경제적으로 자동차를 제조하기 위하여는 소재관련 기술의 개발이 중요하다.

새로운 알루미늄 차체모델을 개발하려면 단순한 부품대체와는 달리 전체적인 공정설계와 구체적인 소재기술 및 조립양산 기술의 개발이 동시에 필요하다. 장기적으로 볼 때 국내 자동차 제조업계는 소재업계 및 부품제조 업체와 협력하여 현재의 부품 알루미늄화 단계를 뛰어넘은 알루미늄 차체 모델개발을 준비해야 한다.

참 고 문 헌

1. G. Lucas, *Advanced Materials & Processes*, vol. 149, No. 5, pp. 29~30, 1996.
2. 강석봉, 김형우, *대한금속학회보*, vol. 8, No. 3, p. 245, 1995.
3. S. Ujihara, S. Kamahori, S. Horie, *Sci. & Eng. of Light Metals*, The proceedings of International Conference on Recent Advances in Sci & Eng of Light Metals, ed by K. Hirano, H. Oikawa and K. Ikeda, published by

The Japan Inst. of Light Metals, Tokyo Japan, p. 1163~1170, 1991

4. F. R. Field III & J. P. Clark, *Light Metals for Transportation Systems*, The proceedings of International Symposium on Light Metals for Transportation System, ed. by N. J. Kim, published by Center for Advanced Aerospace Materials, Pohang Korea, p. 61~75, 1993.
5. H. Hosomi, *Sumitomo Light Metal Technical Report* vol. 32, No. 1, p. 1, 1991.
6. Y. Nishimura, *Sumitomo Light Metal Technical Report* vol. 34, No. 4, p. 66~83, 1993.
7. 김영우, 임태원, *대한금속학회보*, vol. 8, No. 3, p. 223~230, 1995.
8. M. H. Skillingberg, *Sci. & Eng. of Light Metals*, The proceedings of International Conference on Recent Advances in Sci & Eng of Light Metals, ed by K. Hirano, H. Oikawa and K. Ikeda, published by The Japan Inst. of Light Metals, Tokyo Japan, p. 1155~1162, 1991.
9. SAE Report, *Advanced Materials & Processes*, vol. 149, No. 5, p. 23~25, 1996.
10. 近田, *輕金屬*, vol. 38, No. 2, p. 118, 1988.
11. P. Furrer, *Sci. & Eng. of Light Metals*, The proceedings of International Conference on Recent Advances in Sci & Eng of Light Metals, ed. by K. Hirano, H. Oikawa and K. Ikeda, published by The Japan Inst. of Light Met-

- als, Tokyo Japan, p. 1171~1178, 1991.
12. H. P. Bauerle and H. Burst, *ibid*, p. 1139~1144, 1991.
13. J. D. Minford, *Aluminum* vol. 57, p. 657, 1981.
14. H. Kinoshita, *Sci. & Eng. of Light Metals*, The proceedings of International Conference on Recent Advances in Sci & Eng of Light Metals, ed. by K. Hirano, H. Oikawa and K. Ikeda, published by The Japan Inst. of Light Metals, Tokyo Japan, p. 1145~1150, 1991.
15. Y. Watanabe, K. Sugiyama, *自動車技術*, vol. 49, No. 5, p. 5~10, 1995.