

# 알루미늄 철도차량 차체의 손상 방지를 위한 연구

## Studies on the Prevention of Damages on the Carbody of Aluminum Rolling Stock

서승일<sup>1</sup>

Seung-II Seo

**Key words** : Aluminum Carbody(알루미늄 차체), Loading Test(하중 시험), Fatigue Test(피로 시험), Damages(손상), Failures(파괴), Reliability(신뢰성)

### Abstract

Aluminum rolling stocks have been developed for six years in Korea and commercial trainsets are being constructed by the carbuilder. Aluminum alloys are sensitive to various imperfections. In this paper, damages and failures of the aluminum carbody taking place during the process of development are investigated and accumulated data are released. Also, remedies for the failures are suggested and design changes are introduced. It is expected that all informations can contribute to construction of reliable and safe aluminum rolling stocks.

### 1. 서 론

알루미늄 합금은 경량이면서 고강도의 특성을 지니고 있기 때문에 수송 수단의 구조 재질로 널리 사용되고 있으며, 항공기와 선박, 철도차량 등 수송 기계에 활발히 적용되고 있다. 알루미늄 합금은 고강도 경량의 재질 특성과 함께 성형성이 우수하여 압출이 가능하다는 장점도 가지고 있다. 특히 철도차량과 같이 단면이 균일한 구조체의 경우 알루미늄 압출재는 유용한 구조 재질이 된다.

알루미늄 압출재를 적용한 철도차량은 독일, 프랑스, 일본 등 여러 선진국에서 이미 개발 완료하여 실용화된 상태이다. 독일의 초고속 열차 ICE는 개발 초기부터 알루미늄 압출재를 적용하였으며, 프랑스의 신형 TGV도 알루미늄 압출재를 적용하였고, 일본의 신형 신간선도 알루미늄 압출재를 적용하였다. 국내에서도 알루미늄 압출재를 적용한 표준전동차가 개발 완료되어 내구성 시험을 거쳐 실용화되었고[1, 2], 한

국형 고속전철 시제차도 알루미늄 압출재가 적용되어 개발 완료되었으며, 국내의 한 지방 도시의 지하철 전동차의 차체가 알루미늄 합금재로 결정되면서 알루미늄 철도차량의 상용화가 개시되었다.

본 연구에서는 국내에서 최초로 알루미늄 철도차량 차체를 개발하는 과정에서 겪었던 알루미늄 구조물의 결함과 신뢰성 평가를 위한 시험 중에 발생한 구조 손상 사례에 대해 정리하고 분석함으로써, 향후 양산되는 알루미늄 철도차량의 신뢰성 향상을 위한 기초 자료로 삼고자 한다.

### 2. 알루미늄 합금 용접부의 결함

알루미늄 합금은 고온 용융 상태와 상온에서의 수소 용해도 차이에 의해 용접 후 냉각 상태에서 용해되지 못한 수소 가스가 기공을 형성하게 된다. 또한 알루미늄 합금은 고온에서 입계에 존재하는 액막이 결정립의 냉각에 따른 수축력을 견디지 못해서 고온

1 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

균열이 발생하게 된다. 기공과 고온균열은 알루미늄 합금의 용접부에서 발생하는 대표적인 결함이라 할 수 있다. Fig. 1은 알루미늄 압출재의 용접부에 발생한 기공을 보여준다. 기공을 방지하기 위해서는 수소 원의 차단이 중요한데, 모재 또는 용접봉 표면의 수분이나 불순물을 제거하는 것이 중요하다. Fig. 2는 고온균열을 보여주는데 고온균열을 방지하기 위해서는 적절한 용접봉의 선정이 중요하다.

### 3. 용접부 인장강도

알루미늄 합금은 열처리계 합금과 비열처리계 합금으로 분류해 볼 수 있는데, 열처리계 합금의 경우 용접부의 인장강도는 용접열에 의한 열처리 효과의 소멸로 저하된다. Fig. 3은 알루미늄 합금(A6005A) 용접부 인장 시험의 인장 시험에 의한 응력-변형도 관계를 보여 준다. 모재의 항복강도 및 인장강도가 각각 215 MPa과 245 MPa이고, 연신율이 8 % [3, 4]임을 고려하면 강도 저하가 35 %에 이르는 것을 알 수 있다.

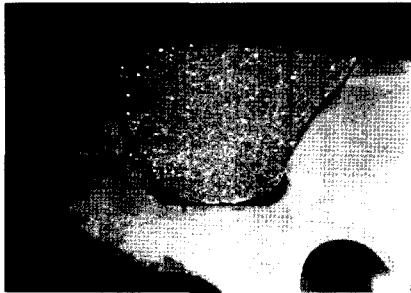


Fig. 1 Porosities of aluminum welded joint

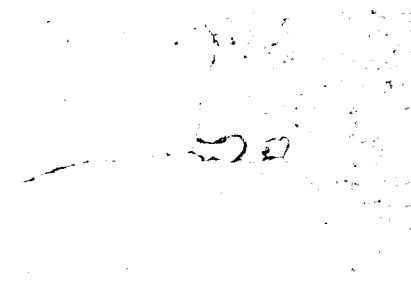


Fig. 2 Hot cracks of welded joint

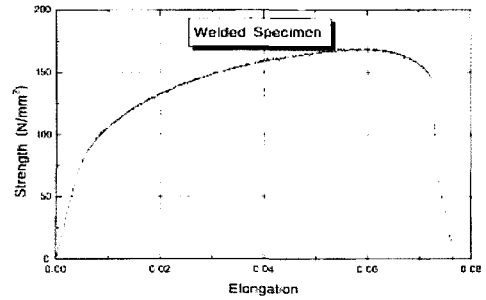


Fig. 3 Tensile strength of welded joint of aluminum alloy

### 4. 인장 시험의 피로강도

2.절에서 언급한 바와 같은 내부에 존재하는 결함은 알루미늄 합금 용접부의 피로강도를 저하시킨다. 과도한 내부 결함은 용접부 피로강도를 급격히 저하시킨다. 알루미늄 압출재 용접부 인장시험에 대해 편진 피로강도 시험을 실시하였다 [5, 6]. SN곡선 상에 표시한 시험 결과는 Fig. 4와 같다. 편진 피로강도 시험은 최소 응력은 0이고 평균응력이 응력 진폭이 되도록 수행하였다. Fig. 4의 시험 결과는 결함의 크기가 시편 두께(2mm)의 1/3을 초과하지 않는 경우의 피로강도 시험 결과를 정리한 것이다. 용접 결함의 정도에 따라 피로강도는 현저히 저하되는데, 응력 진폭 100 MPa의 경우, 파면에 나타나는 결함의 크기에 따라 피로강도를 정리해 보면 Fig. 5와 같다. Fig. 5는 피로강도 확보를 위해서 결함의 최소화가 필수적임을 말해 준다.

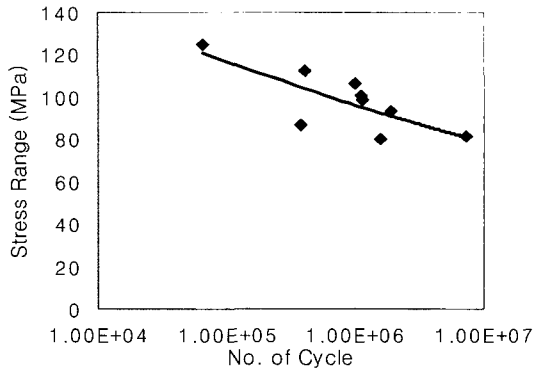


Fig. 4 Fatigue strength of tensile specimens of welded joint

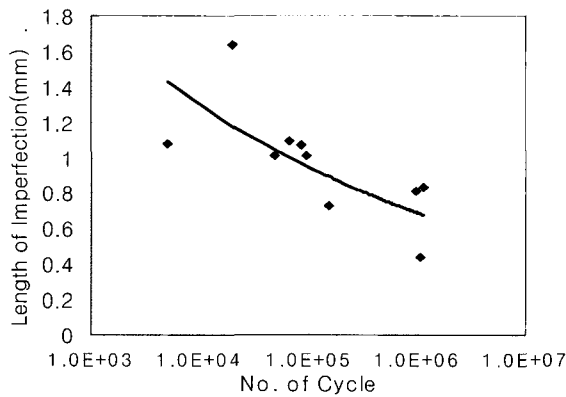


Fig. 5 Reduction of fatigue strength according to length of imperfection

### 5. 알루미늄 압출재 부분구조 시편의 피로강도 시험

인장시편에 대한 피로강도 특성은 재질 자체에 대한 강도 특성이라 할 수 있는데, 구조물의 형상에 기인한 영향을 고려하여 피로강도 특성을 파악할 필요가 있다. 특히 철도차량의 하부 언더프레임은 각종 전장품이 취부되고 대차와 직접 연결되어 있어 차체 운동에 따른 반복적인 하중을 받게 되어 피로 손상이 우려되므로, 기하학적 형상이 피로강도에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다. 언더프레임의 일부를 이루고 있는 중공형 대형 알루미늄 압출재를 용접으로 연결한 부분구조에 대해 3점 굽힘 피로시험을 실시하였다 [5, 6]. 시험결과를 정리해 보면 Table 1과 같다. 시험

결과에 따르면, 시험편에 따라 용접부 뿐만 아니라 T슬롯 부위 또는 모재 부분에서도 피로파괴가 발생하였다. 알루미늄 압출재 용접부의 피로강도는 모재에 비해 현격히 저하되지만, 구조물에서는 기하학적 형상 설계에 의해 용접부에 작용하는 응력이 감소 될 수 있어서 용접부에서 피로 손상이 발생하지 않을 수 있다. T슬롯 부위와 같이 응력 집중이 가능한 기하학적 형상을 갖고 있는 부분에 대해서는 정밀 해석에 기초한 형상 설계가 필요함을 Table 1은 보여 준다.

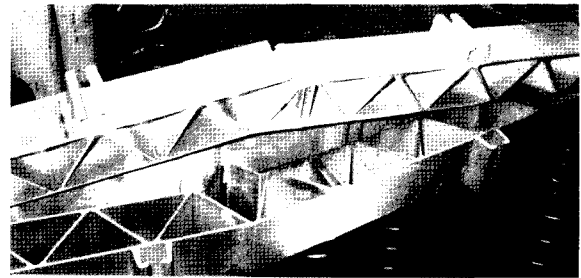


Fig. 6 Fatigue failure of aluminum extrusion components

Table 1 Fatigue strength of aluminum extrusion component

Concentrated Load (N)	Load Frequency (Hz)	Fatigue Life (Cycles)	Crack Position
980~17,650	3	$2.2 \times 10^4$	Weld Toe
980~17,650	3	$4.1 \times 10^4$	Weld Toe
980~17,650	3	$7.5 \times 10^4$	Weld Toe, Slot
980~17,650	5	$1.5 \times 10^5$	Slot
980~17,650	5	$1.5 \times 10^5$	Slot

### 6. 차체의 정하중 시험

#### 6.1 하중 조건

철도차량의 차체는 JIS 또는 UIC의 기준에 따라 강도 시험을 거쳐 안전성을 입증한 후에 실제 운행에 들어갈 수 있다. JIS 기준에 따른 하중시험 조건은 Table 2와 같다[7].

수직하중은 만차 상태의 중량과 차체 운동에 따른 동하중을 고려하여 차체 내부 마루(floor)에 가하게 된다. 차체의 주요 부위에 부착된 스트레인 게이지를

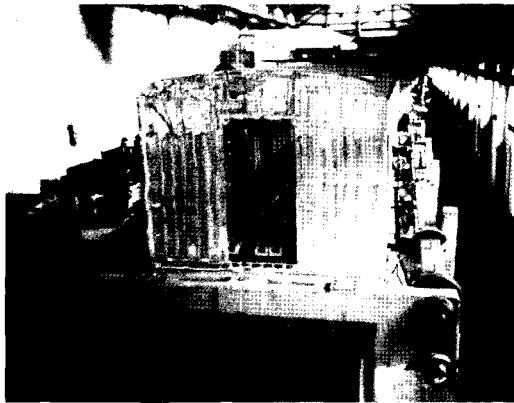
이용하여 하중 상태에서 차체 각 부위에 작용하는 응력을 계측하게 된다. Fig. 7은 수직 하중을 가한 차체의 모습이다.

**6.2 시험 결과**

시험 결과를 정리해 보면 Table 2와 같다. 시험 중 측구조 창문 모서리 부위의 고응력 영역에서 Fig. 8과 같은 균열이 발생하였고 Fig. 9와 같이 창문 프레임이 수직 부재와 접합된 용접부에서 균열이 발생하였다.

**Table 2 Results of static load test**

Loading Type	Magnitude of Load	Loading Position	Max. Stress (MPa)	Max. Stress Position
Vertical Load	55ton	Distributed Load on Floor	115	Window Corner
Compressive Load	50ton	Point Load on Center Sill	122	Center Sill Transition
Torsional Load	4ton-m	Torsion on Body Bolster	15	Side Door Lower Corner



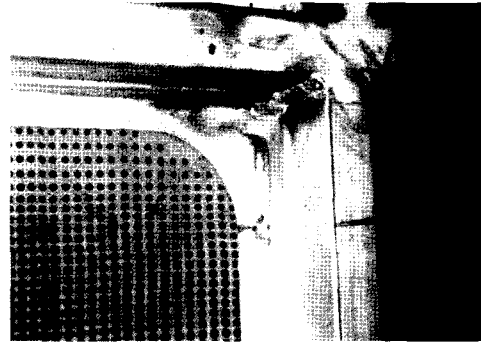
**Fig. 7 Static load test**

Fig. 8의 균열 발생은 고응력 영역이면서, 차량 외관 평활도 향상을 위해 용접 비드를 과도하게 제거하여, 재료의 연화와 부재 두께 감소가 중첩되었기 때문으로 사료된다. Fig. 9의 균열은 부분 용입된 상태에서 용접 비드를 제거하여 접합부 강도가 충분하지 않은 상태에서 고응력이 작용한 결과 균열이 발생한 것으로 추정된다. 균열 부위를 제거하고 완전 용입이 되도록 보수 용접을 실시하여 재시험을 수행한

결과 균열은 관측되지 않았다. 창문 모서리 부분을 제외하고는 균열이 발생하거나 허용응력(A6005A 모재부 215 MPa, 용접부 108 MPa)을 초과하는 영역은 존재하지 않았다.

**7. 차체 피로강도 시험**

차체의 안전성 검토는 정적 하중 뿐만 아니라 동적 반복 하중에 대해서도 이루어져야 한다. 차체가 운행 중에 받게 되는 반복 하중에 대한 피로강도 검토를 위해 대형 구조물 시험 설비에서 하중 시험을 수행하였다[8]. 차량 운행 시의 동하중을 재현하기 위해 만차하중을 적재한 상태에서 차체 가속도가 0.2g가 되도록 차체 볼스터 하부를 유압 가진기로 가진시킨다.



**Fig. 8 Crack around window corner**



**Fig. 9 Crack on frame joint**

피로 시험 결과에 따르면 최초로 균열이 발생한 지점은 Fig. 10과 같이 출입문 포켓의 하부였다. 출입문 포켓은 출입문의 동작을 원활하게 하기 위해 출입문의 이동 통로를 제공하기 위한 판재로서 바닥구조와의 접합을 위해 필렛 용접을 실시하였는데, 구조상

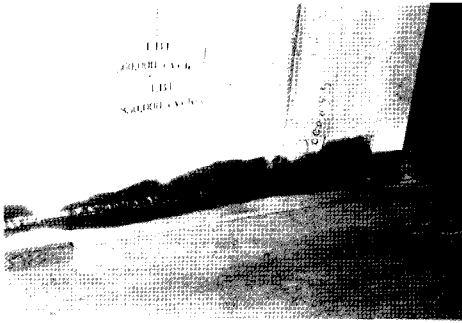


Fig. 10 Fatigue crack initiation

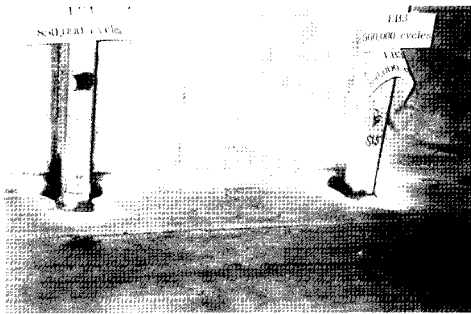


Fig. 11 Fatigue cracks under side posts

양면 용접을 하기가 곤란하여 일면 용접만 실시한 상태이다. 반복 하중이 가해짐에 따라 용접되지 않은 면에서 균열이 진전하여 전체 파괴에 이른 것으로 추정된다. 출입문 포켓은 주요 구조 부재가 아닌 단순 마감 부재라 할 수 있어서, 치명적인 구조 손상에 이르는 것은 아니나 피로 손상 방지를 위해서는 설계 변경이 필요하다. 반복 하중이 지속됨에 따라 균열이 추가적으로 발생한 지점은 Fig. 11과 같은데 고응력이 작용하는 수직 방향 포스트 하부의 용접부에서 부분 용입이 된 상태에서 반복 하중이 작용함에 따라 균열이 진전한 것으로 추정된다. 측구조와 바닥구조의 접합 부분에서 완전 용입이 이루어지도록 용접부가 설계되고 철저한 용접 시공도 이루어져야 한다. 하중 시험이 진행됨에 따라 균열이 계속해서 발생한 지점은 Fig. 12과 같다.

### 8. 설계 변경

알루미늄 차체의 정하중 시 균열이 창문 모서리에 집중됨을 감안하면 창문 모서리의 형상 변경이 필요하다.

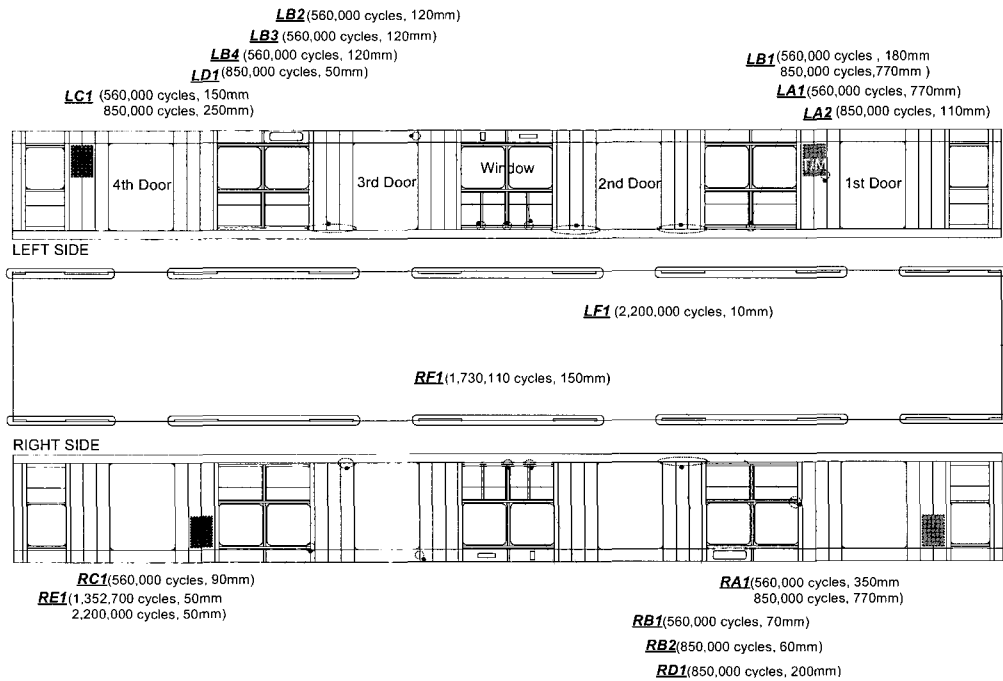


Fig. 12 Fatigue cracks of car-body

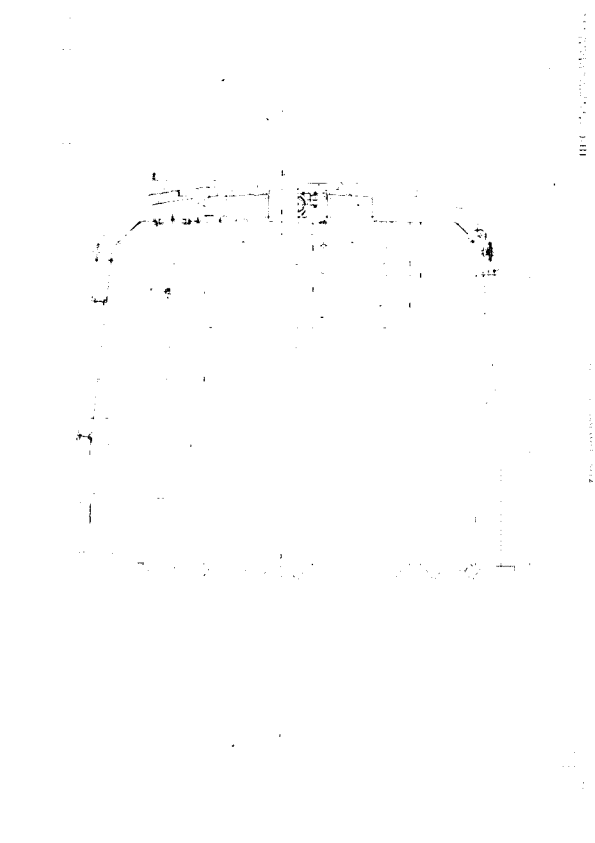


Fig. 13 Modified car-body section

또한 피로 시험 결과, 출입문 포켓 부분에서 최초의 피로 균열이 발생하였고, 측구조 수직 포스트와 바닥 구조와의 접합부에서 균열이 초기에 발생하였다. 이런 문제점을 개선하기 위하여 새로운 차량 구조에는 측구조를 이중의 중공 압출재 구조로 설계 변경하여 포스트를 제거하고, 일면 부분 용접이 될 수 밖에 없는 포켓 부분을 제거하였다. 또한 창문 모서리의 응력 집중을 해소하고 용접부 용입 불량에 따른 균열을 방지하기 위해 측구조의 전체 용접 후에 창문 부위를 가공을 통해 제거할 수 있도록 설계하였다. 변경된 차체 구조는 Fig. 13와 같다[1].

9. 결 론

지금까지 알루미늄 철도차량의 개발 과정에서 발생한 손상 및 균열에 대해 고찰하여 보았다. 고강도 압출재를 사용한 알루미늄 철도차량 차체 제작을 위

해서는 용접부의 강도 저하를 보상하기 위한 형상 설계와 용접부의 완전 용입을 위한 설계 및 용접 시공이 필수적이다. 또한 용접부 결함을 방지하기 위한 적정 용접 조건의 선정 및 용접 절차의 준수도 필수적이다. 하중 시험 과정에서 차체의 균열이 주로 측구조에서 발생하였던 점을 감안하여 측구조가 이중의 중공 압출재로 설계되도록 변경되는 것이 강도 상 유리하다. 또한 측구조의 변경은 수직 포스트와 같은 부재를 제거할 수 있어서 용접 자동화 측면에서도 장점이 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 공업기반기술개발사업 “철도차량구조용 알루미늄 압출형재 및 차체 구조 개발”과 건설교통부 표준화사업 “전동차 시스템 엔지니어링 기술개발”의 일부분이며, 알루미늄 압출재 및 차체 피로 시험은 한국기계연구원에서 위탁과제(과제 책임자 : 이상록, 신병천)로 수행된 것임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 서승일, 최성호, 임영호, 이정수, “표준화된 알루미늄 전동차의 개발”, 한국철도학회지, 제2권, 3호, pp. 54-60, 1999.
2. 서승일, 박일철, 김진태, 이동현, 신돈수, “알루미늄 철도차량 차체 설계 및 대형 알루미늄 압출재 생산 기술 개발”, 한국철도학회지, 제2권, 1호, pp. 1-13, 1999.
3. “철도차량용 알루미늄 합금 용접 이음의 설계 방법”, 일본공업규격, JIS E4050, 1992.
4. "Wrought Aluminum and Aluminum Extruded Sections", DIN 1748, 1983.
5. Seung Il Seo, Chan Suk Lee and Sang Rok Lee, “Basic Studies on the Production Technology for Application of Large Extrusion Profiles of Aluminum A6005A Alloy to Ship Structures”, Journal of Ship Production, Vol. 15, No. 3, pp. 156-163, 1999.
6. “제13장 알루미늄 압출재 피로강도 평가”, 철도차량구조용 알루미늄 압출형재 및 차체구조 개발, 산업자원부, 1998.
7. “철도차량 구체의 하중 시험 방법”, 일본공업규격, JIS E7105, 1992.
8. “제14장 차체 피로 시험”, 철도차량구조용 알루미늄 압출형재 및 차체구조 개발, 산업자원부, 1998.