

고속철도 차량용 알루미늄 합금의 기술현황과 전망



강 석 봉 (KIMM 재료기술연구부)

- '72. 2 서울대학교 공과대학 금속공학과(학사)
- '74. 7-'79. 2 동국제강, 삼미종합특수강, 한국중공업 근무
- '79. 3-'81. 2 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '82. 9-'86. 8 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- '80. 12-현 재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

다음세기에 장·단거리 교통 철도가 얼마나 중요한 역할을 할 것인가는 아무도 예측할수 없다. 그러나 오늘날 및 미래에 있어서 수송과제의 해결과 점점 더 시급해진 교통문제의 극복은 궤도 차량을 통해서만 해결 가능할 것이다. 이러한 신 차량에 대한 새로운 해결책은 산업화의 측면에서 고려되어야 하며, 아울러 안락하고 신속하며 새로운 요구를 충족시키고, 또한 엄격한 중량 제한과 경제적인 요구를 만족시킬 차량을 개발해 내는 것이 중요하다. 이러한 요구 조건을 충족시키는데 있어서 알루미늄 재료가 결정적으로 기여하리라 생각한다. 새로운 합금, 반제품 및 접합기술에서의 새로운 해결법과 축적된 경험등이 고속 철도 차량 제작에 현재 이용되고 있으며, 앞으로도 계속적인 기술개발이 예상된다.

오늘날 철도차량분야는 세계적으로 교통, 환경 및 정책적 목표설정에 근거하여 알루미늄 재료의 활용 기술이 점차적으로 자리를 잡아 가고 있으므로 향후 알루미늄 수요는 증가하리라 예상된다. 특히 고속전철의 경우 압출 프로파일의 요구로 최소한 다음 세기동안 수요 증가가 계속되리라 믿기 때문에 향후 대형 압출 공장의 설비 투자가 계속되리라 예상된다.

따라서 여기서는 성공적인 고속 철도 차량으로 세계적인 주목을 받고 있는 프랑스의 TGV, 독일의 ICE, 일본의 신간선 열차의 개발 과정을 살펴 보고, 향후 이들 철도 차량이 수요 체계의 변화에 부응하여 예상되는 차량 경량화 대책으로 알루미늄

합금의 사용 경향에 대하여 기술하였다. 이를 바탕으로 현재 국내에서 건설을 추진하고 있는 고속 철도 차량에 대하여, 재료 기술적인 측면에서 향후 우리의 기술 개발방향 설정을 위하여 도움이 되고자 하였다.

2. TGV 열차의 알루미늄 합금 구조

2.1 차세대 2층 TGV 열차의 요구 사항

오늘날의 TGV(그림 1), 즉 TGV 동남선, TGV 대서양선, 또는 TGV-Reseaux 선에는 알루미늄 합금이 실제로 그렇게 많이 사용되지 않았다. 그러나 미래의 TGV, 특히 차세대 2층 TGV 시대를 열려면 여러가지 목표를 달성해야 하는데, 아래에는 이들 중 중요한 몇가지 사항들을 열거하였다.

(1) 새로운 고속 철도에서 예견되는 과부하를 피하기 위하여 TGV의 이송 용량을 증대시켜야 한다. 예를들면 현재 동남선 TGV의 좌석은 740 석인데 반하여, 같은 공간이라도 2층 TGV는 1090 석으로 할수 있다. 따라서 좌석수를 40% 만큼 증대시켜서 투자와 운영비에 관계되는 TGV의 생산성을 향상시킬 수 있다. 더욱이 화물용 펠레트의 증가로 1층의 단열차 또는 다열차 TGV로 수송하던 화물량도 증대하게 된다.

(2) 새로운 열차는 최소한 현재의 TGV만큼 안전해야하고, 여행자가 편안하도록 제작되어야 한다.

(3) 환기가 잘되려면 양측 벽면에 노즐이나 컨버트(converter)를 통하여 계속적으로 공기가 공급되어야 하고, 바닥면에 배기 통로가 설치 되

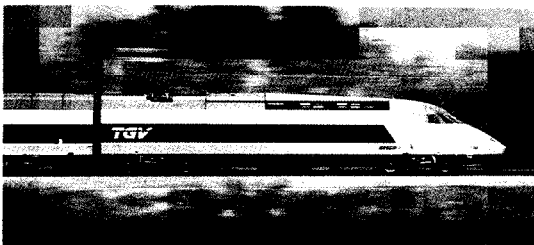


그림 1. TGV열차의 전경

어야 한다.

(4) 소음으로 부터의 안락함은 차체 구조로 부터 내부장치를 분리함으로써 가능하다. 더구나 열차 구조에 의한 중량감소와 소음원에 접근되는 열차, 1층실의 음향학적인 차폐설비의 누락, 유효한 벽 두께의 감소 등에도 불구하고 소음 목표치는 68dB 이하이다.

차세대 2층 TGV는 다른 고속 열차와 마찬가지로 예견되는속도는 300km/h이다. 차량대수는 Alstom사와 계약 체결된 차량은 100량으로 이중 일부는 결정되었으나, 일부는 조건부 계약 상태이다. 운행은 1995년부터 할 것으로 사료되지만, 시험열차 공급은 1994년 부터 될 것이다. 차세대 2층 TGV열차는 2개의 기관차와 1등칸 3량, 2등칸 4량, 복합칸 1량(2층은 Bar, 1층은 기계실)등 8량의 2층 객차로 운영될 것이다.

2.2 차세대 2층 TGV 열차의 알루미늄 합금 구조

위에서 기술한 제반 목표와 고속 주행에 따라 예견되는 문제점들을 해결하려면 많은 양의 기술 개발이 필요하다. 특히 고속에서는 각 바퀴 축에 걸리는 최대 하중이 17t 이하라야 된다는 한계 때문에 더욱 어려움이 있다. 이는 열차의 모든 조립 요소들이 어떤 방법으로도든 무게를 줄여야 한다는 것을 뜻하며, 여기엔 대차위의 축과 내부 장치, 구조 등이 포함된다. 이 때문에 고안된 것이 여러 형태의 알루미늄 재료(압출 성형재 및 압연재)들이다. 실제 제작에 있어 차량 1량당 총 10t의 알루미늄이 사용될 예정이다. 열차 골조(그림 2)에 사용된 긴 단면의 알루미늄과 조인트연결부의 개량으로 TGV 대서양선의 철재 차체와 조인트에 비하여 중량을 상당히 줄일 수 있으며 그 중량은 총 8t에 이르렀다.(중간 통로 발판 포함) 각 단면에 사용된 각종 알루미늄 합금의 종류는 AlMgSi계(6005, 6061, 6085)로서, 이들 합금은 기계적 성질, 용접성 및 내식성이 잘 조절된 합금들이다. 한편 중간 바닥은 양측이 알루미늄으로 입혀진 알루미늄 하니컴 구조로 제작되었다. 물론 알루미늄 하니컴 구조를 지붕에 사용하는 것도 검토되었다.

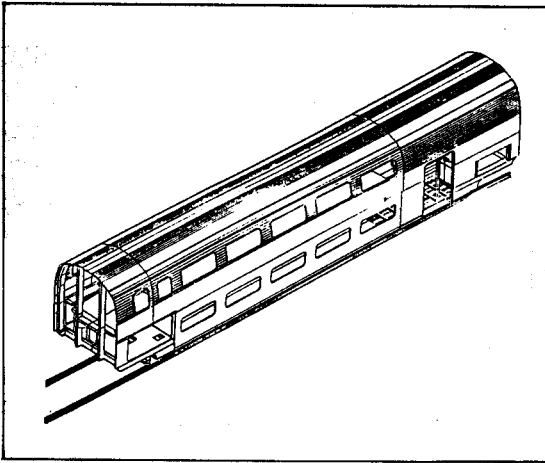


그림 2. 중간 객차의 차체

2.3 차세대 2층 TGV 열차의 설계 개념

알루미늄 합금으로 제작된 2층 열차 차체에 있어서 프로젝트의 참신함을 기하는 의미에서 GEC Alsthom과 Alusuisse, 프랑스 철도청사 (SNCF)간의 긴밀한 협력으로 합리적인 구상과

철저한 시방 선택이 이루어질 수 있도록 하였다. 전체 열차의 구상은 충격강도와 관련하여 계속적으로 개선점을 찾는 것으로(그림 3), 여기에는 아래와 같은 원칙들이 적용되었다.

(1) 화물칸으로 사용되는 모든 열차의 마지막 칸은 250t 이상의 압력에서 변형되도록 끝칸에 안전지대를 설치함과 동시에 열차 차체 끝부분에 주름 지대를 만들었다.

(2) 여객실의 최대 저항 능력은 400~500t의 압력으로 계산되었다. 물론 기관차와 객차 사이의 기어오름(Aufklettern)을 막는 장치는 필요시 적합한 에너지 소모로 작동되도록 미리 고려하였 다.

(3) 열차 차체의 저항 능력은 UIC-규정 566을 충족시켰다.

차세대 2층 TGV 열차의 내부 구조에 대한 횡 단면 절개도인 그림 4에서 보면, 높아진 1층 측벽 바닥은 아래에 열거한 제반 사항들을 가능하게 하였다.

(1) 의자를 조금 치켜 올림으로서 승객이 열차 차체의 좁아진 범위 밖으로 나오게하여 차지하는 폭을 넓힐 수 있게 되었다.

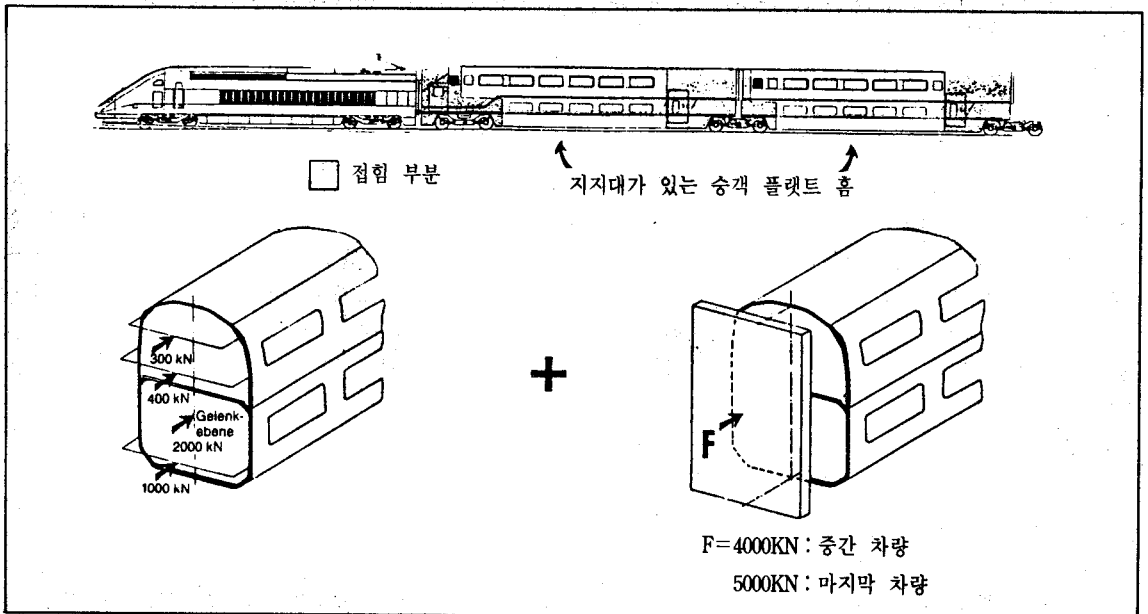


그림 3. 파괴 강도

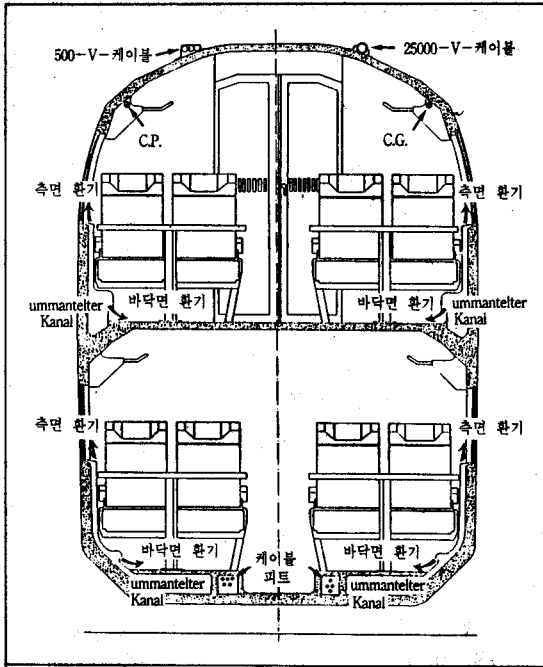


그림 4. 객차 횡단면

(2) 또한 노즐이나 컨버터로 공급되는 항온 항습 장치에 공기가 통할 수 있고 동시에 중압과 저압의 배선이 통할 수 있었다.

(3) 높아진 측면 바닥면은 조명실의 제반 필요조건, 차체내에서의 온도 조절, 전력공급, 배관등 제반 어려운 문제점들의 해결을 가능하게 하였다.

(4) 측면이 높아진 바닥면은 두께가 감소된 알루미늄 하니컴 구조로 만들어졌다.

(5) 의자구조는 알루미늄 가압 주조(합금 AS9U3 = GDAISi9Cu3)로 제작되어, 무게를 40%나 줄일 수 있었다.(기존 2등석의 1석당 무게가 26kg에서 16kg으로 감소되었다.)

차량 구조에 있어서 중량 감소, 객실에서의 천정 높이 감소와 관련하여 본 프로젝트에서 또 하나의 어려운 점은 소음 문제를 해결하여 승객에게 안락함을 제공하는 것이다. 따라서 측벽 및 바닥 붙임판은 샌드위치형 재료 (박판 금속/측벽용 고무와 바닥용 합판/바닥면 알루미늄)를 사용하여 소음을 줄였으나, 붙임판은 음향학적인 이유로 하니컴 구조에 직접 연결시킬 수는 없다. 이들 각 부품에 대한 수많은 시험은 음향실에서 시행

되었다.

본 연구 개발이 시작된 이래 3년 동안 GEC Alstom사는 이미 3개의 차체 견본을 제작하였는데, 이 중 2대는 항온항습장치가 완전히 가동될 수 있는 것이었으며, 1대는 End train의 차체이었다. 차체의 강도는 Vitry에 있는 프랑스 철도청(SNCF)의 중앙 실험실에서 연초에 시행되었다. 1991년 9월 1일부터 축소한 시험 열차를 제작하여 차체에 나타나는 진동, 소음 발생, 열의 상승 등을 동시에 측정하는 시험을 행하여 기술적인 개선 작업을 거듭하고 있으며, 또한 압력 측에 나타나는 상태도 연구하고 있다. 차세대 TGV 열차는 앞에서 언급한 제반 기술적 사항들이 해결되면 곧이어 야간 열차와 침대차에 대한 기본 계획을 세울 것이며, 또한 350km/h의 차세대 TGV를 발전시키기 위하여 주조 알루미늄으로 된 대차 프레임에 적용되도록 관련 연구를 계속할 계획이다.

3. ICE(Inter City Express) 객차의 알루미늄 합금 구조

3.1 ICE 열차의 개발 배경

독일 국립철도(DB)는 1991년 6월 2일 ICE의 도입으로 독일에서의 고속교통 시대의 막을 열었다. 독일이 고속교통 시대를 위한 ICE 도입의 역사적 과정을 살펴보면, 1974년 이래 독일 과학 기술처의 협조아래 목표를 설정하고 안전하고도 경제적인 속도를 유지하는데 필요한 차륜과 궤도시스템에 대한 연구가 시행되었다. 1985년 중간부터 독일 국립철도와 독일 산업체가 미래의 여행수단으로 소개한 바 있는 ICE 시범차량이 고속운수를 위한 독일 차량으로 표명되었다. 이 열차에 대해서는 에너지 경제적인 측면에서 알루미늄 합금으로 구조를 만드는 것으로 계획되었다.(그림 5) 1982년 ICE 시험 차량의 연구를 시작할 당시만 하더라도 고속 열차에 대한 요구 사항이 오늘날과 같이 그렇게 많지는 않았다. 특히 정속 주행과 턴별주행시 차체에 나타나는 압력 차이를 밀폐시키는 연구가 완전히 이루어지지 않았다. 비록 이런 상황에서 출발하여 계속되는

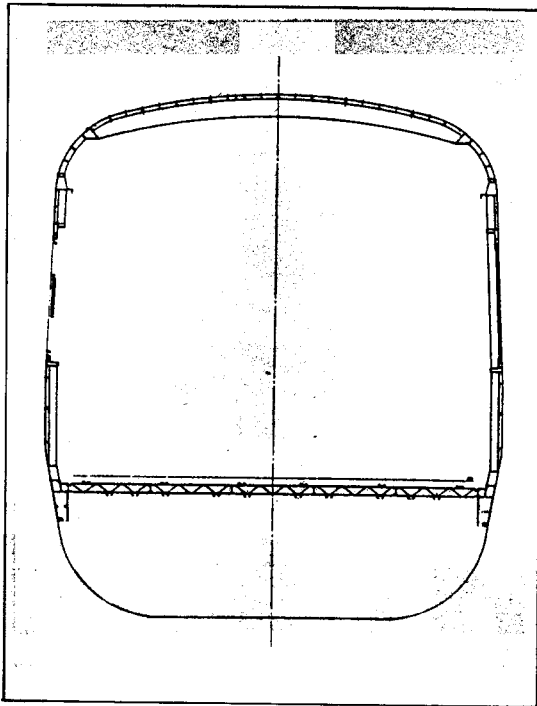


그림 5. ICE 시험 차량의 횡단면

연구 과정에서 많은 것이 달라졌을지라도 ICE 시험 차량은 가치있는 근거를 남겼다. 1987년 10월 15일 독일 산업은 ICE 객차의 개발을 위하여 각사별로 임무를 나누었다. 차체의 전체적인 개발은 ICE의 노동협동체가 담당하고 LHB는 스프링 메이커로, 기타 DUEWAG, MBB와 WU가 참여하였다. 4개의 열차타입에 대한 알루미늄 합금 구조에 대한 개발은 MBB가 중심이 되어 그 책임하에 수행되었다. 여기서 가장 중요한 요구 사항은 차체 골조에 대한 역학적인 안전성에 대한 시험이나 연구 단계를 제시하는 과정에서 설계나 계산의 상세함이 중요한 것이 아니라 독특하게 ICE의 열차 구조를 창출해 내는 것이었다.

3.2 ICE 객차 구조에 대한 요구사항

ICE 객차 구조에 대한 독일 국립철도의 특별 요구사항을 요약하면 아래와 같다.

(1) 장기간의 차륜/레일 연구

- (2) 독일 국립철도의 다양한 검사
 - (3) ICE 시험 차량에 대한 시험
 - (4) 독일 국립철도와 산업체간의 업무 협력 체계, 특히 ICE 프로젝트담당자들간의 업무협력 체계
- 한편 아래의 요구 사항은 열차의 기본구조 해석에 특별한 의미를 갖는다.

(1) ICE 객차가 올바르게 작동된다면 최대 속도는 280km/h, 설계는 300km/h로 한다. 이런 조건에서 열차구조의 해석을 위한 가장 중요한 기본요건은 ①동역학적인 부하의 범위와 ②공기 역학적인 검토이다.

(2) 차체는 구조에 예기치 않은 상황 발생시, 즉 주행중 특히 터널 통과시 공기 역학적인 압력 변화에 밀폐되어야 한다.

(3) 차체의 최저 주파수는 차체의 안전성에 일치되도록 10Hz 미만으로 해야 한다.

(4) 객차의 차체 중량은 가능한 적어야 한다. 승차감을 좋게하기 위한 설비와 장비의 무게는 연구개발을 통하여 최소화 한다. 이는 이미 지적한 바와 같이 축중량 한계를 적용하면 중량을 줄인 알루미늄 합금차체 사용이 가능하게 된다.

(5) ICE 외형 표면에서의 우수한 사항은 각진 창문과 후미진 창문 기중이 일률적으로 배열되어 있다는 것이다. 차체 구조의 응력이 창문 코너에 특별히 집중되므로 이 사항은 설계와 계산에 상당한 영향을 주었다.

(6) 알루미늄 합금 재료의 선택은 무엇보다도 그 무게 경감에 근거하고 있지만, 또 다른 중요한 점은 공기 역학상 알루미늄 합금 통합구조가 우수하다는 것이다. 부실한 제작으로 아연이 함유된 알루미늄 합금의 부식문제를 해결하기 위하여 독일 국립철도에서는 고강도 냉간가공 합금은 제외시켰다. 그러므로 형제로는 AlMgSi0.7, 판재로는 AlMg4.5Mn이 사용될 수 있었다. 제작이란 것은 허용 응력의 최소치, 특히 용접의 허용범위 내에서 작업하는 것을 의미한다.

(7) 가로, 세로, 수직 가속도가 동시에 겹치며 이에 따라 지금까지 생각하지 못했던 높은 부하가 나타난다.

(8) 내부의 폭은 안락함에 최선을 다했으며, 이를 위해 벽 두께를 줄여 내부의 폭을 넓혔다.

3.3 ICE 객차의 알루미늄 합금구조에 대한 연구 과정

앞에서 설명한 특별한 요구사항들은 ICE 구조 자체가 보통 방법의 설계와 계산으로 이루어지지 않았다는 것을 총체적으로 기술한 것으로, 이런 어려운 문제들을 해결하기 위하여 ARGE 회사의 경험과 독일 국립철도의 전문가, 대학, 소재 제조회사 등 모든 가용 전문인력을 총동원하여 참여시켰다. 아래에는 전체적인 개발과정에서 각 단계에 해당되는 설계, 계산시험에 대하여 설명하였다.

(1) 작업은 2등칸(Bvmz 802)을 기준으로 하여 1등칸(Avmz 801), 2등칸 특별석(Bsmz 803)과 식당칸(Wsmz 804)의 구조(종단면, 횡단면, 주 조립품)가 설계되었다. 중요한 것은 서로 다른 창문 기둥과 식당칸에서의 더 높아진 지붕과 사잇창을 위한 창문 할당이였다.

(2) 강도, 굽힘, 평면 4각 모델을 이용한 차체의 진동, 공기 역학적인 부하의 총량을 약식으로 계산하는 일이 수행되었다.

(3) 끝으로 상세한 계산이 시작되었다. 즉, 차체의 진동에 대한 시험 상호관계를 가진 평면모델, 수직 하중에 대한 강도와 굽힘, 강도 계산을 위한 FEM등이 수행되었으며, 그 예로서 ①ICE 차체의 종합구조에 대한 모델링(그림 6)과 ②창문 모서리 모델링(그림 7)을 각각 나타내었다.

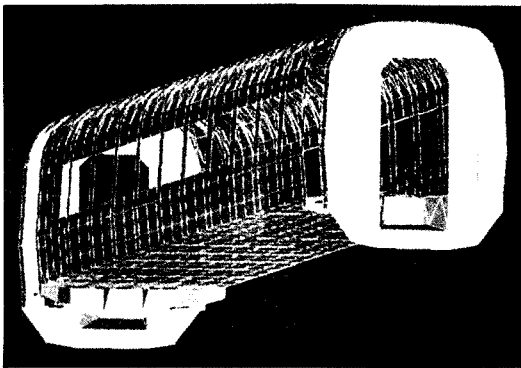


그림 6. FEM 응력 계산을 위한 ICE 차체의 종합 구조에 대한 모델링

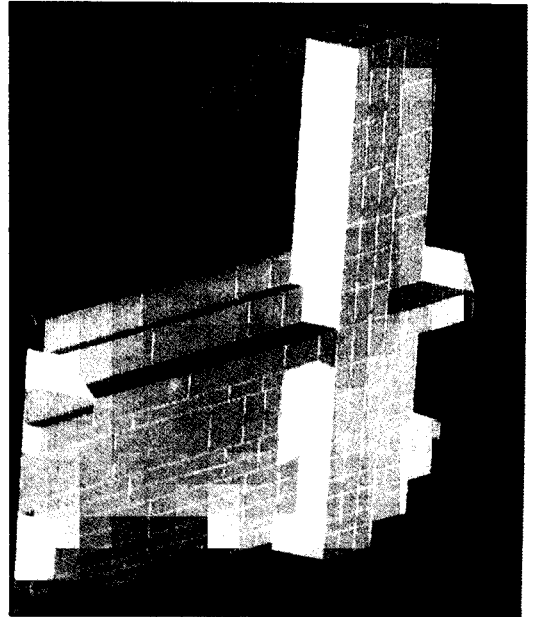


그림 7. FEM 응력 계산을 위한 창문 모서리 모델링

(4) 이 상세한 검사는 ①창문 코너 위/아래 ②측벽 서포트 ③측벽 서포트의 nadir ④바닥의 고정 레일부위 등에서 높은 하중이 걸림을 가리킨다.(그림 8)

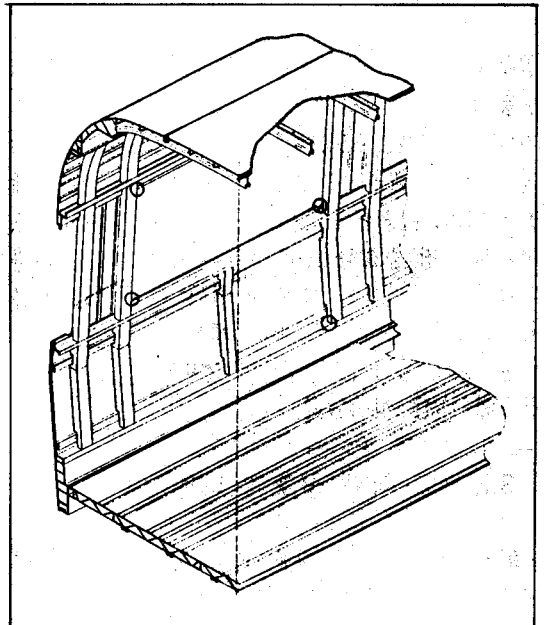


그림 8. 고부하가 걸리는 부분

(5) 이 결과 구조재 자체는 높은 강도가 요구되나 주어진 조건에 여유가 없었으므로 우선 창문 모서리 보강에는 목표를 두지 않았다. 그러므로 계산결과가 실제로 행해질 수 있는지 없는지에 대한 실험부터 시작되었다.

(6) 하노바 대학 VOB 교수의 조언과 도움으로 동역학적인 하중은 처음 간단히 10°로 계산했던 것과는 달리 열차가 운행되는 동안 수직하중의 최대치가 10°을 넘지 않았다.

(7) 독일 국립철도전문가들과 상의후 내구응력(endurance stress)에서 30%의 충격 여유 대신 20%의 충격여유만 계산하기로 합의했으며 이는 ICE가 독특하게 제작된 설비를 부착한다는 사실을 고려했기 때문이다.

(8) 독일 국립철도와 알루미늄 회사가 공동으로 연구한 결과 시방에 가까운 재료 특성치를 얻을 수 있었다.

(9) 1989년 9월 Minden에 있는 독일 국립철도 실험장에서 세심한 준비후 약 400개의 extension measuring streak를 이용한 열차골조에 대한 압축과 하중시험이 시행되었다.(그림 9, 10)

이상에서 기술한 제반 요구사항들을 감안하여 수행한 모든 실험결과에 따라 부하하중 지지능력(load capacity) 계산을 포함하고 또한 동시에 지정된 추가적인 안전성을 고려하여 차체 구조는 완료 될 수 있었다.

4. 신간선 열차의 알루미늄 합금 구조

4.1 신간선 열차의 속도 증가에 대한 구상 및 필요성

일본의 신간선 열차는 도쿄와 신오사카를 연결하는 도카이도 신간선과 신오사카와 하카다를 잇는 산요 신간선, 앤도와 모리오카를 잇는 도호쿠 신간선, 우에노와 니이카다를 연결하는 죠에츠 신간선이 있다. 이들 열차중 도카이도 신간선이 물동량이 제일 많으며 이미 오래전부터 양적 증가에 따른 수요의 증가에 대비하여 준비하고 있었다. 한편 경쟁 관계인 항공기 회사들도 비행장의

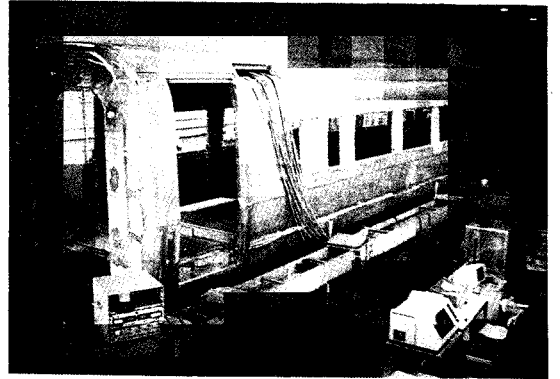


그림 9. 부하 시험중인 Bvmz의 골조

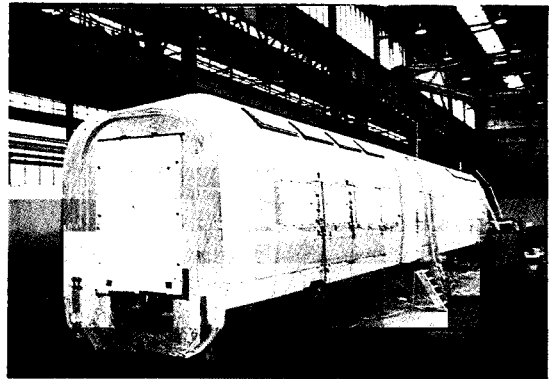


그림 10. 공기 역학적인 부하에 대한 응력 시험을 위하여 공기 분사 시험을 하고 있는 WSmz의 골조

개선을 가속화하여 항공 수송능력을 보완함에 따라, 신간선도 또한 경쟁능력을 계속 향상시킬 것을 강요받고 있다. 그러므로 새로운 모델인 신간선 300의 개발에는 목적지 도착 시간을 줄이는데에 최선을 다하기 위하여, 동경과 신오사카간의 515km 노선을 종전의 220km/h로 2시간 50분 걸리던 것을, 최고속도를 270km/h로 높힘으로서 운행시간을 단축시키는 것이다. 열차는 1990년 3월 제작 완료되었으며, 2년여에 걸친 기본적인 운행상태가 시험되었고, 동시에 열차의 대량생산도 실시되고 있다. 최고 속도 270km/h의 시험운행은 1992년 초까지 계획되어 있었다. 그의 남은 과제는 다른 신간선에도 속도의 향상을 적용하는 일이다.

속도 증가에 대한 종전의 구상은 열차의 향상된 운행상태에 집중되었다. 즉 주안점을 대차의 운행 안전성, 고속에서의 동력 시스템 안정을 위한 최적화, 소음 축소에 대한 방책 등에 두었다. 이러한 사항들은 가격, 무게 및 동력을 고려하여 각 장치의 구조와 전체 열차의 최적화는 계속적으로 수행되는 향상 실험에 기초를 두었다. 열차 무게와 관련된 레일은 축부하 한계에 가까운 전형적인 값이 나타났다. 신간선 300의 경우 고통력의 안전성에 주안점을 두었을 뿐만 아니라, 레일의 향상된 진동부하가 아닌 새로운 개념을 발전시킨 결과 하부 구조의 진동을 직접 야기시키는 열차의 무게가 확정되었으며, 그 다음으로 이 목표를 우선적으로 달성하기 위한 시스템 구조로 바꾸어야 했고, 또한 이에 일치되는 제작을 수행하도록 결정되었다. 기타사항으로 환경 보호문제가 발생한다면 산요 신간선과 도호쿠 신간선의 레일 단면과 같이 아주 좋은 레일상태에서는 300km/h 이상의 고속이 가능하다는 원칙에 근거를 두었다. 목표의 중요함을 결정하기 위하여 속도와 하부 구조의 무게 관계에 대한 정량적인 관계를 탐구하는 시험주행도 이미 완료하였다. 신간선 300의 다음 단계는 도호쿠 신간선의 최고 속도 270km/h인 열차이다. 여기에서는 일반적인 고속열차가 다른 분야의 철도 교통에서도 이용될 수 있는지에 대한 검토가 필요하다.

4.2 신간선 열차의 경량화 배경

열차의 속도가 향상되어도 철로 용력은 종전의 값을 넘지 않도록 하기 위하여서는 열차를 가볍게 제작하여야 하는데, 그 이유는 중량이 감소되면 증가되는 속도에 비례하여 상승되는 진동 용력을 상쇄시킬 수 있기 때문이다. 이런 구상을 근거로 하여 신간선 300의 축 부하는 예전의 16t이 아닌 11.3t으로 하였다. 일본 신간선 열차의 뚜렷한 특징은 터널 통과시 공기압력으로 부터 승객의 귀고막을 보호하기 위하여 차체를 공기 밀폐형으로 했다는 것이다. 신간선 열차 차체의 재료는 대부분 철강이었고, 연속적인 용접으로 공기밀폐를 했으며 동시에 원가절감도 하였다. 그러나 신간선 200 운행

구간인 도호쿠선과 죠에츠선은 알루미늄 합금이 선택되었는데, 그 이유는 눈사태의 위험으로 인하여 설비량이 확대되어 열차 전체의 중량이 증가하였기 때문이다. 따라서 이 무게 증가는 차체의 경량화로 흡수하여야 한다. 그러나 신간선 200 열차에서는 무게에 대한 목표가 달성되었으므로 알루미늄 합금은 사용되지 않았다.(그림 11)

신간선 열차에 대한 알루미늄 합금 객차의 역사를 살펴보면 다음과 같다. 1964년 도카이도 신간선 완성 직후 부터 속도를 높이는 시험 열차가 이미 연구되었다. 시험 열차인 951 모델(그랑열차)은 1969년에 제작되었고, 961 모델(6량 열차)은 1973년에 완성되었다. 최고 속도는 전자가 286 km/h, 후자는 319km/h에 도달하였다. 이 두열차는 무게를 줄이기 위하여 본체 자체에는 알루미늄 합금이 사용되었다. 이러한 기술적인 경험을 바탕으로 하여 도호쿠 신간선과 죠에츠 신간선을 위한 신간선 200 열차가 제작되었다. 그러나 당시에는 열차에 특별히 적합한 압출 성형재에 대한 알루미늄 합금이 개발되지 못했으므로 중간 자재의 역할밖에 할 수 없었다. 그러나 그후에 압출 프레스의 능력이 향상되어 넓은 판의 제작 요소가 개발되고 제작 공정수도 감소되어, 이와 연관된 무게 감소의 가능성과 공기 밀폐의 안정성을 위한 연속 용접의 가능성 등으로 알루미늄 합금은 신간선 열차에 매우 우수한 재료로 부각되었다. 이러한 주변기술을 이용하여 특별하게 알루미늄 합금 열차를 만들어 내고 또한 민영

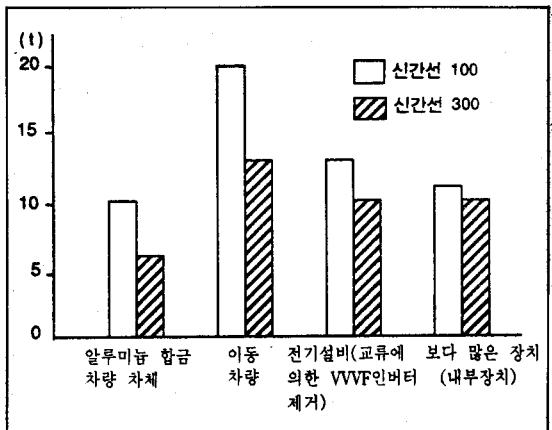


그림 11. 각 차량의 중량 비교

철도회사를 위한 차량의 사용량이 증가됨으로서 만족한 결과가 증명될 수 있었으며, 동시에 접합 작업의 간소화도 최종적으로 도달될 수 있었다. 신간선 300열차의 차체는 이미 앞에서 열거한 기술적 경험을 바탕으로 하여, 새로운 제작 방법을 이용하였다. 동시에 고속열차에 필요한 성질과 경량제작, 고강도와 고경도를 모두 이룰 수 있었다.

열차 경량화의 장점은 진동 억제는 별도로 하더라도 중요한 것은 제동력의 만화에 있으므로, 간단한 기계적인 브레이크의 도입이 가능하다. 또한 경량화는 소음 극복에도 효과적인 반응을 나타내었다. 전체적으로 보았을때 고속열차의 소음은 대부분 집전장치와 차체에 의한 공기저항으로 말미암아 발생하므로 소음에 대한 그 기여도는 크지 않다. 또한 에너지 소모의 절약, 가속력의 향상, 철로 응력의 감소등 많은 것이 경량화로 얻을 수 있는 것들이다.

4.3 신간선 300 열차의 알루미늄 합금 구조

신간선 300 열차에 대한 모든 구성 부품은 기본적으로 모든 부품의 경량화로 동력과 고속을 이루어야 했으므로 새로운 차체 모양이 되었다. 차체의 무게는 강철로 된 열차의 무게에 비하여

약 2/3밖에 되지 않는다. 시험열차는 최대 허용 축하중을 11.3t 이하라는 목표에 도달했으며 이는 곧 각각의 모든 부품이 경량 제작 방식으로 이루어졌다는 것을 의미한다.

차체의 폭은 예전 모델과 같이 3380mm를 견지하였는데, 이는 같은 용량의 수송을 예상하였기 때문이다. 높이는 더 적은 무게로 개선된 공기저항, 더 낮은 중심점에 도달하기 위하여 예전의 4000mm에서 3600mm로 낮추었다.(그림 12) 차체의 강도는 270km/h로 터널을 통과할 때에 대비하여 +7.5kpa의 압력변동에 충분히 견딜수 있도록 설계하였다. 굽힘에 대한 견고성은 1.5GNm² 이상으로 하여 안전하게 하였다. 차체의 골조에 대한 기본 구조는 그림 13과 같다. 전체적으로 차체는 압출 프레스로 성형된 대형 평판으로 제작하였다. 측벽과 지붕은 길이 방향으로 견고성을 갖도록 일체형의 프로파일로 이루어져 있으며 후레임에 용접되어 있다. 모든 프로파일은 가능하면 얇고 넓게 되도록 하였는데, 가장 큰 프로파일은 폭 600mm, 길이 24500mm, 두께 2.3mm가 되는 것이다. 외부 표면을 이루는 압출 프레스한 프로파일은 이론적으로 GNO 1(Type AlMgSi)의 후레임과 기타 보강부분은 7NO1(Type AlZnMg)의 후레임을 사용하여 제작하여야 할 것이다.

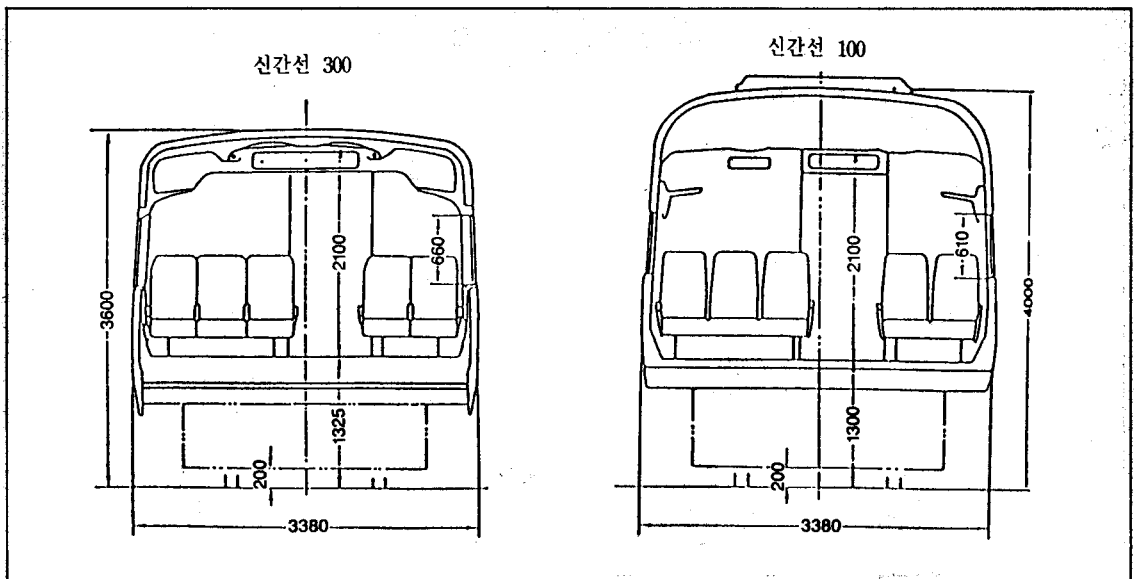


그림 12. 열차 단면의 비교

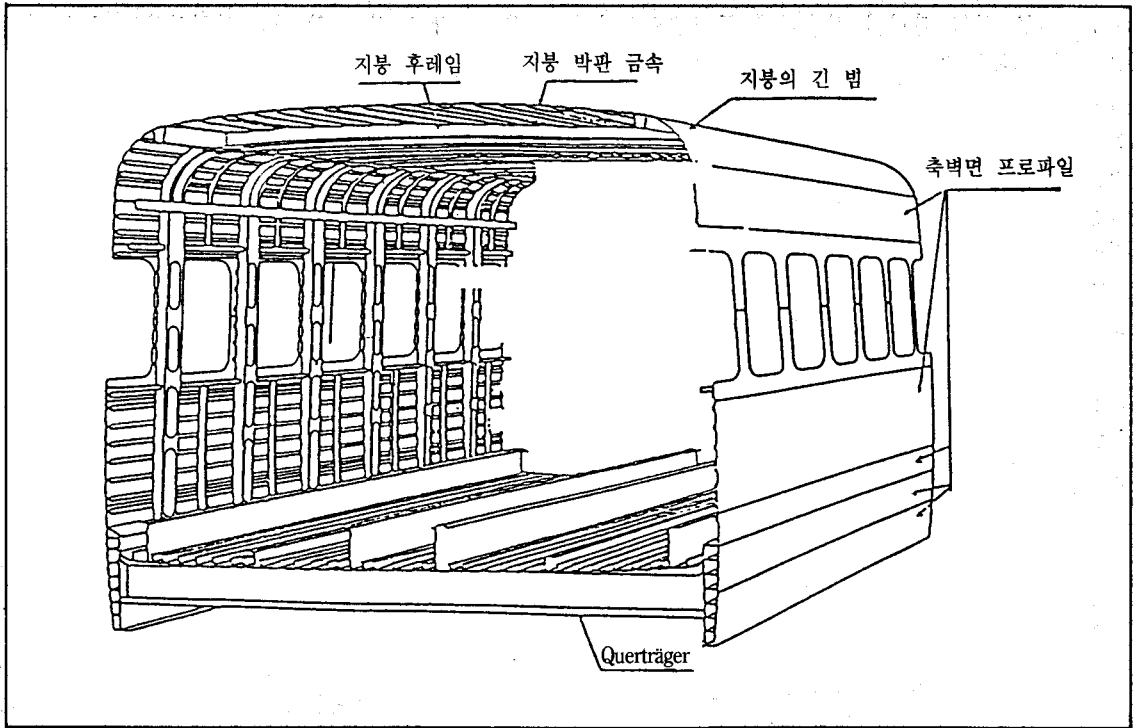


그림 13. 차체의 골조

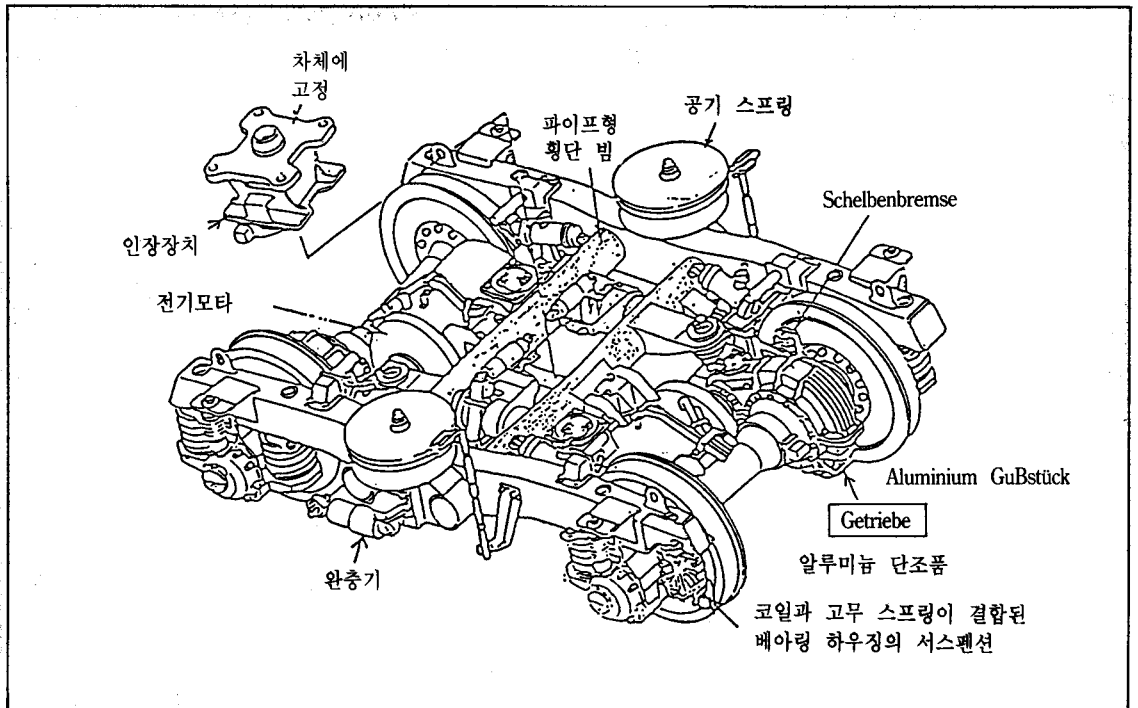


그림 14. 신간선 300에 대한 무게가 가벼운 대차의 모형

그림 14는 신간선 300에 적용된 대차(Bogie)의 이론적 스케치이다. 기어 하우징과 베어링 하우징은 무게 감소를 위하여 알루미늄 합금으로 대체함으로써 27%의 무게를 감소시킬 수 있었다. (그림 15) 또한 기존의 주철에 비하면 작동중 기어나 베어링에 약간의 열이 발생할 수 있는데, 이것은 알루미늄 합금의 좋은 열전도성에 기인한다. 의자는 회전과 젓힘이 가능한 예전과 같은 성질을 가졌으면서도 한 의자당 무게를 28kg에서 12kg으로 감소시킬 수 있었는데, 이는 1량당 12t 내지 16t의 무게 감소를 가능하게 하였다.(그림 16) 철강은 힘을 받는 곳에만 사용되지만, 무게를 줄이기 위하여 대부분의 강철은 알루미늄 합금으로 대체하였다. 종전에는 내부 창문 주위에 플라스틱 덮개로 된 것이 사용되었으나 신간선 300에서는 비닐이 씌워진 알루미늄 합금 판넬로 대체하였는데, 이는 표면 형상에 커다란 자주성을 주었으며 향후 재활용을 가능하게 하였다. 또한 바닥 밑의 전기 장치용 상자는 추가적인 중량감소를 위하여 대부분 알루미늄 합금으로 교체하였다.

신간선 300열차에 있어서 철로의 동역학적인 응력은 지금까지 사용하던 200km/h 열차와 동일하나, 소음은 레일을 25m 간격으로 측정해본 결과 75 phon 미만으로 성공적이었다. 이것은 경량 제작의 결과이며 소음 극복에 대한 기본적인 대책이 세워졌기 때문이다.

5. 고속 철도 차량에 알루미늄 합금의 적용

5.1 알루미늄 합금 개발 배경

60년대 초 알루미늄 합금 열차는 가볍고 동시에 에너지 절약형 수송 수단으로 이의 개발에 많은 관심을 가지게 되었다. 재료의 결합기술로 필수적인 용접기술은 이전에 이미 개발되어, 무리없이 이를 실제적으로 활용하는 것이 가능하였다. 재료는 조립 부품의 강도를 고려해볼때 열영향이 적게 나타나는 자경성이 있는 AlZn4.5Mg1 합금을 신뢰하였다. 그러나 이 재료는 압출성이 좋지 않

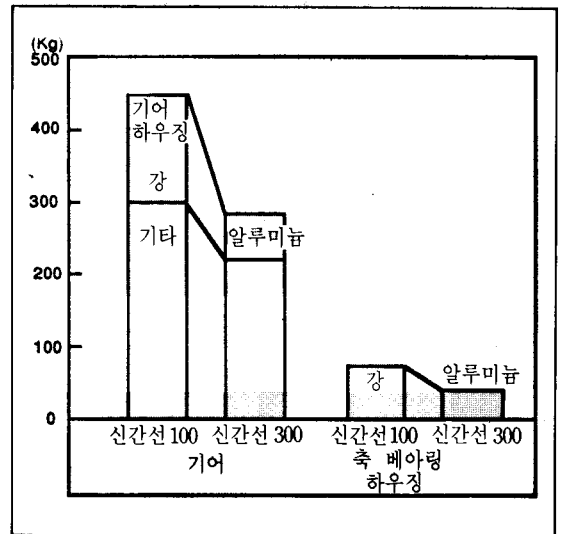


그림 15. 대차에 대한 무게 비교

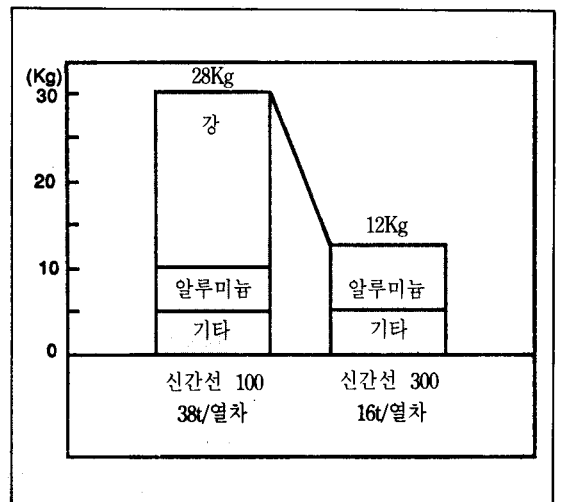


그림 16. 의자에 대한 무게 비교

아서 제조될 수 있는 프로파일의 단면 크기, 두께 및 길이 등의 제한으로 구조재로서 적합하지 못하여 기존의 철강 구조재로 사용 방향이 설정되었다. 그림 17에는 지난 25년간 철도 차량의 차체 재료로 사용되는 강과 알루미늄 합금의 제반 특성 변화를 나타내었다. 여기서 보면 알루미늄 합금이 강에 비해 가벼울 뿐만 아니라 최근에는 제조기술의 개발로 제조 비용이 저렴하고 생산성도 우수함을 알 수 있다.

그러나 알루미늄 합금 자체의 지속적인 개발과

보다 우수한 압출성 향상을 위한 노력의 결과로 70년대초 알루미늄 재료의 특징을 이용하여, 구조재로서 전 알루미늄 압출재 설계 제작법이 시도되어졌다. 따라서 프로파일 횡단면을 제작하는 것이 가능하였는데, 예를 들면 프로파일 횡단면이 800×120mm인 장방형 횡단면과 직경 600mm인 원통형 횡단면이 가능 길이는 약 23m에 달하였다. 그러나 여기에 이르기까지 개발업자와 소재 제조사 사이에 수많은 단계의 협력이 필요하였는데, 그 결과 목적된 판두께를 고려해 볼 때 아주 우수하며, 운반 구조의 중량을 현저히 낮추었다. 예를 들면 차량이 밀폐 상태로 운행되어야 할 경우, ±6000 Pa의 공기역학적인 압력에 견디어야 하고, 차량내 체적변화가 최고 2%에 달할 경우 과학 기술적으로 도달할 수 있는 판 두께는 더이상 변화시킬 수 없었다. 지난 60년간 철도 차량에 적용된 알루미늄 합금의 재질 변화를 그림 18에 나타내었다. 또한 그림 19에는 박판을 사용하여 철도 차량의 차체 구조를 제작한 1974년도의 차량설계 개념과 전량 압출재를 사용하여 철도 차량의 차체 구조를 제작한 1991년도의 차량 설계 개념을 나타내었으며, 그림 20에는 박판과 압출재로 사용된 알루미늄 합금 반제품의 일반적인 형상을 나타내었다.

전 구조부재의 알루미늄 압출재 설계 제작법의 도입은 새로운 차량 제조시 일대 전환을 필요로 하였다. 기계 가공이 많고 제작 부품이 비교적 큰 까닭에 보다 큰 규모의 가공 센터가 세워졌고, 이곳에서 대부분의 프로파일에 대한 압출, 드릴링(drilling), 형상 제작 작업등이 이루어졌다.

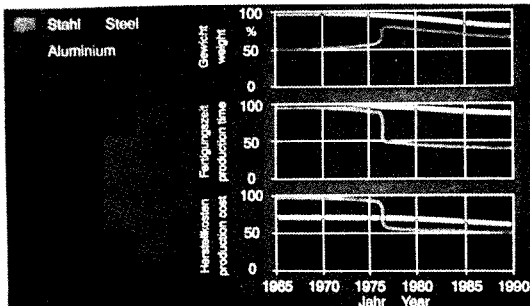


그림 17. 철도 차량의 차체 재료로 사용되는 강과 알루미늄의 연도별 제반 특성 비교

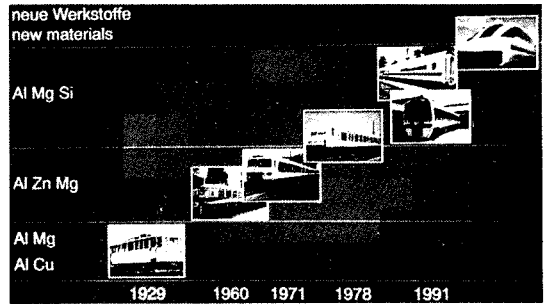


그림 18. 철도 차량에 알루미늄 합금의 적용 실례

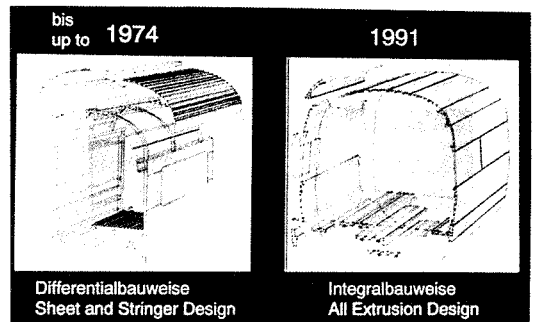


그림 19. 1974년도와 1991년도의 철도 차량 제작 개념

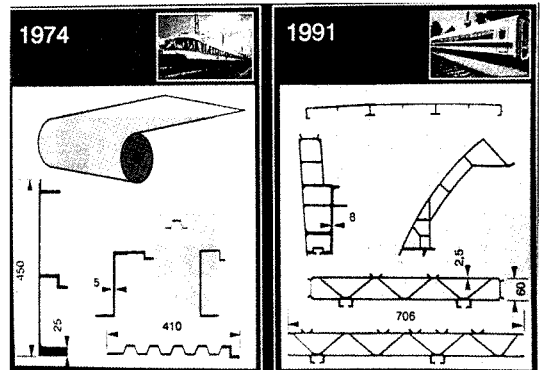


그림 20. 1974년도와 1991년도의 알루미늄 합금 반제품의 형상

5.2 알루미늄 합금의 요구 특성

오늘날 공급 가능한 복잡한 대형 압출 프로파일을 제작하기 위한 전제 조건은 AlZnMg 보다 가볍고 압출 가능한 합금을 개발사용하는 것이다. (그림 17) 그 이유는 고강도 합금으로 널리 알려진

AlZnMg 합금은 용접성이 우수하며 강도는 건축용 강재와 비슷하고 무게는 강구조물에 비해 약 절반 밖에 되지 않으므로 아주 가벼운 구조물을 얻을 수 있지만, 압출성이 좋지 않아서 대형 압출 프로파일로 제작할 수 없기 때문이다.

그러나 재료의 지속적인 발전으로 현재 일반적으로 사용되고 있는 AlMgSi 합금은 AlZnMg 보다 약 25%의 저장도를 지니지만 전부재의 압출재 설계로 차체 중량은 동급의 강구조 차체보다 약 30% 더 가볍다. 오늘날 AlMgSi 합금은 전철 제작시 세계적으로 널리 사용되고 있다. 이 재료는 우수한 성형성과 뛰어난 내부식성과 더불어 용접성 및 강도도 우수한 특성을 지니고 있다. 한편 AlZnMg 합금은 일정한 고하중이 걸리는 차량 부위에 사용된다. 오늘날에는 이들 두종류의 합금을 혼합하여 사용하거나 전량 AlMgSi 프로파일을 사용하고 있다. AlMgSi0.7(6005A) 합금의 화학성분, 기계적 성질 및 열간 또는 냉간가공된 상태에서의 가공 요령은 표 1-3에 나타내었다. 독일 공업 규격(DIN) 1748에 의하면 AlMgSi0.7은 규소와

마그네슘의 함량에 있어서 상한치가 규정되어 있지 않다. 그렇지만 규소와 마그네슘의 함량은 강도에 상당한 영향을 주므로 그림 18에는 이들 원소의 성분 범위를 나타내었다.

6. 미래의 고속 열차에 있어서 알루미늄에 대한 요구 사항과 제반 문제점

미래의 고속 열차 개발에 있어서 문제점으로 대두되는 사항들을 요약하면 아래와 같다.

첫째, 수명에 대한 문제이다. 알루미늄 합금 부품간의 연결부위에 대한 응력은 시험편으로 연구되었음에도 불구하고 이와 관련된 많은 불명확한 점들이 차체 구조에 남아있다. 고속에 도달하려면 지속적인 중량 감소가 필요하고, 또한 고속의 결과로 터널 주행시 밀폐된 열차라 하더라도 속도에 따라 압력 변화에 대한 영향은 계속 증가되지만 보다 높은 속도가 요구된다. 특히 순간적으로 나타나는 강한 압력의 변화로 인하여

표 1. AlMgSi0.7합금의 화학조성

<p>* 냉간 경화된 상태의 AlMgSi0.7재료는 그의 기계적 성질이 명기되어 있는 DIN 1748 part 1에는 규정되어 있지 않다. 다만 이는 DIN 29850의 상태표시 T4와 DIN 17007의 냉간경화 상태 51과 일치한다.</p> <p>* 열간 또는 냉간 경화된 재료의 화학성분은 모두 같으며 DIN 1725 part 1의 조성 범위내에 있고 요약하면 다음 표와 같다.</p>													
재 료		화 학 조 성, wt %										밀도 kg/dm ³	번호
기 호	번호	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn+Cr	기타		
AlMgSi0.7	3.3210	0.50	0.35	0.30	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.12-0.50	0.05	2.70	6005A
		0.9				0.7					0.15		
<p>* 주어진 화학성분에서 제시된 수치는 최대치를 뜻함. 그러므로 규정에는 중간제조자가 특수한 성질의 재료를 제조하고자 한다면, 이 화학조성 범위에서 적은량을 가감할 수 있다.</p>													

표 2. 알루미늄 합금 AlMgSi0.7의 기계적 성질

* 열간 경화된 재료의 기계적 성질에 대하여는 DIN 1748 part 1에 규정되어 있으며 요약하면 다음 표와 같다.

재 료		두께 mm	인장강도 N/mm ² (min.)	0.2% 항복강도 N/mm ² (min.)	파단연신율		브리넬 경도 HB	
					A ₅ %(min)	A ₁₀ %(min)		
기 호	번호							
AlMgSi0.7	F26	3.3210.71	1)	260(330) ³⁾	215(300) ³⁾	8	6	85
	F27	.71	2)	270(330) ³⁾	225(300) ³⁾	8	6	90

* 일정한 재료상태로 프로파일을 삽입시키기 위해서는 각 프로파일 단면의 최대두께와 지지판의 표준이 있어야 한다.

- 1) 지지대 두께 6-10mm의 full profile과 두께 10mm까지의 hole profile, 60mm까지의 봉재
- 2) Web thickness 6mm까지 full profile, hole profile, pipe
- 3) 중요한 점은 조그마한 변형에도 문제점이 발생하지 않도록 하기 위한 최대 응력한계이다.

* 냉간 경화된 재료의 기계적 성질은 공급자의 invoice에 있으며 그 내용을 다음에 요약 하였다.

기 호	상 태			규격 두께(mm)	인장강도 N/mm ²	0.2% 항복강도 N/mm ²	파단연신율		브리넬경도 HB
	DIN번호	Alusingen번호	VAW번호				A ₅ (%)	A ₁₀ (%)	
	내부식용 062 ²⁾ AlMgSi0.7	—	41				51 ¹⁾	각종	

1) 냉간가공 : 51은 또한 DIN 17007에 일치됨.
2) AWS 표시

하중을 비행기보다 더 크게 주어야 한다. 구조개선을 위하여 제작에 필요한 요구 사항들은 다시 검토되어야 하는데, 우선적으로 보다 적합한 시험 방법을 개발해야 한다.

둘째, 압출 프레스된 프로파일을 더 얇게 생산

하기 위하여 계속 연구하는 것이다. 그러나 그 프로파일의 두께를 무조건 줄여서는 안되고 강도에 근거한 목적에 적합한 두께이어야 한다. 이를 위한 지속적인 대책이 강구되어야 한다.

세째, 가격 절감을 위한 노력이다. 지속적인

표 3. 알루미늄 합금 AlMgSi0.7의 열처리 조건

경화처리 소둔처리, 담금질 및 시효처리							
재료표시	초기상태	작업상태	소 둔		담금질 및 시효처리	시효처리	
			온 도	유지시간		온 도	유지시간
AlMgSi0.7	양호	61 2)	520-540°C	1/2-1h	두께에 따라 물이나공기	155-165°C 1) 3)	8-12h 4)
1) 상기 자료는 효과적인 소둔 시간과 관계가 있음. 이는 전체적인 소둔상태가 규정된 온도에 도달되는 시간을 의미한다.(소둔 시간은 염욕에서는 짧으나, 공기회전식 oven에서는 길다) 2) 61=온간 경화(소둔처리, 담금질 및 시효처리).71 to DIN 17007 3) 온도편차 ± 5°C 4) 시효처리는 아래측 온도는 시간이 짧고 위측은 시간이 길다. 5) 굽힘작업을 하는 부분은 소둔후 담금질이 필요함. 시효처리후 DIN 강도에 다시 도달해야함. 최하 강도값은 DIN 1748. part 1에 일치해야 함.							

재료량의 생략, 골조의 각 부분을 선택된 조합에 의하여 접합작업의 간소화와 동시에 자동 용접에 의하여 보다 더 개선되고 적합한 구조설계 등을 염두에 두어야 할 것이다.

네제, 강도의 향상에 관련된 사항이다. 예를들면, 레일의 경량 제작을 위하여, 현재 사용되는 합금에 비하여 더 높은 강도를 얻으려고 노력하여야 한다.

6. 결 론

현재 중추적인 수송 시스템으로서 그 역할을 담당하고 있는 고속 철도는 점차 증가하는 수송량의 수용과 더불어 경제적인 수송 시스템의 구축을 위하여 새로운 고속 철도 차량의 개발을 위한 지속적인 노력을 요구받고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 미래의 고속 철도 차량은 알루미늄 합금을 사용하여 경량화를 달성하여야 할 것이다. 따라서 고속 철도 차량의 경량화를 위한 체계적이며 지속적인 연구는 아마도 알루미늄 합금에 대한 가치 평가를 계속 상승시킬 것이다.

알루미늄을 이용하여 구조물을 제작하는 기술 또한 계속적인 개선이 요구된다. 재료의 고강도화, 두께의 절감, 가격 저하 등 알루미늄 합금 소재 제조 관련 기술은 물론이고, 용접 및 성형, 도장 등 재료 응용 요소기술을 포함한 총체적인 알루미늄 합금에 관한 재료 기술은 미래의 새로운 철도차량 개발에 견인차적인 역할을 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J.Hermans, O.Elsner: "Der Weg vom Werkstoff zur Schienenfahrzeugkonstruktion", Aluminium Schienenfahrzeuge edited by Alexander Koewius (Hestra-Verlag (Publisher), 1992, Germany, 20)
- [2] H.Hassel: "Die Aluminiumkonstruktion der Mittelwagen des Inter City Express(ICE)", Aluminium Schienenfahrzeuge edited by Alexander Koewius(Hestra-Verlag (Publisher), 1992, Germany, 29)

- [3] L.M.Cleon: "Zur Aluminiumverwendung bei heutigen und zukünftigen TGV-Zügen", Aluminium Schienenfahrzeuge edited by Alexander Koewius (Hestra-Verlag (Publisher), 1992, Germany, 45)
- [4] M.Kimata: "Shinkansen-Züge aus Aluminium", Aluminium Schienenfahrzeuge edited by Alexander Koewius (Hestra-Verlag (Publisher), 1992, Germany, 48)
- [5] Manfred Bonisch: "Schienenfahrzeug in Aluminium-Integralbauweise", ETR, 42 (1993), H. 10, 633