

고속전철의 차체 구조 기술과 차량 경량화



고 병 천

(한국기계연구소, 시스템설계
실장)

- '71-'75 서울대학교 기계공학과(학사)
- '77-'79 한국기계연구소(연구원)
- '79-'81 서울대학교 기계설계공학과(석사)
- '81-'82 한국과학기술원(연구원)
- '82-'88 미시간 대학교 기계공학과(박사)
- '88-현재 한국기계연구소(선임연구원)



오 인 택

(현대정공 주식회사 기술
연구소)

- '76-'80 전남대학교 기계공학과(학사)
- '80-'82 전남대학교 기계공학과(석사)
- '83-현재 현대정공 주식회사

1. 머릿말

현대 고도 산업사회의 특징은 정보 교환과 자원 이동이 한꺼번에 많은 양으로 자주 일어난다는 사실이며, 앞으로도 이러한 경향이 더욱 심화될 것이다. 고속전철은 이러한 선진 산업사회의 인적 및 물적 자원의 교류 수단으로 매우 적합한 고속 육상 교통 수단이다.

고속전철은 전기력으로 구동되며, 차륜과 레일의 접촉으로 추진되는 고속 궤도 차량으로서, 한꺼번에 많은 승객을 고속으로 실어 나르는 교통수단이다. 고속전철 산업은 전기 및 제어 장치, 집전장치, 현가장치, 궤도설비 및 차량의 거의 모든 분야를 망라하는 종합 시스템의 설비 산업이기도 하다. 또한 고속전철은 국가를 대표하는 첨단기술 산업으로서, 국가 기술의 고유성, 예술적 감각성, 그리고 자긍심을 표현하기도 한다.

일반 승객들은 자신들이 탑승하는 차량을 통하여 고속 주행성, 편리함 등, 고속전철의 여러가지 특성을 체험한다. 그러므로 차량은 높은 안전성과 쾌적한 승차감을 갖도록 설계되어야 한다. 또한 차량의 설계는 고속 주행성능을 달성하기 위한 경량화와 제작경비, 운영비 등의 경제적인 문제점도 고려하여야 한다. 그러나 이러한 설계 목표들은 서로 상반되는 것으로서, 차량 설계와 제작의 초기 단계부터 어떠한 목표를 어떻게 최적화하여 달성할 것인가 하는 점을 충분히 검토하여야 한다.

여기에서는 고속전철의 차량을 설계할 때 검토되는 일반적인 사항과 그 경향에 대하여 기술하고자 한다. 먼저 제2절에서 고속 전철 차량의 구조를 살펴 본 다음, 제 3절에서는 설계 조건을

안전성, 주행성, 쾌적성, 경제성의 측면에서 기술하고자 한다.

차체의 설계 기술은 차체에 작용하는 각종 하중 및 부하 조건 등을 파악하는 것과 차체의 구조가 기본 설계 개념에서 도출된 여러가지 조건을 만족하는지를 확인하는 해석작업으로 나누어진다. 제 4절에서는 이러한 차체 구조 해석의 내용을 설명한다.

차체의 경량화는 차체 구조를 최적화하거나, 경량 소재를 활용하여 달성할 수 있다. 그러나 이러한 점들은 상호 의존하는 것으로서 새로운 경량 소재가 등장하면, 이에 따른 차체 구조도 달라지며 그 제작 기법도 변한다. 제 5절에서는 이러한 차체의 경량화 방안과 이에 따른 차체 구조 및 소재에 대하여 살펴보고자 한다. 제 6절에서 설계기술의 진보와 미래의 설계방향에 대하여 기술함으로써 이 글을 맺고자 한다.

2. 고속전철 차량의 구조

고속전철의 차량은 차량 동력 장치를 구비하고 있는 선두차와 승객이 탑승하는 일반객차로 구성된다.

일반적으로 각 차량은 상부 구조와 하부 구조로 구성되어 있다. 상부구조는 지붕, 마루, 좌우측 벽, 전후 벽의 육면체로 구성된다. 각 구성부분은 차량에 작용하는 각종 하중을 이상적으로 분담하여 하부구조에 전달하고, 동시에 힘의 집중을 가능한 한 피하도록 설계된다. 종래에는 이러한 구조물은 대부분 뼈대와 판으로 이루어진 강한 구조로써 이루어지고 있었으나, 지금은 차량의 경량화를 위하여 비행기 구조물과 같은 단일체의 셸 구조를 이루는 추세이다.

하부구조는 차량의 하중을 지탱하는 아래뼈대와 차량의 현수장치를 보호하거나 제설 등의 역할을 수행하는 치마 구조로 구성된다. 특히 아래뼈대는 승객, 차내 설비품, 동력전달 장치와 같은 무거운 기기류를 지탱하고 차량을 연결운전시 여러가지 하중을 끊임없이 받기 때문에 차체 구조에서 가장 중요하다. 따라서 아래 뼈대는 차체의 강도를 유지하기 위하여 튼튼하게 설계되고, 차체의 무게

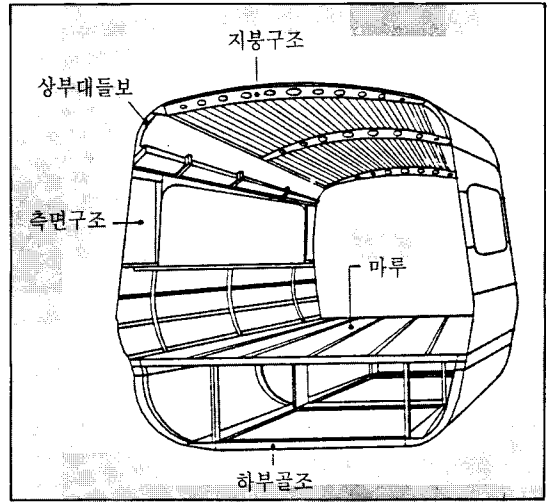


그림 1) 차체 구조의 모습(ICE 객차)

에서 차지하는 비중도 매우 높다. 지금은 가능한 모든 부재에 차체하중이 고루 분포하여 아래 뼈대에 최소한의 하중만을 분포하도록 한다. 그림 1은 ICE 객차의 차량 구조를 보여주고 있다. 그림에서 ICE 객차는 뼈대만이 아닌 모든 부재가 고루 하중을 지탱할 수 있도록 단일체 형상을 이루고 있음을 알 수 있다.

선두차는 운전실이 있고, 유선형의 앞머리를 형성하여 차량의 공역학적 특성과 고속전철의 이미지를 표현한다. 따라서 일반 객차와는 달리 선두차의 구조는 육면체의 형상에서 약간 벗어 나게 된다.

3. 차량의 설계요건

고속열차의 차체 설계의 사양은 기본적으로 승객수의 정원과 열차의 성능, 즉 속도로써 결정된다. 따라서 차체의 설계는 이러한 기본 사양을 만족하면서 동시에 안전성, 쾌적성, 경제성의 측면에서 충분한 검토가 이루어져야 한다. 고속화에 따른 차량의 경량화가 필수적이므로 고속전철의 설계에서는 기존 열차의 경우보다 훨씬 엄밀한 해석이 필요하다. 이와 같은 여러가지 특징을 고려하는 설계요건은 항공기의 경우와 크게 다르지 않다고 할 수 있다. 차량의 설계 요건을 보다 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

가) 안전성

안전성을 검토하기 위해서는 무엇보다도 차체에 작용하는 여러 종류의 하중에 대한 엄밀한 검토가 필요하다. 차체는 확인된 하중조건에 대하여 충분한 강도를 보유하고, 최소 20년의 사용수명을 보장할 수 있는 내구성을 가져야 한다. 그러나 안전성 및 내구성을 높이기 위하여 차체를 필요 이상으로 튼튼하게 설계하면, 차량의 구입비와 운용비용이 커져서 상대적으로 경제성이 떨어진다. 또한 차량은 화재와 같은 불시의 사고에 대비하여 출입구, 대피시설을 갖추어야 한다. 차체 재료의 선택에서도 이러한 점이 고려되어야 한다.

나) 차체의 크기와 차량 성능

차체의 크기는 수용승객의 정원과 부대설비의 면적으로 결정되며, 기본적인 치수는 단면 크기와 차량의 길이이다. 즉, 차체의 크기는 좌석의 폭과 좌석의 피치, 통로폭 등에 의하여 좌우된다. 이러한 차내 설비들은 동력장치와 같은 무거운 기기류의 하중분포를 고려하여 열차의 마루공간에 효율적으로 배치되어야 한다.

고속으로 주행하는 열차의 주행저항은 공력저항과 바퀴와 궤도사이의 마찰저항의 합으로 결정된다. 그중에서도 공력저항은 총 저항의 80% 이상을 차지한다고 알려져 있다. 공력저항은 보통

$$D = \frac{1}{2} C_{dp} \rho v^2 S$$

로 표현되며, 여기서 C_{dp} 는 공력저항 계수, ρ 은 공기밀도, v 는 주행속도, S 는 차체의 단면적을 뜻한다. 만약 차량의 길이를 고려하면, 공력저항은 앞머리에 의한 효과와 차량 길이에 의한 효과로 나눌 수 있다. 즉,

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S (C_{dp} + \lambda \frac{L}{d})$$

이 된다. 여기서, C_{dp} 는 형상저항 계수, λ 은 표면 저항 계수, L 는 차량 길이, d 는 유효직경을 뜻한다.

이 두 식으로부터 차량의 공력저항은 차체의 단면적의 크기에 비례하여 증가한다는 것을 알

수 있다. 그러므로 차체 단면을 크게 하여 승객 정원 및 부대설비의 양을 늘리는 것과 단면이 커짐에 따라 공력저항이 커지는 상반된 결과를 최적화 하도록 차량의 단면 설계가 이루어져야 한다. 또한 차량이 길수록 많은 인원을 수송할 수 있으나, 열차의 길이가 길수록 차량표면의 마찰저항이 증가하게 된다. 이러한 마찰저항은 차량 외피의 표면을 가능한 한 매끄럽게 하여 상당히 줄일 수 있다.

다) 쾌적성

철도차량은 자동차, 항공기 등 다른 교통수단에 비하여 여유있는 공간과 쾌적성을 제공할 수 있다. 따라서 차량의 설계에서 이러한 장점을 충분히 활용하여야 한다. 쾌적성은 차창, 공조 설비, 조명 및 채광 시설 등 여러가지 부대 설비와 그 배치에 좌우된다.

고속열차는 업무용 승객의 빈번한 이용이 예상되므로, 이들의 편의를 위하여 전화, FAX등의 고급 통신시설, 정보시설 등이 필요하다. 장애자의 탑승을 고려하여 통로와 편의시설 등, 열차의 내부공간을 효율적으로 설계할 필요가 있다.

그러나 차량은 이러한 설비들의 배치가 차체의 강도를 감소시키지 않도록 총체적 설계가 되어야 한다. 차량의 설계는 소음과 진동을 최소화하여 승객의 불쾌감을 최소화 한다. 특히 차량의 경량화는 다음 절에서 설명하는 바와 같이 차체 진동과 소음에 나쁜 영향을 준다. 그러므로 차체 강성의 설계나 소재의 선택은 이러한 점을 고려하여 이루어져야 한다.

라) 차량의 기밀

열차가 고속으로 터널을 통과하거나 두 열차가 서로 스치고 지나갈 때 열차내에서도 큰 압력변화가 일어난다. 이러한 압력변화는 승객에게 큰 불쾌감을 유발할 수 있다.

이러한 현상을 방지하기 위하여 차체에 완전한 기밀시설이 필요하다. 차내 환기장치의 흡입구와 토출구의 압력차를 높여서 차내 대기에 대한 외부 압력의 변화에 의한 영향을 최소화할 수도 있다. 압력변화는 배수에도 영향을 주므로, 특별한 번기나 식당차의 오수 배출 설비도 필요하다. 이와

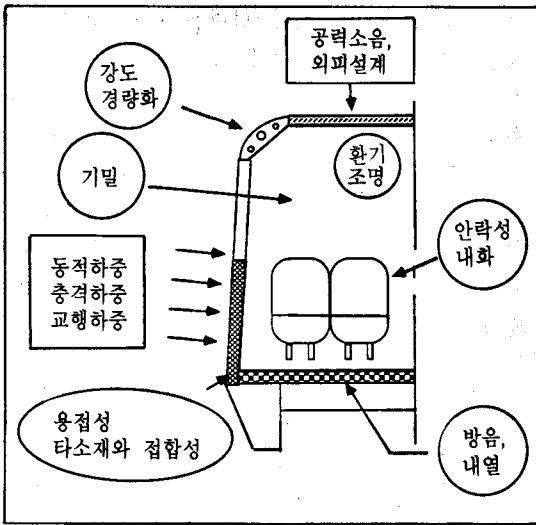


그림 2) 차체의 설계조건

표 1) 차체설계의 기준

구분	주요내용
강도	안전성과 내구성에 대한 충분한 강도를 가진 구조
경량	열차의 고속화, 고성능화에 따르는 경량 차체구조
고강도	승차감의 측면에서 한계강성이 높은 차량구조
기밀성	터널 주행시 외부압력변동의 영향이 최소인 내부 기밀구조
내화·내열성	화재 등에 대비하여 열에 강하고 안전한 재질
경제성	낮은 제조비용 및 유지보수비용

같은 기밀은 출입문, 통로의 접속부에서도 이루어져야 한다.

차체가 철제인 경우 부식에 의한 공기누설이 생길 수도 있으므로, 차체 부식에 대한 주기적인 검사가 필요하다.

라) 경제성

경제성은 차량의 제작비 외에도 운전기간의 보수비 및 운영비도 함께 고려하여야 한다. 따라서 차체 구조는 가능한 한 가볍고, 보수의 필요성이 적어야 하며, 내식 재료를 사용하여, 동력비용과 궤도유지비를 최소화할 수 있도록 설계되어야

한다.

그림 2는 이상과 같은 차량을 설계시 고려할 사항을 보여주고 있으며, 표 1은 이러한 차체 설계조건을 요약한 것이다.

4. 차체의 구조해석

앞 절에서 설명한 바와 같이 차량의 최적화는 구조물의 무게를 줄이되, 안전성과 운전부하의 요구사항, 경제성을 동시에 만족하도록 이루어져야 한다. 이와 같이 서로 상반되는 여러가지 조건을 만족하는 고속열차의 차체를 설계하기 위하여, 고속열차의 설계 해석은, 기존 차량의 경우와는 달리 수작업 설계 해석법이 아닌, 항공기 등의 설계에서 활용되고 있는 전산기를 이용한 새로운 강도해석법을 사용한다.

대형의 컴퓨터를 사용한 유한요소법을 활용하면, 종래의 평면적인 2차원의 해석에서 벗어나, 3차원 구조물로서의 입체적인 차체 강도해석이 가능하다. 설계 단계에서부터 수직, 압축, 휨 등 각종의 하중에 대하여 차체와 각 부분의 강도 및 강성을 매우 정확하게 예측할 수 있다. 전산 해석용 유한요소 프로그램으로는 NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, DYNA, PAM/CRASH 등 여러가지 구조해석 프로그램이 있다. 설계 해석의 주요 내용으로는 정적하중에 대한 강도 해석, 동적하중에 의한 강성 해석, 수평 하중의 압축력에 의한 좌굴 해석, 그리고 내구성 검토를 위한 피로 해석 등이 있다. 또한 충돌과 같은 돌발적인 사고에 대해서도 정확도가 높은 해석이 가능하다.

이와 같은 구조해석을 거쳐서 제조한 차체의 골조는 하중시험을 수행한 후, 최종 실험값과 계산값을 비교하여 차체 강도상의 문제점을 점검하고, 필요한 보완 작업을 거쳐 생산한다. 표 2는 현재 운행되고 있는 각종 고속전철에 대한 차체 설계의 강도 기준이다.

4.1. 고속열차의 차체에 작용하는 하중

차체에 작용하는 하중은 승객과 기기등 적재물에 의한 정적 하중과, 주행중에 차체에 가하는

표 2) 각 고속열차의 하중조건 및 강도기준 비교

구 분	TGV-A	신간선 300계	ICE
차체재질	기관차 : 고장력강 객차 : 고장력 동합금	압출 알루미늄 합금(Al-Zn-Mg)	기관차 : 아래골조-탄소강 측면 -SS강 객차 : 압출 알루미늄 합금(Al-Zn-Mg)
수직하중	대차 장착하에서 들 어울리는 하중		
전후 압축하중	U/F : 200 ton Shield Pressure면 : 70ton Cab Girdle : 70ton Roof : 30ton	Coupler center : 12-ton	U/F : 200 ton
허용한계	항복점 이내		40ton 하에서 처짐이 없을 것 70ton 하에서 변형이 없을 것
기 타	기관차는 전방충돌 에 대한 안전구조		

동적 하중으로 분류되며, 부하의 방향에 따라 일반적으로 상하 하중, 좌우 하중, 전후 하중 및 비틀림 하중으로 나뉜다.

정적하중은 차체의 중량, 차체에 장치된 계기의 중량, 승객의 중량의 총합으로 계산되며, 대부분 수직 하중이다. 이하중은 아래골조의 강도를 검토하는 기초 하중으로서, 동적 상태일 때는 상하 진동가속도로써 0.1~0.3G를 할증한다.

상하방향의 동적 하중은 주로 주행중의 상하 관성력에 의하여 발생하며, 대차의 용수철계의 좋고 나쁨에 의해 상당한 차이가 있다.

전후방향의 동적하중은 주로 편성주행시의 연결운전중에 발생하며, 인장력과 압축력의 수평하중으로서 반복적으로 가해진다. 그의 차량 충돌시의 차단 충격에 큰 수평하중을 받기 때문에, 운전보안 기준을 정하여 강도 설계를 한다.

좌우방향의 하중은 측면 충돌, 측면 바람의 힘, 주행중 좌우진동 등이 있다. 좌우 방향의 동적하중은 주로 차량이 곡선을 통과하거나 노선상태가 나쁜 경우에 차체에 대한 비틀림 하중으로 작용한다. 열차의 차체는 장곡구조로서 비틀림 강성이

높아 이러한 문제를 쉽게 해결할 수 있으나, 고속열차인 경우는 상대적으로 중요성이 증대하므로 이 점을 반드시 고려하여야 한다.

4.2. 차체구조의 정적 강도해석

차체는 4.1절에서 설명한 여러가지 힘에 대한 충분한 강도를 가져야 한다. 일반적으로 차체의 강도는 차체의 아래뼈대에 작용하는 압축하중과 수직등가 하중에 의하여 평가된다. 그러나, 차체의 강도가 허용범위내에 있더라도, 차체의 강성이 낮으면 주행 진동의 진폭이 커져서, 강도에 나쁜 영향을 주고 동시에 승차감이 나빠진다. 그러므로 차체의 설계에는 강도와 강성을 함께 고려하여야 한다.

4.3. 차체구조의 동적 강성해석

차체의 강성은 굽힘 고유진동수에 의하여 평가되며, 고속 차량은 보통 10Hz이상의 차체 굽힘 고유진동수를 보유하도록 설계된다. 굽힘 고유진

동수는 보통 1-2Hz의 차체 상하진동 고유진동수와 6-9Hz 부근의 대차의 상하진동과 피칭 고유진동수로 구분된다. 만약 궤도상태가 나쁘면, 대차의 2차 현수장치의 고유진동수가 낮아야 한다. 인체의 진동에 가장 민감한 고유진동수가 4-8Hz이기 때문에 차체의 굽힘 고유진동수는 8Hz이상이어야 한다.

현재 운행되고 있는 고속전철은 모두 독자적인 자체규정에 따를뿐, 일반적으로 받아들여지는 차체강도와 강성조건에 대한 설계한계나 규정은 없다. 차체 중앙부의 처짐량의 한계로서도 독일의 경우 유일하게 '여객차의 처짐량은 소정의 하중에 대하여 지지점간 거리의 1/1000을 넘지 않도록' 규정하고 있다.

4.4. 차체의 피로파괴 해석

차량 구조물은 20년 이상 장기간 사용되므로, 이를 위한 각 부품의 내구성을 확보하여야 한다. 비록 작은 크기라 하더라도 인장력과 압축력이 반복하여 오랜 기간동안 작용하면 구조물에 부분적으로 균열이 발생하고, 균열이 진전되면 마침내 전체 구조물이 갑작스러운 파괴에 이르게 된다. 따라서 차량의 안전성을 확보하기 위해서는 이와 같은 균열발생과 균열진전에 대한 피로 파괴해석을 반드시 수행하여야 한다. 피로/파괴해석은 강도해석의 결과와 Goodman 도표를 이용하거나, 유한요소법의 전산해석용 프로그램을 사용하여 수행할 수도 있다.

4.5. 차체의 좌굴 및 충돌 해석

길이 방향으로 긴 구조로 되어 있는 차체는 수평하중에 의하여 좌굴이 일어날 가능성이 있다. 좌굴 해석은 강도 해석의 결과를 이용하여 좌굴의 모드와 임계하중을 구할 수 있다.

고속차량의 차체는 차량의 충돌시 차체의 영구변형이 없이 충분한 구조 강도를 유지하여야 한다. 또한 고속으로 주행하는 고속전철은 외부에서 날아오는 자갈등과 충돌하여 주행의 안전성에 영향을 줄 수 있다. 이러한 충돌은 고가의

차량을 이용하여 직접 실험으로 평가하기 보다는, 모의 해석 실험을 이용하여 수치적으로 충돌 현상을 재현해 보는 것이 좋다.

5. 차량의 경량화 방안과 차체 구조

고속전철의 설계에 있어서 주행성능을 향상하기 위하여 차량의 경량화에 대한 많은 노력이 경주되고 있다. 차량의 경량화를 통하여 얻어지는 효과는 다음과 같다.

- 주행 최고 속도의 증가
- 주행에 필요한 에너지 감소로 인한 운용 비용 절감
- 궤도와 차량 각 부에 작용하는 힘의 감소로 인한 보수 유지 비용의 절감
- 궤도와 차량의 각 부품의 수명 연장
- 건설비 절감

차량의 경량화의 목표는 차체구조를 최적화하거나 경량 소재를 사용하여 차체를 제작함으로써 달성될 수 있다. 그러나 사용되는 경량 소재에 따라 차체 구조와 공법이 달라지기도 한다. 차량 내부의 각종 부대설비를 경량화하거나, 그 배치를 집중, 단순화함으로써 약간의 경량화가 이루어 질 수도 있다.

따라서 차체는 차체구조의 최적화, 경량 소재의 사용, 그리고 내부설비의 경량화, 설비 배치의 최적화 등, 여러가지의 목표를 개개 요소와 총체적인 시스템으로서 경량화 되어야 한다.

5.1. 차량 경량화의 문제점

차량의 경량화를 추구할 때에도, 차체에 대한 안전도, 쾌적성, 경제성의 기본 요건을 만족하여야 한다.

경량 차체는 차체가 측면 바람에 의하여 넘어 지지 않도록 작은 공력 계수를 가져야 한다.

주행중 차체가 공명을 일으키지 않도록 충분한 강성이 필요하다. 차체의 두께를 감소하면 단일이나 소음차폐가 어렵다. 이를 방지하기 위하여 이중벽을 설치하거나 부가적인 단열재나 흡음재를 사용한다.

차체의 경량화를 위하여 새로운 소재를 사용할 경우, 소재의 내화성, 내연성 등을 충분히 고려하여야 한다. 또한 일반적으로 새로운 소재는 많은 재료비가 소요된다. 이러한 점은 가공이나 조립 공정을 단순화하여 비용 상승분을 줄일 수 있을 것이다.

동일한 재료라 하더라도 경량화를 시도하면, 부수적인 제조 경비가 소요되기 마련이다. 따라서 공정 방법과 설계를 검사하고 개선하여 이를 줄이도록 한다.

운용기간도 경제성의 한 요소이므로 차량의 유지비도 고려하여야 한다. 최근에는 공학 기술이나 차량 및 내부 설비의 스타일링의 변천 속도가 빨라서, 완전 수명기간에 이르기 전에 차량이 진부하게 느껴질 수도 있다. 이러한 경우, 차량의 소재로서 비싼 구조재보다는 내부 구조를 단순하는 편이 낫을지 모른다.

5.2. 스테인레스 차체

스테인레스재는 비중에 비해서 강도가 매우 높아서 효과적인 중량 감소를 피할수가 있다. 뿐만 아니라 내식성이 좋아서 보수비 측면에서도 유리할 뿐만 아니라 강도 한계까지 부재를 얇게 할수 있어야 경량화 효과를 이중으로 얻을 수 있다. 즉, 스테인레스 차체가 경량화 재료로 사용되고 있는 이유는 에너지 절감과 보수 비용 절감 및 제조비용 절감 등의 기본적인 경량화 목적에 전반적인 우위성을 갖고 있기 때문이다.

스테인레스재의 주요 장점은 다음과 같다.

① 경량화:

스테인레스강의 비중은 보통강과 거의 같으나 항복점은 2.5배 정도 크므로, 적절한 강도를 유지하면서도 효과적인 중량감소를 피할 수 있다.

② 내식성:

내식성이 좋아 도장의 필요성이 없고 보수비가 작게들며 부식을 고려하지 않고 강도 한도까지 부재를 얇게 할수 있어야 경량화 효과가 크다.

③ 미관:

무도장 표면의 광택이 매우 양호하다.

이와같은 장점을 갖고 있는 스테인레스 차량은 최근의 컴퓨터를 이용한 강도계산의 정확도 향상 등에 힘입어 알루미늄 합금의 중량에 접근할 정도로 경량화가 급속도로 진행되고 있다. 그러나 보다 폭 넓게 경량화 재료로서 활용되기 위해서는 다음과 같은 사항들이 개선 되어야 할 것이다.

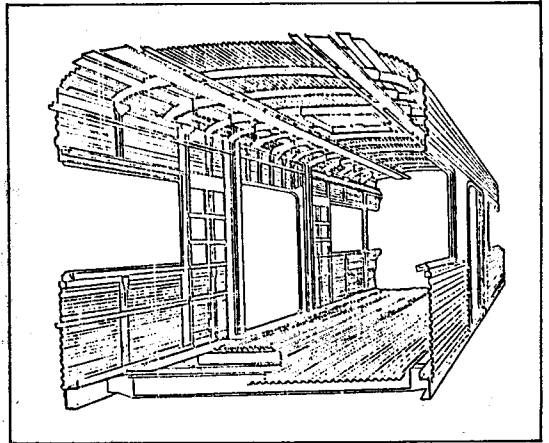


그림 3) 스테인레스 차량의 차체구조

① 고강도이면서 높은 종탄성 계수를 갖는 재료의 개발:

강도에 비해서는 종탄성 계수가 낮아서 강도비 만큼의 경량화가 곤란하므로 높은 강성을 유지할수 있는 고강도, 고종탄성계수 재료의 개발

② 아크용접이 가능한 고강도 재료의 개발:

용접성이 보통 강재보다 좋지 않아서 주로 스폿트 용접을 사용하고 있으나 기밀 등을 요하는 구조에 있어서는 이의 적용이 곤란하므로 아크 용접이 가능한 고강도 재료의 개발과 용접기술의 연구가 필요하다.

③ 보다 저렴한 재료의 개발:

스테인레스 강재의 가격은 알루미늄 합금에 비해서는 싸지만 일반 철강에 비해서는 높은 편이므로 보다 싼 재료의 개발이 필요하다.

④ 곡면 가공성의 향상:

초기에 비해서는 공작성이 많이 향상 되었으나 아직도 곡면 가공 등의 측면에서

보통강에 비해 가공성이 많이 떨어진다. 스테인레스 강은 보통강에 비해서 인장력의 크기가 2배 이상이므로 1/2 이상의 경량화 가능성이 있으나, 종탄성계수 E가 약간 작으므로 이를 감안하여 경량화를 수행하여야 한다.

5.3. 알루미늄 합금 차체

알루미늄 합금은 비중이 매우 낮아서 경량화 측면에서 가장 유리하며 연속용접에 따른 기밀성의 확보가 용이하고 보수비 측면에서도 유리하다.

알루미늄 합금 차체의 주요 장점은 다음과 같다.

① 경량성:

철도 차량의 차체에 알루미늄합금을 사용하는 주요 이유는 경량성에 있으며 강재차와 비교하면 구체 중량 기준시 50%이하 까지도 줄일수 있다.

② 내식성:

알루미늄합금의 내식성은 종래의 보통강에 비해 우수하며 차체의판 등을 무도장으로 사용할 수 있다.

③ 공수 절감 및 기밀구조 제작용이:

알루미늄 압출재를 이용하므로 공수 절감과 기밀구조의 제작이 용이 해진다.

알루미늄 합금이 현재는 대표적인 경량화 재료로 활용되고 있는 것은 사실이나 좀더 보편적으로 활용하기 위해서는 다음과 같은 사항이 개선되어야 한다고 사료 되어진다.

① 강성:

강성이 작아서 이를 보상해야 하기 때문에 경량화 효과가 그만큼 줄어든다.

② 표면 세척:

무도장의 경우 표면이 더러워지면 부식의 원인이 되므로 정기적으로 적절한 세척에 의한 부식 방지가 필요하다. 통상 알루미늄 합금의 차체외판은 Brushing으로 마무리 한 뒤 정기적으로 세정을 행하는 경우가 많다.

③ 압출재의 생산 곤란:

알루미늄 합금 재료는 철강재료에 비해서 재료비 및 가공비가 높으므로 압출 형재를

이용해서 가공비를 낮추는 것이 바람직하다. 그러나 대형 압출재를 생산하기 위해서는 대규모의 압출기가 설치되어야 하므로 설비 투자비가 많아져서 수요가 작은 경우 생산 설비를 갖추는 일조차 어려워진다.

④ 용접성:

용접성이 보통 강재보다 좋지 않으므로 용접기술의 개발과 연구가 필요하다.

⑤ 가격:

알루미늄 합금의 가격은 보통강의 가격보다 몇 배에 달하고 또한 스테인레스에 비해서도 높다.

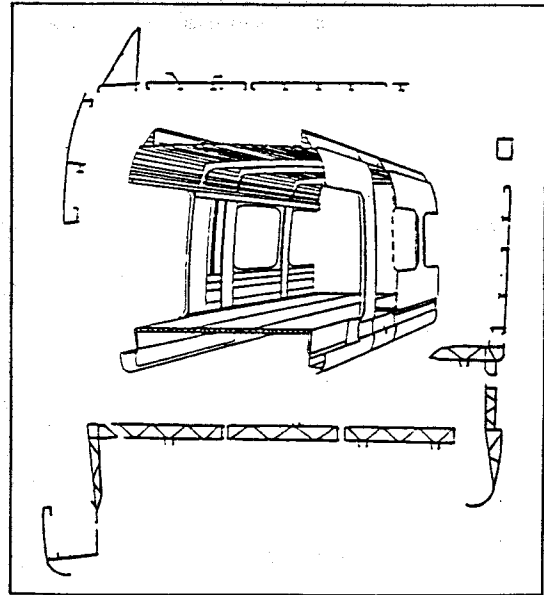


그림 4) 알루미늄 차체와 사용 압출재(Alusuisse 차량)

알루미늄 합금재 차체를 강재차의 경우와 강도와 강성에 대해서 비교하여 보면, 강도 중량비는 알루미늄 합금이 보통강에 비해 2-4배 정도이므로, 1/2-1/4 정도의 경량화 가능성이 있다. 그러나, 종탄성계수 E가 약 1/3정도이므로 이 배수를 그대로 적용하기에는 강성의 관점에서 문제가 있다.

따라서 경량화를 이루기 위해서는 강성을 어느 정도 희생하지 않으면 안되나, 강성을 희생시키지 않고 경량화를 도모하기 위해서는 알루미늄 합

금재의 적재적소의 사용과 단면 2차 모멘트 I와 단면적 A를 효과적으로 조화시키는 설계가 필요하다.

5.4. Hybrid 차체

하나의 구체안에 여러가지 재료를 혼합해서 사용할수 있다면 각각의 재료가 갖는 장점을 모아 갖는 이상적인 구체가 만들어질 수 있다. 이러한 구체를 Hybrid 구체라고 하는데, 최초로 일본에서 알루미늄 합금과 스테인레스 강으로 조합한 구체를 실현하였다. 이 구체는 알루미늄 합금의 경량성, 고기밀성과 스테인레스강의 고강도, 내화성, 내열성을 특징으로 갖는다. 지금까지는 구체제조 기술이 용접기술에 의존하였고 이중 금속간의 박판 용접 기술이 개발되지 않은 관계로 이렇게 전면적으로 이중금속을 조립시킨 구체는 존재하지 않았다.

Hybrid 구체의 기술적 특징은 알루미늄 합금과 스테인레스라고 하는 異種金屬의 접합에 있다. 통상 이러한 접합에는 볼트 등을 이용한 기계적 접합과 Clad재 등을 이용한 용접접합의 두가지가 있다. 볼트나 리벳 등을 이용한 기계적 접합은 기술적으로는 문제가 없으나 구멍가공 등의 공정이 별도로 필요하고 용접과 비교할때 기밀처리, 전기적 부식 방지 등의 곤란한 점이 많다. 반면 異種 금속의 접합개소에 Clad재를 배치하고 동종 금속끼리를 Clad재의 양측에서 용접하는 방식은 이미 선박 등에도 사용한 경험이 있고 강도와 경량화 측면에서도 유리하다고 판단되어 Hybrid 구체의 제작에도 이를 적용하였다. 알루미늄 합금과 스테인레스 강과의 접합개소에 배치할 수 있는 Clad재로서 가능성이 있는 것은 폭착재, 확산 접합재, 롤 압연재 등이 있으며 이중 폭착재가 강도나 다른 여러 측면에서 가장 적합한 구조로 선정되었으며 폭착재는 서로 다른 두 금속을 폭착의 폭발 압력 등으로 한순간에 접합하는 방식으로 접합된 Clad재를 의미한다.

알루미늄과 스테인레스로 이루어진 Hybrid 구체의 적용 가능성은 어느 정도 입증되었다고 할 수 있으나 향후 실용화를 위해서는 다음과 같은

과제가 보다 더 깊게 연구되어야 할 것이다.

- ① 강도와 강성의 개량:
- ② 열팽창 계수의 차이로 인한 문제점 검토: 알루미늄 합금이 스테인레스에 비해 선 팽창 계수가 15배정도 크므로 온도 변화시의 접합부 거동 조사
- ③ 내후성 확인: Clad재 단면의 전기적 부식에 대한 방식 처리의 내후성 조사
- ④ 경제성 평가: Clad재가 고가인 관계로 재료비가 높아 지나 양산 단계에서는 공수를 감안하면 알루미늄 합금구체 비용 이하까지 절감이 가능하다고 사료됨.
- ⑤ 운전 및 보수 비용의 평가:

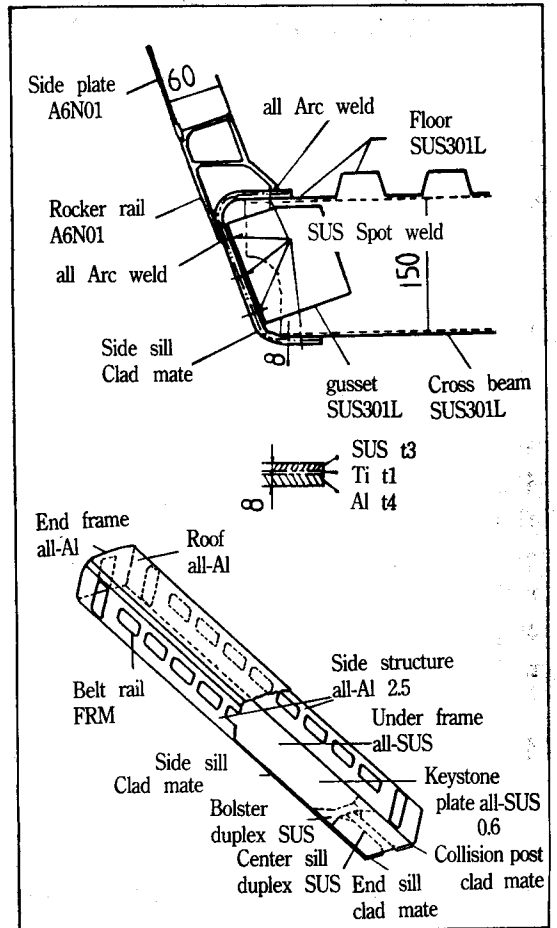


그림 5) Hybrid 차체의 부재배치

5.5. 복합재료 차체

일반적으로 플라스틱이나 섬유강화 복합재료는 경량화가 필수적인 승용차, 항공기, 우주 구조물 등에서 널리 활용되고 있다. 이러한 경향과 더불어 고속전철의 차체 재료로서 기존의 금속재료가 아닌 플라스틱을 모재로 삼는 복합재료 차체에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 특히 선두차는 공력학적 유선형인 앞머리 부분을 복합재료 몰딩 기법을 활용하여 단일체로 제작하고 이를 금속체의 다른 부분과 접합하는 복합구조로 된 경우도 있다.

복합재료 자체의 가장 큰 장점은 단일체로 만들 수 있다는 점이다. 즉, 일반적인 금속재 차체는 여러 조각의 부분을 따로 제작하여 이들을 서로 용접하여 이루어지지만, 복합재료 차체는 한 조각으로 몰딩하여 제작될 수 있다. 이와 같은 몰딩 구조의 복합재료 차체는 차체의 경량화 이외에도 공력저항의 감소, 차체 음향특성의 향상, 안전성의 증가, 그리고 내식성의 향상 등과 같은 잇점이 있다.

그러나 복합재료 차체와 기존 금속재 차체는 그 공법과 재료의 특성이 서로 다르므로, 금속재 차체에서 사용하는 전통적인 설계기법과 완전히 다른 설계에 대한 가정이나 개념이 필요하게 된다. 구조 특성에 대한 경험과 지식이 부족한 신소재로 구성된 차체는 시제품을 제작하기 전에 검토하기 위하여야 한다. 이러한 설계 기법으로서 전산기를 활용한 CAD/CAM 엔지니어링 기술이 매우 유망하다. 금속재료와 복합재료의 복합구조체인 경우에는 기본적인 하중은 금속부재가 받도록 하고 비틀 강성은 복합재가 받도록 할 수도 있다. 이러한 복합구조체에서는 금속과 복합재료 사이의 접합에 대한 효율적인 기술이 필요하다.

복합재료의 단점은 그 기계적 특성이 제작 공정에 매우 좌우된다는 사실이다. 새로운 재료에 대해서는 구조재로서의 적합성을 판단하기 위하여 재료 특성의 일관성과 신뢰성 평가를 완벽하게 하지 않으면 안 된다. 또한 복합재료의 제작에 있어서 경제성과 생산성에 대한 충분한 평가가 필요하다.

기본 재료가 플라스틱 계통인 복합재료를 사용할 때는 차량의 화재와 같은 돌발적인 사고에 대한 안전성을 반드시 고려한다. 즉, 화재와 같은 사고에서 열에 강하고, 쉽게 붙에 타지 않으며, 독연기를 내뿜지 말아야 한다. 이러한 내연재료로서는 페놀 레이진과 같은 재료가 있다.

6. 맺음말

이상에서 고속 전철의 차량 구조, 설계 요건, 각종 부하 조건, 구조해석 기법, 그리고 차량 경량화 방안과 차체 구조 등에 대하여 살펴 보았다.

현재 시속 250km에서 시속 300km 정도의 고속전철이 앞으로는 시속 350km 이상의 초고속이 될 것으로 예상되고 있다. 이러한 고속 차량의 설계는 더욱 기술적 진보의 전환점에서 있다고 할 수 있다. 즉, 미래에는 더욱 가볍고, 효율적이며, 안전하고 쾌적한 초고속 열차가 시도될 것이다. 이미 선진외국에서는 미래의 열차를 설계함에 있어서 새로운 소재를 사용한 차체 구조의 경량화, 고도화된 전산기술, 여러가지 기술을 종합하는 동시 설계 기술이 활용되고 있다.

그러나 이와 같은 고속차량에 대한 설계 목표는 과거의 전통적인 설계 경험과 제작 방식만으로는 이룩되기 어렵다. 현재 항공기, 승용차, 선박과 같은 기타 교통기관의 설계에 사용되고 있는 전산 설계 및 모의 해석은 보다 가볍고, 보다 빠르고, 보다 효율적인 고속 차량을 설계하기 위한 매우 적절한 방법이라고 할 수 있다. 즉, 고도의 CAD/CAM/CAE 기술과 슈퍼컴퓨터와 같은 대형 전산기를 활용함으로써,

- shading, rendering 등의 화상처리 기법을 이용한 삼차원 형상의 개념 모델과 스타일링 구성
- 삼차원 형상에 대한 설계 도면 작성
- 새로운 소재의 물성에 대한 예측
- 각종 하중과 부하를 건디면서 동시에 경량화된 차체의 최적화

등과 같은 여러가지 설계 작업을 일관되게 수행할 수 있으며, 또한 설계 개념에 따른 제작 기술의 최적화도 동시에 달성할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 고병천, 구정서, 권오건, “기존 고속전철의 속도 향상 한계에 영향을 미치는 차체 구조 기술 연구”, 국가특정연구 결과 발표회 논문집, 고속전철 기술개발 지원단, 1991
- [2] 이학수, 오인택, 이경룡, “각국 경량차체의 개발 동향에 관한 연구”, 국가특정연구 결과 발표회 논문집, 고속전철 기술개발 지원단, 1991
- [3] “Trains of thought”, Milestones, Control Data Co., 1991. 8
- [4]鈴木康文, 阿久津勝則; “車輛構體における新しい試み”: R.R.R; vol. 46, No. 7, (1989. 7), pp. 15~20.
- [5] 大石, 不二不; “鐵道の新素材の應用—高分子材料の應用開發事例中心に”: 日本機械學會誌, vol. 93, No. 854(1989), pp. 56~61.
- [6] Tomihiko Teramoto: The progress of Welded Structures of Aluminium Alloys—鐵道車輛”; 銲接學會誌: vol. 53, No. 3(1984), pp. 28~31.
- [7] 長野眞一; “車輛の輕量化”; 電氣車の輕量化”; 電氣車の科學; vol. 41, No. 5(1988. 5), pp. 38~40.
- [8] Tomozo Go; “The Progress of Welded Structure of Aluminium Alloys”; 銲接學會誌 vol. 53, No. 3, (1984), pp. 120-127.
- [9] M. Chambadal; “Vehicle Body Design and the UIC’s International Contribution”; Railway Vehicle Body Structures; IMechE CONFERENCE PUBLICATIONS 1985-10, pp. 1-12.
- [10] P.J. Hodgson, D. Forsey; “The Design for a Lightweight Inter-city Coach Structures; Railway Vehicle Body Structures; IMechE CONFERENCE PUBLICATIONS 1985-10, pp. 61-70.