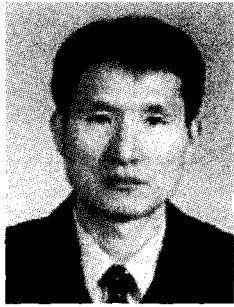


# 스테인레스강

## 철도차량 차체 설계 기술



서승일  
한국철도기술연구원  
책임연구원

### 1. 서론

연강(mild steel)은 철도차량 차체의 주요 재질로 오랫동안 사용되어 왔으며, 다양한 강도 특성과 저렴한 가격, 용이한 작업성등의 이유로 현재까지도 널리 적용되고 있다. 그러나 연강은 부식에 취약하므로 도장작업이 필수적이고, 부식에 대한 여유로 인해 판두께의 감소가 제한적이므로 경량화가 곤란하고, 정기적인 유지보수가 필요한 단점이 있다. 반면에 스테인레스강(stainless steel) 판재는 내부식성이 강하므로 무도장이 가능하고, 차체의 내구 수명이 증가하며, 유지보수가 편리하다는 장점이 있다. 또한 내부식성과 고강도 특성으로 차체 판재의 두께 감소가 가능하므로 경량화에 유리하고, 차체 표면의 다양한 표면처리가 가능하므로 외관의 미려함을 높일 수 있다. 스테인레스강은 연강에 비해 상대적으로 고가의 재질이지만 유지보수 측면과 경량화에 따른 운행비용 측면에서 볼 때 철도차량 차체의 재질로서 유용성을 가지고 있어 활발히 적용되고 있다. 국내에서는 1990년대초 과천선 전동차를 시작으로 스테인레스강 철도차량이 본격적으로 개발되어 상용화되었고, 새마을호를 비롯한 객차에도 스테인레스강 차체를 적용하고 있다. 국내의 스테인레스강 철도차량 제작 기술은 이제 상당한 수준에 올라와 있으며 차량의 해외 수출은 물론 기술 이전도 활발히 진행되고 있다. 본 강좌에서는 스테인레스강 철도차량 차체의 특성과 함께 설계 방법을 정리하여 봄으로써, 향후 스테인레스강 철도차량 차체의 개선 및 발전을 위한 기초로 삼고자 한다.

## >> 강좌

Table 1. 철도차량용 스테인레스강의 화학 조성

종류	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
SUS304	0.08이하	1.00이하	2.00이하	0.045이하	0.030이하	8.00~12.00	18.00~20.00	0.200이하
SUS301L	0.030이하	1.00이하	2.00이하	0.045이하	0.030이하	6.00~8.00	16.00~18.00	0.200이하

Table 2. 철도차량용 스테인레스강의 기계적 성질

철도차량용 기준	항복강도 N/mm <sup>2</sup>	인장강도 N/mm <sup>2</sup>	신율(%)	처리지 상태
SUS304	205 이상	520 이상	45 이상	고용화열처리  조질압연
SUS301L- LT	215 이상	550 이상	45 이상	
SUS301L- DLT(1/4H)	345 이상	690 이상	40 이상	
SUS301L- ST(1/2H)	410 이상	760 이상	35 이상	
SUS301L- MT(3/4H)	480 이상	820 이상	25 이상	
SUS301L- DLT(1/4H)	685 이상	930 이상	20 이상	

## 2. 스테인레스 철도차량 차체의 재질

스테인레스강은 Cr량이 11% 이상 함유되어 있는 강으로서 Cr에 의하여 매우 얇고 연속적인 산화피막이 형성되어 표면을 화학반응으로부터 보호해 줌으로써 내식성을 갖게 한다. 스테인레스강은 상온에서의 금속 조직상에 따라 오스테나이트계, 페라이트계, 마르텐사이트계, 이상(duplex)계 및 석출 경화계(precipitation hardening)로 분류된다[1]. 철도차량의 차체에 적용되는 스테인레스강은 오스테나이트계로서 KS 및 JIS규격에 따른 SUS304과 SUS301L이 주로 사용된다[2]. 오스테나이트계 스테인레스강은 냉간가공에 의해 항복강도와 인장강도가 크게 증가한다. 특히 SUS301L은 냉간가공 정도에 따라 고강도를 낼 수 있는 재질로서, 용접 시 크롬 탄화물의 석출에 의한 입계 부식을 방지하기 위해 탄소 함유량을 낮춘 재질이다. SUS304와 SUS301L의 화학 조성 및 기계적 강도 특성은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

## 3. 철도차량 차체 설계의 과정

철도차량 차체의 실제 설계 과정을 단계별로 나타내면 Fig. 1과 같다. 주문주에 의해 차량의 기본 요구 사항이 결정되고 설계 사양이 확정되면, 차량의 일반배치 설계가 이루어진다. 일반배치 설계를 통해, 차량 한계와 함께 출입문과 창문의 위치 및 크기, 에어컨, 전장품 등의 기기배치,

좌석 배치 등이 결정된다. 일반배치 설계의 결과에 따라 하중의 분포 및 크기, 구조적인 불연속 등이 결정되므로 일반배치 설계는 차체 구조 설계와의 관련성이 밀접하다.

일반배치 설계에 대한 검토가 이루어지면 유사차량의 설계 결과를 기초로 초기 차체 설계가 이루어진다. 유사차량은 크기와 성능 및 사양이 유사한 차량으로서 만족할 만한 성능을 보여준 차량 중에서 선정된다. 설계 사양서와 함께 유사차량의 차체설계 결과를 기초로 하여 주요 부재의 재질, 구조 배치 및 부재 치수를 결정하게 된다. 차체설계를 위한 기본적인 초기치들이 결정되면 세부적인 차체의 초기 설계가 이루어진다. 초기설계가 끝나면 설계 사양서 및 일반배치 설계 결과를 참고로 차체 하중을 정의하고, 차체의 구조해석을 수행한다. 구조해석을 수행하기 위해 전용 소프트웨어를 이용하여 차체의 설계 CAD 파일을 전송받아 유한 요소로 모델링하고 해석을 수행한다. 응력 및 변위 해석 결과가 얻어지면 사양서에 규정된 강도 기준과 비교 검토하고, 기준을 충족시키지 못할 경우에는 설계 보완을 실시하고 구조 해석을 재수행한다. 강도 기준이 만족되면 차체의 생산설계를 시작하고 시제차체를 제작한다. 시제차체에 대해서는 구조해석 결과를 토대로 고응력 부위에 스트레인게이지를 부착하고 언더프레임에 변위게이지를 부착한 후에 구조 시험용 지그에 차체를 놓고, 사양서에 정해진 설계 하중을 직접 적재한 후에 응력 및 변위를 측정하고 강도를 평가하게 된다. 강도 평가 결과, 기준에 미달되면 차

체 강도를 보완하여 재시험을 수행하게 된다. 재시험 결과, 기준이 만족되면 차체의 양산을 개시한다.

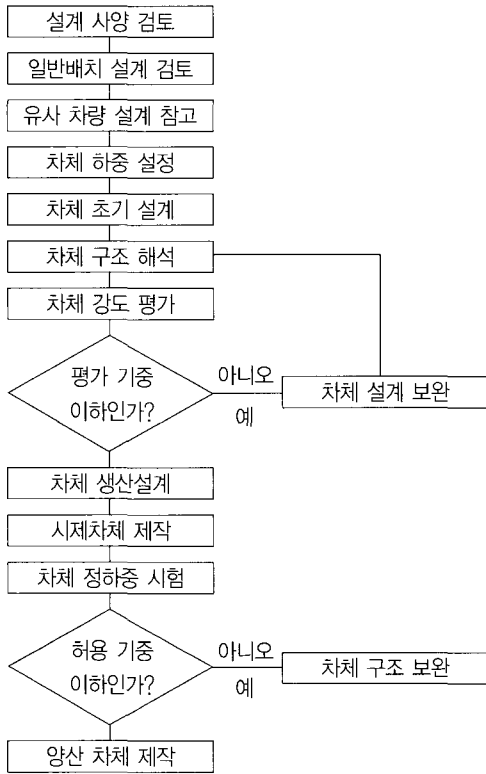


Fig. 1 철도차량 차체의 설계 과정

#### 4. 차체 설계 하중

철도차량 차체 설계를 위한 국제 규격은 UIC 규격[3]과 JIS 규격[4]을 들 수 있는데, 국내의 스테인레스강 철도차

량 차체는 주로 JIS 규격을 사용하고 있다. UIC 규격은 전반적으로 JIS 규격에 비해 좀더 엄격한 기준이라 할 수 있다. JIS규격에 따르면 차체 하중은 크게 수직하중과 압축 하중, 비틀림 하중과 3점지지 하중, 외부 압력 하중으로 나누어 볼 수 있다. 외부 압력 하중은 고속철도차량이 터널 진입 시에 받는 압력 변동을 대상으로 적용하는 하중 기준으로서 일반 전동차나 객차에는 보통 적용하지 않는다. 각 하중의 세부 내용은 Table 3와 같다. 수직하중은 승객이나 전장품, 기타 기기들의 중량과 운행 중 차체 운동에 의한 동하중을 고려한 하중이고 압축하중은 연결기로부터 전달되는 하중이 된다. 수평 압축 시험 시에 수직하중과 압축 하중은 동시에 작용시킨다. 비틀림 하중은 차량을 들어올리는 경우와 같이 지그로부터 작용하는 모멘트이고, 3점 지지하중은 차체의 운동에 따라 3점에서만 차체 하중이 지지되는 경우를 고려한 하중이다.

#### 5. 차체 초기 설계

차체는 Fig. 2와 같이 기본적으로 하부구조(under-frame), 측구조(side structure), 지붕구조(end structure), 단부구조(end structure)로 구성되어 있는데, 차체를 이루는 하부구조, 측구조, 지붕구조 및 단부구조는 차체의 근간을 이루는 주요 골재를 중심으로 연결된다. 하부구조는 볼스터를 통해 차체 하중을 대차로 전달하며, 센터셀을 통해 연결기(coupler)의 압축 또는 인장 하중을 전달한다. 사이드셀(side sill)은 하부구조의 길이방향 골재로서 측구조와 경계를 이룬다. 지붕구조는 캔트레일

Table 3. 차체 하중의 종류 및 크기

하중 종류	하중 크기		비고
수직 하중	$(\text{운전 정비 상태일 때의 하중} + \text{최대 승객하중} - \text{대차중량}) \times \text{동하중계수} - (\text{구조체 하중} + \text{시험기 하중})$		동하중 계수 1.1~1.3
수평 압축 하중	압축하중	490kN	UIC기준의 경우 압축하중은 2,000kN
	수직하중	$\text{운전 정비 상태일 때의 하중} - \text{대차중량} - (\text{구조체 하중} + \text{시험기 하중})$	
비틀림 하중	39,200N-m		
3점지지 하중	$\text{운전 정비 상태일 때의 하중} - \text{대차중량} - (\text{구조체 하중} + \text{시험기 하중})$		

## 강좌

Cantrail)을 근간으로 카라인이 연결되고 측구조와 연결된다. 단부구조는 단부기둥(end corner post)과 엔드빔(end beam)을 중심으로 하부구조 및 측구조, 지붕구조와 연결된다. 볼스터, 센터실, 사이드실, 캔트레일, 단부기둥 및 엔드빔은 차체를 이루는 주요 골재(frame)라 할 수 있다. 하부구조는 대차의 위치, 연결기의 종류와 형식, 취부 전장품의 위치와 중량 등에 민감하므로 설계 시 적절한 고려가 필요하다. 측구조는 출입문, 창문 등과 같은 개구부의 크기와 위치에 따라 강도상 영향을 많이 받으므로, 적절한 고려가 필요하고, 지붕구조는 냉방장치의 중량 및 형식에 따라 구조 설계가 영향을 받는다. 차체의 초기설계 시에 주요 부재의 형상 및 치수를 결정하기 위해서 일반배치 설계 결과와 유사 차량의 설계 결과를 참고로 한다. 초기설계를 기초로 구조해석 및 강도 평가 과정을 거쳐 설계가 확정된다. 초기설계 시에는 유사 차량의 하중 시험 시에 문제가 되었던 응력 집중부나 좌굴 발생 부분에 대해 적절한 보강 대책이 필요하다. 창문과 같은 개구부(opening)에는 주위에 보강 판재를 추가하여 고응력을 낮추어야 한다. 전동차의 경우 출입문이 볼스터 상에 위치하는 경우가 많은데, 차체 최대의 전단력이 작용하는 위치이므로 모서리 부분의 응력 집중 부분에 대한 적절한 보강 대책이 필요하다. 출입문 주위에는 특별한 보강을 위해 별도의 프레임 제작하여 측구조와 연결될 수 있도록 설계

한다. 볼스터 앞부분에서 측면 외판의 전단 좌굴을 방지할 수 있도록 보강재(stiffener)에 의한 보강에도 유의해야 한다. 지붕구조에서는 에어컨과 판토그래프와 같은 중량물의 하부 보강에 유의하여야 하는데, 보(beam)에 의한 격자구조가 되도록 보강하는 것이 효과적이다. 지붕구조의 외판과 하부구조의 키스톤 플레이트는 주름판(corrugated plate)으로 설계된다. 주름판은 판재를 롤포밍(roll forming)으로 성형하여 제작되는데, 형상에 의해 길이 방향의 강성이 증가되는 특성이 있다. 주름판의 폭방향 강성은 지붕구조의 카라인(car line)이나 하부구조의 크로스빔(cross beam)에 의해 보강되므로 주름판은 구조적 효율과 작업의 간편성이 향상된 구조라 할 수 있다.

Fig. 2는 최근 일본에서 개발된 전동차용 Two-sheet 차체의 개괄적인 구조 및 형상을 보여주고 있고, Fig. 3 및

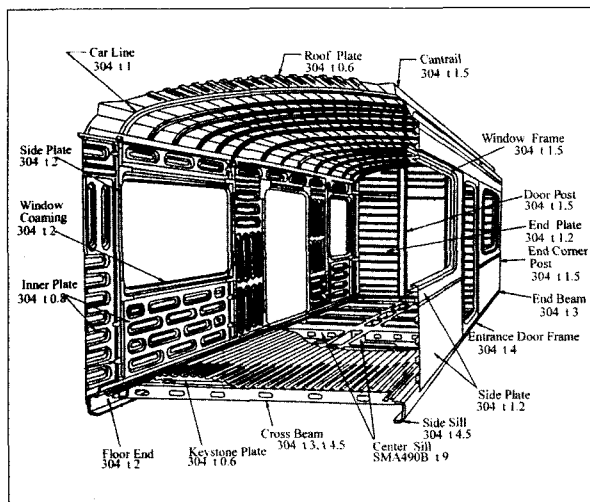


Fig. 2 스테인레스강 차체의 구조 및 명칭



Fig. 3 스테인레스강 전동차 차체의 내부

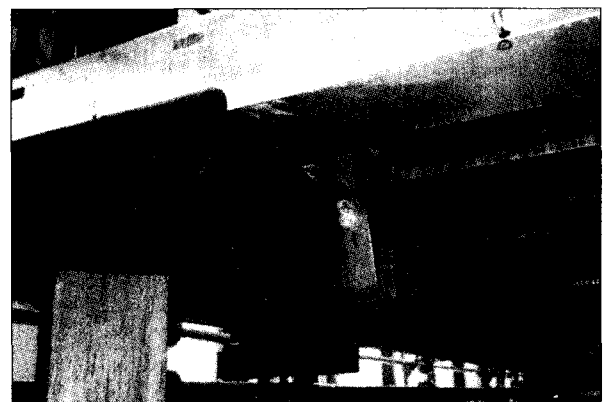


Fig. 4 스테인레스강 전동차 차체 하부

Fig. 4는 실제 스테인레스강 전동차 차체의 내부 및 하부 모습을 보여 주고 있다.

## 6. 차체 구조 해석

차체 구조 해석은 전용 유한 요소 해석 소프트웨어(예를 들면, ANSYS나 NASTRAN, ABAQUS 등)를 활용하여 수행한다. 90년대 초반까지도 설계 도면에 기초하여 대형 컴퓨터나 고성능 워크스테이션상에서 전처리(pre processing) 소프트웨어를 이용하여 새롭게 차체 구조를 모델링하였다. 판재는 각(shell)요소로 모델링하고, 골재는 보(beam)요소로 모델링하여 구조해석을 실시하고, 응력 집중부에서는 서브스트럭처링(Substructuring)이나 주밍(Zooming) 기법을 이용하여 상세 해석을 실시하였다. 근래에는 CAD 기술과 그래픽 소프트웨어 기술, PC 성능의 발전으로 CATIA와 같은 3차원 CAD 소프트웨어를 이용하여 설계가 종료된 CAD 파일을 바로 전처리 소프트웨어(예를 들면 PATRAN이나 IDEAS, HYPERMESH 등)를 활용하여 읽어 들여서 구조 해석 모델로 변환하고 구조해석을 수행한다. 이 경우에 차체 전체를 각(shell)요소로 모델링하게 되어 절점과 요소수가 대폭적으로 증가하므로 계산 시간과 기억 용량이 대규모로 늘어난다는 문제점이 있으나, 하드웨어 기술의 발전으로 정적 해석(static analysis) 시에는 큰 무리가 없다. CAD 파일을 구조해석 파일로 변환할 때 부재간의 연속에 주의해야 한다. 각요소는 8절점 요소가 정확성이 양호하다고 알려져 있으나, 절점수가 늘어나므로 DKT(Discrete Triangular) 요소를 적용한 4절점 요소도 많이 이용되고 있다[5]. Fig. 5는 차체의 유한 요소 해석 예를 보여 준다.

스테인레스 철도차량의 경우 점용접에 의해 부재가 연결되어 있는데, 초기의 시제차량에서 하중 시험 중 점용접부 절단 사례가 많이 발생하였으므로 점용접부 강도 평가가 필요하다. 개별 점용접 위치까지 고려하여 구조 모델을 생성하는 것은 현실적인 어려움이 있으므로 별도의 방법을 통해 점용접부의 인장 하중을 확인한다. 점용접부에 해당하는 절점을 겹침판 상하 두요소가 공유하게 만들고 상

하 두요소의 절점력 차이로 점용접부의 인장 전단 하중을 계산할 수 있다. 또다른 방법은 주밍(Zooming) 해석 개념을 적용한 것으로서, 1차 구조해석이 종료된 구조 모델에서 정밀 해석이 필요한 부분을 분리하여 점용접부를 두 요소 사이에 연결된 강체보(rigid beam)로 이상화하고 구조 해석을 재수행하여 강체보의 전단력을 점용접부의 인장 전단 하중으로 간주하는 것이다. 두 방법이 장단점이 있으나 편리성 측면에서는 첫 번째 방법이 우수하나, 정확도 측면에서는 두 번째 방법이 우수하다고 할 수 있다.

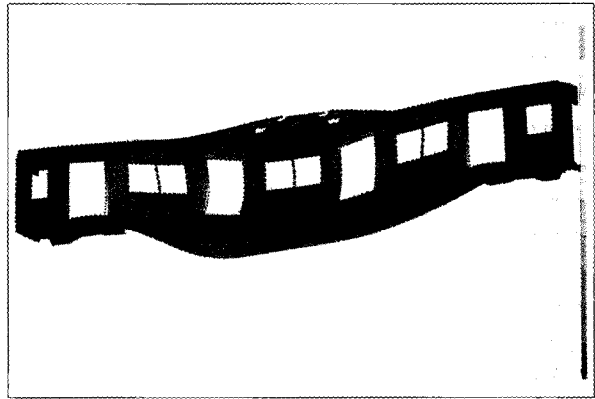


Fig. 5 유한 요소 해석에 의한 차체 응력 해석 결과

## 7. 차체 강도의 평가

구조 해석이 종료되면 해석 결과에 대해서 강도 평가를 실시하게 되는데, 보통 JIS의 설계 기준이나 하중 시험 기준을 기초로 평가하게 된다. JIS의 설계 기준[2]은 항복응력을 기준으로 1.5의 안전율을 요구하고 있으나, 하중 시험 기준[3]에는 영구변형이 생기지 않도록 항복점 이하만 무방한 것으로 규정되어 있다. 차량 적재 중량에 의한 정하중만 작용하는 경우 단순히 항복점을 기준으로 강도 평가를 할 수 있으나 동하중이 동시에 작용하는 경우에는 항복과 함께 반복 하중에 의한 피로강도도 동시에 평가해야 한다. 이를 위해 Fig. 6와 같은 Goodman선도를 이용한다. 정하중에 의한 응력이 평균응력이 되고 동하중에 의한 응력이 변동응력이 된다. 동하중은 보통 전동차의 경우 정하중의 20%를 잡는다[6]. Goodman선도의 피로 한도는

## 강좌

선도에서 2×106 또는 1×107 반복회수에서의 피로 강도로 결정한다. 피로강도의 한계치는 이음부의 형상에 따라 급격히 달라지므로 적절한 이음부 형상에 대한 것을 적용하여야 한다. 비틀림 하중에 의한 응력은 정하중과 직접 조합되지 않으므로 변동하중 성분으로 간주하고, 피로 강도 측면에서만 강도를 평가하게 된다.

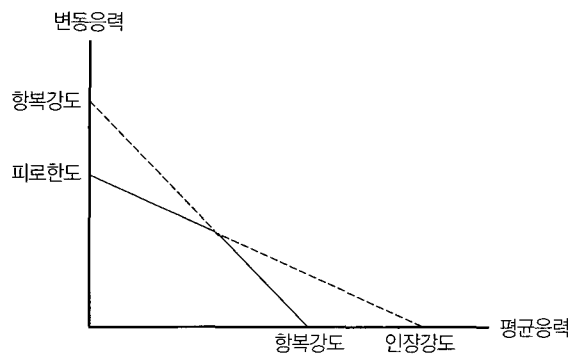


Fig. 6 Goodman 선도

점용접부의 인장전단 강도의 기준은 Table 4[2]와 같다. Table 4는 점용접 1개당 실제 인장전단 강도를 기초로 안전율 2를 고려하여 허용 인장전단강도로 규정한 것이다.

Table 4. 점용접부의 허용 인장전단강도 (N)

두께 (mm)	소재		
	SUS304	SUS301L 1/4H, 1/2H	SUS301L 3/4H, T
0.4	540	735	930
0.5	735	1030	1325
0.6	980	1325	1665
0.8	1420	1960	2500
1.0	1960	2695	3435
1.2	2550	3480	4415
1.5	3480	4755	6030
2.0	5200	7110	9070
2.5	7060	9710	12355
3.0	9120	12555	15985
3.5	11825	15595	19810
4.0	13680	18780	23930
4.5	16130	22165	28195
5.0	18680	25695	32655

구조 해석 결과로부터 구해진 점용접부의 전단 하중을 Table 4의 기준과 비교 검토하여 용접부의 강도를 평가하게 된다. Table 4를 적용할 경우 두께가 얇은 판을 기준으로 삼는다.

스테인레스 차체의 경우 박판 구조이므로 좌굴이 많이 발생하게 된다. 좌굴의 경우에 JIS 기준에는 3점지지 시험 하중에 대해 소성좌굴이 발생하지 않도록 규정하고 있고, UIC 기준에는 실험을 통해 지붕구조의 부분 시편에 대한 좌굴강도를 시험하고 실제 작용 응력과 비교하여 좌굴을 판정하고, 좌굴 방지를 위한 설계를 실시할 것을 권고하고 있다. 실제 스테인레스 차체의 좌굴강도는 취약하지만 판재의 경우 좌굴후에도 최종붕괴에 이르기까지 잔류강도가 많이 있으므로 실제 설계에서는 차체 부위에 따라 좌굴을 크게 고려하지 않는 경우가 많다. 지붕구조의 경우 주름판 (corrugated plate)의 국부 좌굴강도가 취약하여 좌굴이 많이 발생하지만 외관상 눈에 띄지 않고 실제 붕괴에 이르기까지는 상당한 여유가 있으므로 특별히 고려하지 않는 경우가 많다. 다만 측구조의 경우 차체 볼스터 앞부분은 최대 전단력이 작용하는 위치이고, 최대 전단력에 의해 측구조 판재에 최대의 전단응력이 작용하고 있다. 이 경우에 좌굴 발생시에는 외형적으로도 좌굴에 의한 주름 변형이 크게 눈에 띄므로 차체의 제작 이전에 방지할 수 있도록 충분히 검토하여야 한다. 전단 좌굴 강도는 이론식[7]에 의해 계산될 수 있으나, 판재에 포함된 초기 변형 또는 잔류응력에 의해 강도 저하가 심각하게 발생하므로 강도 평가에 유의해야 한다. 보통 이론식의 70%정도를 실제 강도로 보면 무난하다.

비틀림 하중의 경우에는 수직 하중 적재 상태에서 작용하는 하중이 아니므로 조합되지 않는다. 비틀림 하중의 경우 Fig. 4에서 제시된 선도 중에서 평균응력이 영인 경우의 피로강도 이하이면 강도상 문제가 없다. 3점지지 하중의 경우에는 항복이 발생하거나 압축 또는 전단응력에 의한 소성 좌굴이 발생하지 않도록 설계되어야 한다.

차체의 전체적인 종방향 변위 계산 결과를 토대로 차체의 등가 강성을 구하고 요구 등가강성과 비교하게 된다. 등가 강성[8]은 수직 하중 작용 시에 사이드셀의 중앙에서

계산된 수직 변위를 기준으로 다음의 식에 의해 계산된다.

$$EI_{eq} = \frac{wL_2^2 (5L_2^2 - 24L_1^2)}{384\delta} \quad (1)$$

여기서,  $EI_{eq}$  = 등가 굽힘 강성

(equivalent bending rigidity)

$w$  = 단위 길이당 등분포 하중

$L_1$  = 차단에서 볼스터 중심까지의 거리

$L_2$  = 볼스터 중심 사이의 거리

$\delta$  = 사이드셀의 최대 처짐

등가강성은 차체를 하나의 보로 보았을 때, 전체적인 변형에 저항할 수 있는 차체 종방향 강성을 의미한다. 등가강성에 대한 기준과 함께 차체의 저차 굽힘 고유진동수도 기준치(보통 10Hz) 이상이 되어야 한다. 고유진동수는 공진 방지 측면에서 계산하는데, 차체에 하중이 적재되지 않은 상태에서 고유진동수를 계산하여 공진을 검토하는 것은 큰 의미가 없으나, 굽힘 고유진동수를 기준치 이상으로 높이는 것은 공진 방지와 함께 차체의 전체 굽힘 강성을 일정한 수준 이상으로 높이려는 의미가 있다. 등가강성 및 굽힘진동수 기준과 함께 차체 처짐에 대한 기준도 제시되고 있다[8]. 적재 하중에 의한 과도한 차체 수직 변형 발생

시에는 출입문의 작동이 원활하지 못하고 하부 배관이나 전선에 영향을 주기 때문이다. 발생하는 수직 변형량을 보상하기 위해 보통 차체 제작 초기부터 캠버를 주게 된다.

차체의 강도 평가 기준을 정리해 보면 다음 Table 5와 같다.

### 8. 차체의 생산설계

차체의 강도 평가가 종료되어서 차체가, 가해지는 하중에 충분히 저항할 수 있는 것으로 평가되면 초기설계 결과를 기초로 하여 생산설계를 실시한다. 생산설계는 상세설계라고도 할 수 있는데, 전장품들의 취부를 위한 브라켓류들과 배관 및 전선의 관통을 위한 구멍까지 세부적으로 표현하게 되며 단품 단위까지 도면을 작성한다. 생산설계 시에는 단품들이 취부될 때 상호간에 또는 기기와 간섭이 생기지 않도록 유의해야 하고, 무거운 전장품 취부 지점에서 보강에 주의해야 한다. 또한 현장 작업자들의 관점에서 편리하게 작업을 하면서 생산성을 향상시킬 수 있도록 고려해야 하고, 현장의 장비 상황을 적절히 고려해야 한다. 용접의 경우 적절한 용접이 될 수 있는 공간 확보가 필요하고, 점용접 피치를 결정할 시에도 분류(branch current)에 의한 점용접부의 분리가 발생하지 않도록 유의해야 한다. 점용접 피치는 다음의 Table 6의 기준[2]에 따라 결정된다. 보강 등을 위해 여러 장의 판을 겹쳐서 점용접을 하는 경우 4장 이상의 겹침 용접은 금해야 하고, 두께비가 5 이상인 판의 점용접도 적절한 강도 확보를 위해서는 겹침 용접을 피하는 것이 좋다.

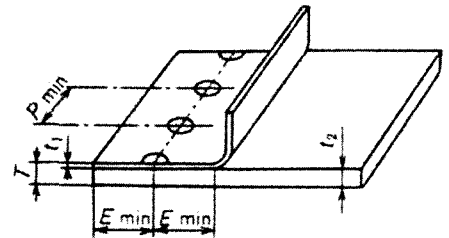
상세설계 시에는 차체 강도의 연속성과 기밀구조의 유지를 위해 구조의 연속성과 연결부의 설계에 유의하여야 한다. 배관 또는 배선을 위해 크로스빔 등에서 구멍을 내는 경우 직경이 웹 높이의 50% 이상이 되는 구멍을 내는 것은 강도 상 바람직하지 않다. 점용접이 불가능한 겹침 이음의 경우 플러그(plug) 용접이 필요한데, 이 경우에도 최소 피치 간격을 준수하는 것이 필요하다.

Table 5. 차체 강도 평가 기준

하중	평가 기준	비고
수직 하중	최대 응력이 항복점 이하	(2)식에 의해 계산
	평균 응력 및 변동 응력의 조합이 피로 한도 이하	
	등가강성이 $0.6 \times 10^{14}$ kgf-mm <sup>2</sup> 이상	
	사이드셀에서 최대 변위가 대차 중심간 거리의 1/1000 이하	
압축 하중	최대 응력이 항복점 이하	수직하중과 조합상태
비틀림 하중	피로 한도 이하	
3점지지 하중	항복점 이하, 좌굴에 의한 영구 변형 미발생	
고유진동수	저차 굽힘고유진동수 10 Hz 이상	

Table 6. 점용접 최소 피치 기준

얇은 판의 두께 $t_1$	최소 단부거리 $E_{min}$	최소 용접 피치 $P_{min}$		형상 · 치수
		$T < 2.5t_1$	$T \geq 2.5t_1$	
0.4	3	9	11	
0.5	4	10	13	
0.6	4	12	15	
0.8	5	14	18	
1.0	6	17	21	
1.2	7	19	24	
1.5	8	22	28	
2.0	10	27	34	
2.5	12	32	40	
3.0	14	36	46	
3.5	15	40	51	
4.0	17	44	56	
4.5	18	48	60	
5.0	20	52	65	



### 9. 차체의 정하중 시험

4절에서 정의된 차체 시험 하중을 가하여 차체의 정하중 시험을 실시한다. 정하중 시험은 Fig. 7과 같이 차체를 시험용 지그에 놓고 차체에 규정된 하중을 적재함으로써 이루어진다. 하중 적재 이전에 응력 해석 결과를 검토하여 고응력 부위에 집중적으로 스트레인게이지를 부착한다. 단축 스트레인게이지와 함께 스트레인로제트를 부착하여 주응력(principal stress)과 등가응력(Von Mises equivalent stress)을 구하게 된다. 통상 주응력을 기준으로 피로강도를 평가하고 등가응력은 항복 판정을 위해 사용한다. 압축 하중은 연결기 대신에 유압 액츄에이터를 통해 규정된 하중을 가하게 된다. 측면의 사이드실 하부에는 일정한 간격으로 변위 게이지를 부착하여 변형을 계측한다. 하중을 가할 시에는 단계적으로 증가시키고, 증가 단계마다 계측 결과를 분석하고 선형적인 관계에 있는지 확인한다. 고유진동수 시험을 위해서는 차체가 진동할 수 있는 수준의 중량물을 급격히 낙하시켜 초기 기진력을 가지고 자유진동 모드를 분석하여 고유진동수를 구하게 된다. 시험 결과의 판정도 3절의 강도 평가와 마찬가지로 항복

및 피로 강도 측면, 차체 변위에 의한 등가 강성 측면, 고유진동수 측면에서 평가하게 된다. 정하중 시험에서 기준치를 만족시키지 못하는 경우 구조 보강이 필요한데, 차체가 완성된 상태이므로 보강 대책은 제한적이다. 따라서 설계 단계에서 강도 평가가 충분히 이루어져야 한다. 통상 하중시험 결과는 설계 단계의 구조해석 결과와 비교하여 10% 정도의 오차가 일반적이고 최대 30% 이상의 오차가 발생하는 경우 정밀 검토가 필요하다. 하중 시험 이후의 강도 대책은 주로 골재를 덧붙이는 수준의 보강이 된다.



Fig. 7 차체의 하중 시험



하중 시험을 통해 차체의 강도가 규정치를 만족시키고 있음을 확인하면 차체 설계를 확정하고 양산 제작에 들어가게 된다.

## 10. 차체 설계의 발전

스테인레스강 차체는 초기 SUS304를 기본으로 설계되었으나 고장력강인 SUS301L의 등장으로 경량화를 위해 SUS301L의 적용이 더 확대되었다. 그러나 SUS301L의 사용으로 차체의 판두께가 감소되고 중량이 감소되는 추세이나 판두께 감소에 따른 좌굴강도의 감소로 어느 한도 이하의 두께 감소는 곤란하게 된다.

일본에서는 경량화와 함께 생산 효율을 높이기 위한 Two-Sheet 차체가 개발되어 실용화되었다[9]. Two-Sheet 차체는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 프레스에 의해 요철로 가공된 내판이 보강재의 역할을 하면서 외판과 점용접으로 결합된 구조인데, 별도의 보강재를 위한 가공이 필요 없고, 단지 금형에 의한 판재의 프레스 가공으로 내판을 가공하여 외판과 부착하면 차체 블록이 완성될 수 있으므로, 생산 효율이 대폭 증가되면서 강도적으로도 튼튼한 구조가 될 수 있다.

## 11. 결론

지금까지 스테인레스강 철도차량 차체의 설계 과정을 설명하고 각 과정 별로 고려해야 할 주요 내용을 기술하였다. 스테인레스강 철도차량은 점용접을 근간으로 차체가 조립되고 무도장으로 차체가 완성되므로 표면의 미려도가 중요한 차량이다. 구조적인 안전성을 확보하면서 스테인

레스강 차체 고유의 미려도를 살리기 위해서는 설계 단계에서부터의 충분한 검토와 대책이 필수적이다. 스테인레스 제작의 역사가 10년을 넘어선 현 시점에서 본 강좌는 스테인레스강 차체 설계 기술을 정리하여 봄으로써 향후 차체 개선을 위한 기초가 되고자 하였다.

## 참고 문헌

1. 대한용접학회, "스테인레스강의 용접", 용접 접합 편람, 제7장, 1998.
2. Japanese Industrial Standards, "Welded Joints of Stainless Steel for Railway Rolling Stock - Design Methods", JIS E4049, 1990.
3. Japanese Industrial Standards, "Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock", JIS E7105, 1989.
4. International Union of Railways, "Loadings of Coach Bodies and Their Components", UIC 566-OR, 1993.
5. "ANSYS User's Manua", Swanson Analysis System Inc., 1998.
6. 건설교통부, "도시철도차량 표준시양", 건설교통부고시 제 1998-53호, 1998.
7. Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., "Theory of Elastic Stability", McGraw Hill, 1961.
8. "지하철 7,8호선 전차 제작 규격서", 서울특별시 지하철건설본부, 1996.
9. Ohnishi T., Ohminami, R. and Seto, M., "The Car Body Structure of Shinkansen and Stainless Steel Commuter Train, and its Strength Analysis", Kawasaki Technical Review, No. 131, 1996.