

# 철도차량 ROOF 구조의 시험 사례 고찰

## The Review of Test cases on the Roof Structure of Railway Vehicles

김정남\*  
Kim, Jung Nam

김재웅\*\*  
Kim, Jae Woong

박영훈\*\*\*  
Park, Young Hoon

---

### ABSTRACT

In this paper, to verify the safety of railway vehicle structure, we describe the test methods of roof structure. The purpose of GM/RT 2100' missile protection article is to minimise the risk of injury which could result from the penetration into a vehicle body by missile such as stones and bricks. we carried out weight drop test on the roof structure in accordance with GM/RT 2100. The test results showed that the penetration did not occur.

---

### 1. 서론

스테인레스강은 내부식성이 강하고, 강도 및 가공성, 용접성이 우수하여 국내외에서 철도차량 차체 재질로 널리 사용되고 있으며, 근래의 철도차량 경량화 목적에 부합하는 재질이다.<sup>(1)</sup>

국내 철도차량 제작업체는 스테인레스 차체 제작 분야에서 10여년 간의 기술을 축적하여 국제 경쟁력을 상당 부분 확보하고 있지만 품질의 고급화, 제작상의 고능률화, 제작 기법의 신기술 개발 등을 통하여 좀 더 강력한 경쟁력을 확보할 필요성이 대두되고 있다.<sup>(2)</sup> 스테인레스강 차체는 박판 구조물로서 성형된 판재를 주로 점용접 방법으로 조립하게 되며, 강판의 절단과 가공, 소조립, 대조립 과정을 거친 후 차체로 완성된다. 철도차량의 차체구조는 언더프레임(Under Frame), 차측(Side), 단부(End), 지붕(Roof) 등의 차체 구성골조가 부담하는 하중의 종류가 서로 다른 구조를 가지고 있으며, 이 중 지붕(Roof Structure)은 위로 에어컨, 집전장치 등이 설치되는 것을 제외하면 하중에 대한 부담이 다른 구조에 비해서 그다지 크지 않은 부위이다. 따라서 지붕 외판은 차측이나 단부 외판에 비해 박판을 사용할 수 있어 스테인레스 차량의 경량화 가능성이 많은 곳이다.

그러나 최근 해외 철도차량 제작사에서는 Fig.1과 같이 차량 하부의 취부품들이 상부로 이동 설치되는 개념을 도입하고 있고, 안정성 측면에서도 Roof Structure는 간과할 수 없는 중요성을 가지고 있어 지속적인 제작기술 개발 및 품질개선이 이루어져야 할 뿐 아니라, 국제적으로 인증된 안전성 검증 체계를 통해 품질 확보에 만전을 기하여야 한다.

본 논문에서는 철도차량 차체구조의 안정성을 검증하기 위하여 제작과정에서 시행되어지고 있는 시험방법을 Roof Structure를 중심대상으로 기술하고자 한다. GM/RT 2100<sup>(3)</sup>에 규정되어 있는 Missile Protection 항목을 만족하기 위하여 실시한 Weight Drop Test 결과를 소개하며, 타 산업분야에서의 Roof Structure 시험방법을 비교 검토하고자 한다.

시험대상 차량은 현재 해외로 수출되어지는 디젤동차로서 재질은 스테인레스강과 내후성 압연강재이며, GM/RT 2100 규격을 적용하여 제작된 차량이다.

---

\* 책임저자 : (주)로템 기술연구소 연구원, 정희원

E-mail : [jnkim93@rotem.co.kr](mailto:jnkim93@rotem.co.kr) TEL : (031) 460-1350 FAX : (031) 460-1789

\*\* (주)로템 기술연구소 선임연구원

\*\*\* (주)로템 기술연구소 수석연구원



Fig.1 The new design of car body

## 2. 본론

### 2-1. 차체의 일반구조

철도차량 초기 차체의 구조는 언더프레임(Under Frame), 차측(Side), 단부(End), 지붕(Roof) 등의 차체 구성골조가 부담하는 하중의 종류가 서로 다른 구조를 가지고 있었다. 즉 언더프레임의 센터실(Center Sill)에서 전후 충격하중을 부담하고, 차측 골조에서 수직하중을 부담하는 식의 각각의 구성골조가 강도적으로 독립된 구조로 되어있었다. 그러나, 근래의 대부분의 철도차량은 장각구조(Stressed Skin Struction)로 되어 있으며, 언더프레임, 차측, 단부, 지붕 각 구성골조가 유기적으로 엮어져 있는 것이 특징이다.

장각구조란 차체구성 골조의 구조가 외판+중형 보강골조의 형태로 되어 있는 것을 말하는 것으로서, 이러한 구조는 외판이 전단 하중성분을 부담하고 중형축 하중성분은 중형 보강골조가 부담하여 외부하중에 유기적으로 견딜 수 있도록 한 것이다.<sup>(4)</sup>

차체 구조의 역할을 각각 살펴보면,

#### 1) 언더프레임(Under Frame)

언더프레임 구조는 위로는 상구조, 차측, 단부구조의 토대를 제공하고 상구조 및 차측을 통해 전달되는 승객하중 및 차체하중을 지지하는 역할을 하며, 아래로는 대차의 피벗(Pivot)을 위한 기본 골조를 형성시켜 주는 역할 및 각종 상하기기 및 배관의 취부를 위한 골조 역할을 한다. 차량의 편성시에는 커플러(Coupler)를 통해 전달되는 전후 차량의 압축하중을 견디면서, 전해지는 하중을 골고루 분산시켜 차체의 안전성을 확보하는 역할을 담당해야 하는 차체의 기본 하부구조로서 그 중요성 또한 높다고 할 수 있다.

#### 2) 차측(Side Structure)

차측 구조는 차량의 상하 하중(자중, 승객하중)을 우선적으로 부담하며, 차측실(Side Sill) 등을 통해 전달되는 전후 충격하중, 차량의 하중 불균형 분포에 따른 비틀림 하중 등 각종 하중이 복합적으로 작용하여 강도적으로 매우 민감한 부위이다. 따라서, 복합적인 하중에 의한 외판의 굴곡, 좌굴 등에 가장 유의해야 하는 부분이다. 또한 차측은 외관상 가장 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 외판의 미려함을 고려하여 재질 및 표면처리를 결정하여야 하며, 특히 외판의 평탄도와 용접입열에 의한 국부적인 굴곡 등에 세심한 주의를 기울여야 한다.

스테인레스 차량에서는 외판의 굴곡을 방지하고 차측 골조의 내력을 향상시키기 위해서 일반적으로 차측 외판에 비드(Bead)를 형성시켜 사용하고 있으나, 최근 경량 스테인레스 차체는 용접법의 개량 등에 의해 평판을 사용하여 경쾌하고 청결한 외관을 확보하는 추세다.

#### 3) 지붕(Roof Structure)

지붕은 위로 에어컨, 집전장치 등이 설치되는 것을 제외하면 하중에 대한 부담이 크지 않은 부위이다. 따라서 지붕 외판은 차측이나 단부 외판에 비해 박판을 사용할 수 있어 스테인레스 차량의 경량화 가능성이 많은 곳이다. 그러나, 에어컨이나 집전장치의 기기하중을 일차적으로 부담하여 차측 골조에 전달하기 때문에 지붕과 차측 연결부위는 이에 충분한 강도를 확보하고 있어야 하며, 이를 위해 캔트 레

일(Cant Rail) 부재는 지붕의 타 부재에 비해 후판을 사용한다.

지붕 외판은 차체 강성의 유지 측면에서 일반적으로 Corrugated Panel를 사용하며, 집전장치나 에어 킨 설치부위에는 용접량이 많으므로 작업성 및 모재의 변형 방지를 위해 Corrugated Panel보다 후판을 사용한다. 지붕 골조는 Cant Rail, Car Line, Purline, Foot Step, Rain Gutter 등으로 구성된다.

Fig.2는 현재 제작중인 해외 수출용 디젤동차의 Roof 제작 및 검사 공정을 나타낸 Flow Chart이다.

#### 4) 단부(End Structure)

단부에는 차량과 차량을 통해 이동이 가능하도록 단부 출입문, 갱웨이(Gangway) 및 다이어프램이 설치되며, 전동차의 운전차의 경우에는 운전실이 차 단부쪽에 위치하게 된다.

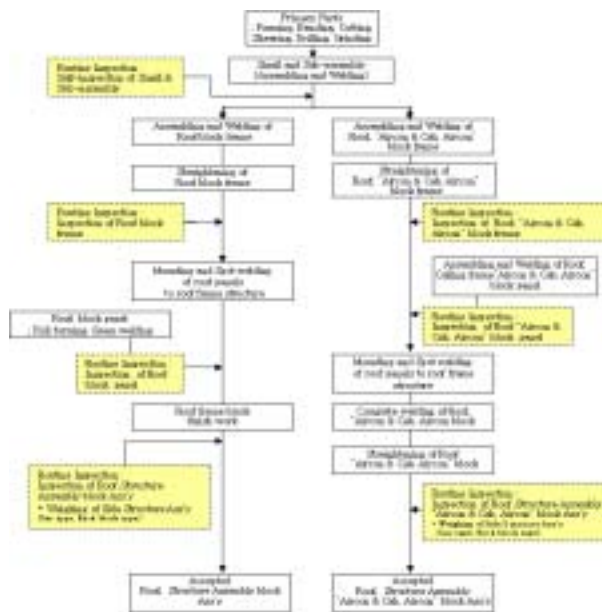


Fig.2 The flow chart of roof structure manufacturing & inspection

## 2-2. 차체의 강성 및 안정성

### 1) 설계단계에서의 안정성 확인

차체의 설계는 기본설계, 상세설계 단계로 나뉘는데, 각각의 단계에서 차체 전체 혹은 국부적 주요부위의 수치해석을 통한 응력값 및 응력분포를 예측하여 설계에 반영한다. 스테인FP스 차량처럼 항복비가 큰 재료를 이용하여 설계하는 경우 응력치보다 강성치가 문제가 되는 경우가 많은데, 강성의 저하에 따라 수직하중에 의해 처짐량이 크게 되고, 차체 굽힘 고유진동수가 내려가 대차의 고유진동수에 가까우면 공진을 일으켜 승차감을 저해시키므로 하중 종류 및 강성 목표치를 설정하여 설계하여야 한다.

또한 강도상 문제가 되는 곳, 예를 들어 차축의 개구부 즉, 출입구 및 창문 코너부위에 발생하는 응력, 언더프레임 볼스터와 센터실의 접합부 혹은 볼스터와 사이드실의 접합부 등에는 일반적으로 보강을 시행하고 있다.

### 2)현차의 차체 하중시험

차체를 양산하기 전에 차체의 안정성 검증을 위하여 수직 하중시험, 수평 하중시험, 비틀림 하중시험을 행하고, 차체 굽힘 고유진동수, 차체 비틀림 고유진동수, 처짐량을 측정한다. Table 1과 Table 2는 UIC 566<sup>(5)</sup>과 GM/RT 2100에 규정된 수평 및 수직 시험하중을 나타낸 것이다.

Fig.3과 Fig.4는 차체 하중시험의 한 예로 GM/RT 2100 (Structural Requirements for Railway Vehicles) 규격을 적용한 Cant Rail 부위에 대한 수평 압축하중시험(시험하중 300kN) 및 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다. Roof 재질은 SUS301L-ST(항복응력:42kgf/mm<sup>2</sup>)로서 유한요소해석 결과 최대응력은 25~26kgf/mm<sup>2</sup>의 범위에서 나타나고 있으며, 현차를 대상으로 한 Cant Rail 부위의 수평 하중시험 결과는 22.6~23.5kgf/mm<sup>2</sup>를 나타내어 모두 항복응력 내에 있음을 확인할 수 있다.

Table 1. Longitudinal loads

| Load cases |   | GM/RT 2100  | UIC 566 OR |
|------------|---|-------------|------------|
| 1          | At buffer positions                                       | [1] 1500 kN | 2000 kN    |
| 2          | At coupler positions                                      | [1] 1500 kN | 2000 kN    |
| 3          | At coupler positions (Tensile)                            | [1] 1000 kN | 1500 kN    |
| 4          | At anti-climber positions                                 | 1500 kN     | N/A        |
| 5          | 150mm above structural floor(350mm above coupler)         | 400 kN      | 400 kN     |
| 6          | At cant rail level  | 300 kN      | 300 kN     |
| 7          | At any point on each vertical edge of end wall            | 150 kN      | N/A        |
| 8          | At any point on collision pillar(s) of end wall (equally) | 150 kN      | N/A        |
| 9          | At the level of the window guard-rail                     | N/A         | 300 kN     |
| 10         | At diagonally opposite buffer positions                   | 500 kN      | 500 kN     |

Note : [1] For multiple unit vehicles and other vehicles normally part of a fixed consist train.

Table 2. Vertical loads

| Load cases |  | GM/RT 2100                          | UIC 566 OR                      |
|------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1          | Maximum operating load   | 1.5(M1+ M2)g                        | 1.3(M1+ M2)g                    |
| 2          | Vertical load [1] & compression on couplers  | 1.5(M1+ M2)g(V)<br>+ 1500kN (C) [2] | 1.3(M1+ M2)g(V)<br>+ 2000kN (C) |
| 3          | Vertical load and tension on couplers  | 1.5(M1+ M2)g(V)<br>+ 1000kN (T) [2] | 1.3(M1+ M2)g(V)<br>+ 1500kN (T) |
| 4          | Vertical force and compression at anti-climber faces                                   | 100kN vert.<br>+ 1000kN long.       | N/A                             |
| 5          | Lifting at all lifting points with bogies attached                                     | 1.1(M1+ 2Mb)g                       | 1.0(M1+ 2Mb)g                   |
| 6          | Lifting at one end at lifting points, supported on bogie at other end                  | 1.1(M1+ Mb)g                        | 1.0(M1+ Mb)g                    |
| 7          | Vertical shear force transferred at the coupler and a transverse shear force           | 100kN vert. +<br>100kN trans.       | N/A                             |
| 8          | Vertical shear force transferred at the anti-climb device and a transverse shear force | 100kN vert. +<br>100kN trans.       | N/A                             |

Note : [1] The vertical load applies when the body sags between the bogies under the action of the purely compressive force.

[2] For multiple unit vehicles and other vehicles normally part of a fixed consist train.

M1 = mass of body in working order, Mb = mass of bogie, kg

M2 (Payload) = 80 kg x [(number of seats) + (4 x the floor area in m<sup>2</sup> of passageways and vestibules)].

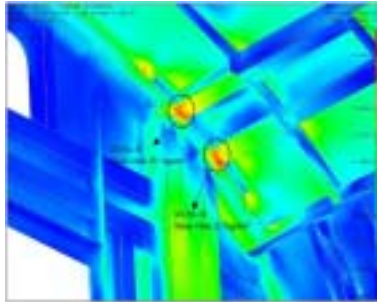
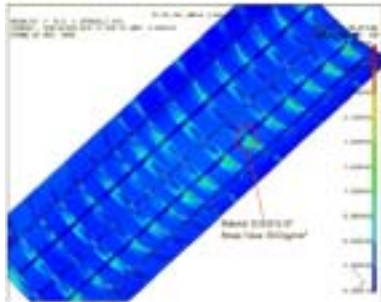


Fig.3 The FEA results of roof structure

Fig.4 Compressive load test

2-3. Weight Drop Test on the Roof Structure

GM/RT 2100에 규정된 Missile Protection 항목은 다음 2가지로 요약할 수 있다.

- 1) Cab 전면(windscreen 제외) : 0.9kg의 길이 70-75mm sharp-corner hollow steel cube를 최대속도의 2배로 충돌시 관통이 되지 않아야 함.
- 2) Roof : 100kg Concrete cube를 3m 높이에서 떨어뜨릴 때 관통이 되지 않아야 함.

1)항에 대한 시험은 차량 제작이 완성된 후 시험되어야 할 항목으로 아직 실제 시험을 시행하지 않았으며, 2)항에 대해서는 현차 Roof 구조와 동일한 조건으로 Test sample을 제작하여 Weight Drop Test를 실시하였다. 시험목적은 정상운행 조건하에서의 철도차량의 안전 성능 확보 및 충돌, 전복사고와 같은 비정상조건에서의 승객, 운영요원의 부상 및 차량 내, 외부의 위험 발생을 최소화하기 위함이다.

현차 Roof 구조는 Roof panel과 Frame의 조합구조로서, Aircon 및 Antenna 취부 부위는 두께 2mm (plate), 그 외 부위는 0.8mm 두께(Corrugated panel)의 SUS301L-ST panel과 동일 재질의 Frame으로 구성되어 있다. 이 중 시험 대상은 Fig.5에서와 같이 낙하물 충격시 가장 취약할 것이라고 예상되어지는 0.8

mm 두께의 Corrugated panel 부위를 선정하였고, Cantrail 및 지지역할을 할 수 있도록 만든 시험용 지그를 제작하여 현차와 유사한 고정단을 형성시켰다. (Fig.6)

시험 방법은 Fig.7에서와 같이 중량 100kg, 한 변 길이가 약 350mm의 Concrete Cube를 높이 3m 이상에서 Roof를 향하여 자유낙하 시킨 후 Roof의 외관 변형 정도 및 관통 여부를 조사하는 것이다. Roof 중앙부와 양 끝단에 대하여 낙하높이를 3~4m로 변화시켜 총 3번의 시험을 실시하였다.

시험 결과, Roof 내부로의 관통은 발생하지 않았으며 Concrete Cube가 접촉된 면적을 중심으로 깊이 약 10~20mm의 변형(우그러짐)만이 발생하였다. 따라서, 차량 운행시 돌발적으로 발생할 수 있는 낙하물질의 내부 침투에 대하여 비교적 안전하다는 판단을 내릴 수 있다.(Fig.8)

그러나, 본 시험은 정적 상태에서의 시험일뿐 실제 운행상태에서의 조건은 아니므로 시험결과에 제한이 있다. 차량의 운행상태에서는 차량 자체의 속력을 고려해야 하며, 낙하 방향도 수직이 아닌 임의의 방향이므로 시험조건보다 더 가혹한 조건이 될 것이다. 따라서, 향후 실제조건을 구현할 수 있는 시험방법의 개선 및 시험 결과의 정량화를 통해 좀 더 체계적인 시험방안을 강구해야 할 것이다.



Fig.5 Test sample



Fig.6 Test preparation



Fig.7 Weight drop test



Fig.8 The appearance of deformed panel

#### 2-4. 자동차 분야에서의 차체 Roof 시험 사례

자동차 산업에서의 Roof 관련 시험규정으로는 Fig.9에 나타낸 바와 같이 미 연방 자동차 안전기준법 FMVSS 216<sup>(6)</sup>, KS R 1146<sup>(7)</sup>에 규정된 Roof crush resistance가 있다. 시험방법은 차량을 수평면상에 올려놓은 후, 모든 문을 닫은 상태에서 차량 고정구를 이용하여 단단히 고정시킨다. 정해진 방향과 각도를 가지고 차량 중량의 1.5배 또는 2270kg 중 작은 값에 도달할 때까지 12.7 mm/s 이하의 속도로 시험 장치 바닥면에 수직이 되도록 아래쪽으로 하중을 부가하며 120초 내에 시험을 완료한다. 이 때 정해진 하중에 도달할 때까지 변위량이 127mm 이하이어야 한다.



Fig.9 Roof crush resistance test

### 3. 결론

본 논문에서는 철도차량 차체구조의 안정성을 검증하기 위하여 제작과정에서 시행되어지고 있는 시험 방법을 Roof Structure를 중심대상으로 기술하였다.

GM/RT 2100에 규정되어 있는 Missile Protection 항목조건을 만족하기 위해서 Weight Drop Test 를 시행하였으며, 그 결과 규정에서 정한 조건보다 좀 더 가혹한 조건에서도 Roof 구조는 별다른 이상이 없음을 확인하였다. 그러나 차량의 운행상태에서는 차량 자체의 속력을 고려해야 하며, 낙하 방향도 수직이 아닌 임의의 방향이므로 시험조건보다 더 가혹한 조건이 될 것이므로, 향후 실제조건을 구현할 수 있는 시험방법의 개선 및 시험 결과의 정량화를 통해 좀 더 체계적인 시험방안을 강구해야 할 것이며, 국제적으로 인증된 안정성 검증 체계를 통해 품질 확보에 만전을 기하여야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. 정종덕 외 4인, (2002),"도시철도차량의 스테인리스와 알루미늄 구조체 하중시험에 대한 안전성 평가", 2002년 한국철도학회 추계학술지, pp.126
2. 서승일, (2004),"스테인레스 철도차량 차체 제작과정에 관한 고찰", 한국철도학회지, 제7권, 제3호, pp.35
3. Railway Group Standard, GM/RT 2100, (2000), "Structural Requirements for Railway Vehicles"
4. International Union of Railway, UIC 566 OR, "Loadings of Coach Bodies and thire Components"
5. (주)ROTEM, (2004), "KNR 경부선(20량) 전동차", 상권, pp.4-1-18~4-1-2
6. Federal Moter Vehicle Safety Standard 216, "Roof crush resistance"
7. KS R 1146, (2002), "천장 강도 시험 방법"