

## 철도차량 실내 선반 나사 강도 계산 및 FE 해석

### Strength Calculation of Mounting Fasteners for Overhead Luggage Rack and Finite Element Analysis on Rolling Stock

이문연\*<sup>†</sup>, 정호영\*, 이정율\*

Moonyun Lee\*<sup>†</sup>, Hoyoung Jung\*, Joungyul Lee\*

**Abstract** Since the product for interior on rolling stock is directly connected to passenger's safety, the selection of fasteners as fit for purpose is major factor of designing. The luggage rack is mainly installed on cantrail of upper longitudinal major structural member of carbody where this can be put the heavy weight luggage over the passenger's head. Thus, strength of mounting fasteners for luggage rack of cantilever beam supporting structure must be considered on the design.

This paper aims to carry out theoretical calculation to confirm the structural integrity of the overhead luggage rack mounting fasteners against the specified design load cases on rolling stock and evaluate the strength suitability of mounting fasteners considering margin of safety.

Additionally, It is intend to figure out adequacy of mechanical strength for overhead luggage rack itself by the finite element analysis method.

**Keywords** : Fasteners, Strength, Margin of Safety, Rolling Stock, Luggage Rack

**초 록** 철도 차량 실내 의장에 설치되는 제품은 승객들의 안전과 직결되므로, 목적에 맞는 나사 선정은 설계의 중요한 요소이다. 실내 선반은 주로 차체 상부 길이방향 주요 부재인 캔트레일(Cantrail) 위치에 설치되며, 이 위치는 승객들의 머리 위에 중량 수하물이 얹혀질 수 있는 곳으로써, 외팔보(Cantilever beam) 지지 구조의 선반 설치 나사의 강도는 설계상 필히 고려되어야 할 사항이다.

본 논문은 철도차량의 특정 설계 하중조건에 대한 승객 선반 설치 나사의 구조 건전성 확인을 위한 이론 계산 수행과 안전율을 고려한 나사의 강도 적합성을 판단하는데 그 목적을 둔다.

더불어, 유한요소 해석기법(Finite Element Analysis)을 통하여 선반 자체의 재질에 대한 기계적 강도 적절성을 판단하고자 한다.

**주요어** : 나사, 강도, 안전율, 철도차량, 선반

## 1. 서론

본 논문은 철도차량 설계 하중조건에 따라 폰 미세스 응력 이론(von Mises Stress Criterion)을 이용한 실내 선반 설치 나사의 구조적 강도 적합성 판단을 위한 계산과 유한요소 해석기법(Finite Element Analysis)을 통한 선반 재질의 기계적 강도 적절성을 판단하고자 한다.

<sup>†</sup> 교신저자: 현대로템(주) 기술연구소 철차연구 4팀(lmy818@hyundai-rotem.co.kr)

\* 현대로템(주) 기술연구소 철차연구 4팀

계산 및 해석에 사용된 모델은 실제 미국 Denver Eagle P3 전동차에 적용된 실내 선반을 이용하였다.



Fig. 1 Interior view of Denver Eagle P3 EMU project

## 2. 본 론

### 2.1 설계 하중조건

#### 2.1.1 단위계 및 좌표계

본 계산은 미국표준 단위계를 사용하였으며, 철도차량의 기준 좌표계 규약은 아래와 같다.

Table 1 System of Units

Measures	Derived Units	
	US unit	SI unit
Length	[in] & [ft]	[m]
Mass	[lb]	[kg]
Force	[lbf]	[kgf]
Stress	[psi]	[Pa]
Moment	[lbs·ft]	[N·m]
Acceleration	[ft/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]

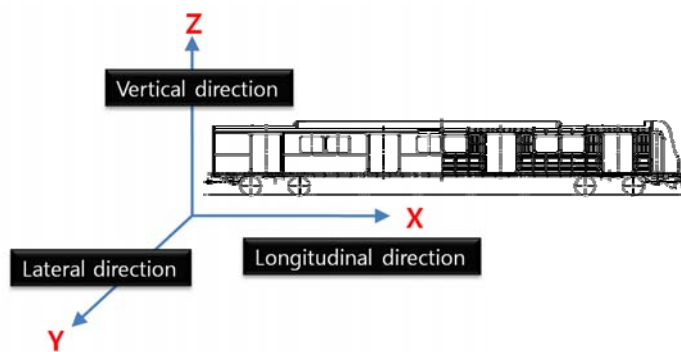


Fig. 2 Reference coordinate system (Axis convention) on rolling stock

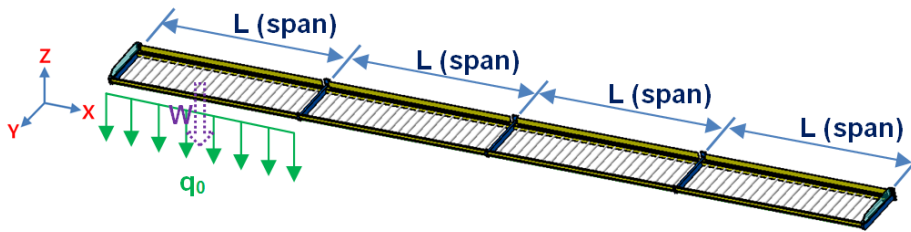
### 2.1.2 하중조건

미국 연방 규정집(CFR, Code of Federal Regulations) [1] 및 대중교통협회(APTA, American Public Transportation Association) [2] 규격에 의거한 철도차량의 설계 하중조건은 다음과 같다.

A. 선반(W) 및 수하물( $q_0$ ) 하중조건: 49 CFR 238.233 [1]

**Table 2** Specified ultimate design load cases

Load Case	Vertical direction	Lateral direction	Longitudinal direction
	4g	4g	8g



**Fig. 3** Free Body Diagram of overhead luggage rack – (i)

선반의 한 경간(徑間, Span)당 하중은 아래와 같다.

$$F_{span} = M_{rack} + M_{luggage} = \frac{W}{4} + (q_0 \times L) \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{cases} q_0 : \text{Distributed load of luggage} \\ W : \text{Total weight of luggage rack} \\ L : \text{1 span length of luggage rack} \end{cases}$$

또한, 평형 방정식(Equilibrium Equation)을 통해 선반에 작용하는 힘(Reaction Force)과 모멘트(Moment)를 구할 수 있으며, 이때 선반은 외팔보(Cantilever beam) 지지 구조로 간주한다.

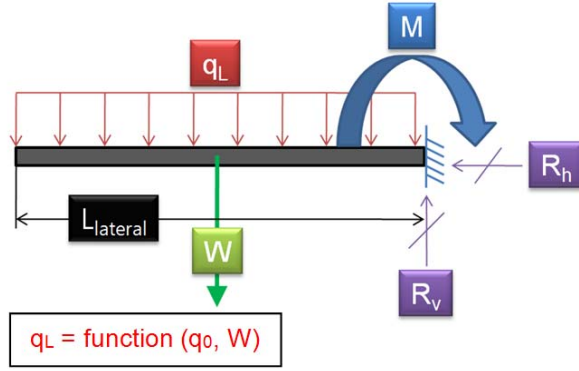


Fig. 4 Free Body Diagram of overhead luggage rack – (ii)

$$\begin{cases}
 + \rightarrow \sum F_x = 0 : R_h = 0 \\
 + \uparrow \sum F_y = 0 : R_v - (q_L \times L_{lateral}) = 0 \\
 \Rightarrow R_v = \left( \frac{F_{span}}{L_{lateral}} \right) \times L_{lateral} \\
 + \curvearrowright \sum M = 0 : \frac{L_{lateral}}{2} \times (q_L \times L_{lateral}) = M
 \end{cases} \quad (2)$$

B. 250lb 집중 하중조건: APTA Standard SS-C&S-006-98 [2]

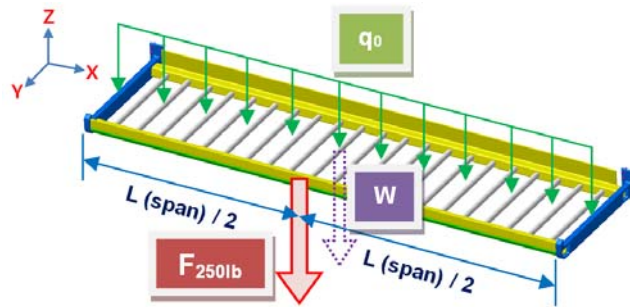


Fig. 5 Free Body Diagram of overhead luggage rack – (iii)

선반의 한 경간(徑間, Span)당 하중은 아래와 같다.

$$F_{span} = (M_{rack} + F_{250lb}) + M_{luggage} = \left\{ \left( \frac{W + F_{250lb}}{4} \right) + (q_0 \times L) \right\} \quad (3)$$

또한, 평형 방정식(Equilibrium Equation)을 통해 선반에 작용하는 힘(Reaction Force)과 모멘트(Moment)를 구할 수 있으며, 이때 선반은 외팔보(Cantilever beam) 지지 구조로 간주한다.

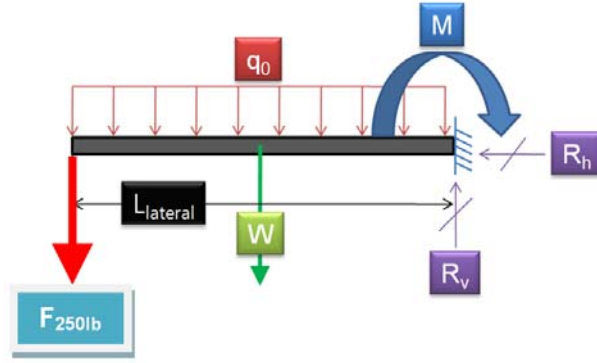


Fig. 6 Free Body Diagram of overhead luggage rack – (iv)

$$\begin{cases}
 + \rightarrow \sum F_x = 0: R_h = 0 \\
 + \uparrow \sum F_y = 0: R_v - \left\{ \left( \frac{W + F_{250lb}}{4} \right) + (q_0 \times L) \right\} = 0 \\
 \Rightarrow R_v = F_{span} \\
 + \curvearrowright \sum M = 0: \left[ \frac{L_{lateral}}{2} \times \left\{ \frac{W}{4} + (q_0 \times L) \right\} + \left( L_{lateral} \times \frac{F_{250lb}}{4} \right) \right] = M
 \end{cases} \quad (4)$$

### 2.1.3 물성

선반 취부에 사용된 나사의 물성은 아래와 같으며, ISO-3506-1 [3] 규격을 따른다.

Table 3 Mechanical properties of hardware for #10-24UNCx1”L

Diameter [in]	Grade	$\sigma_{UTS}$ [psi]	$\sigma_{yield}$ [psi]	$\tau_{UTS}^{1)}$ [psi]	$A_s$ [in <sup>2</sup> ]	$F_{preload}$ [lbs]
0.19	A2-70	101,526.4	65,266.98	58,885.31	0.0175	600

또한, 선반 자체 재질에 대한 물성은 아래와 같다.

Table 4 Mechanical properties used to the overhead luggage rack

Material & Grade	$\sigma_{yield}$ [ksi]	$\tau_{yield}^{2)}$ [ksi]	$\sigma_{UTS}$ [ksi]	$\tau_{UTS}^{1)}$ [ksi]	Elongation [% and gauge length]	E [ksi]	G [ksi]	Remark
A6063-T5	16	9.3	22	12.6	8	10,152.7	2,711.5	Tubes & Rack molding frame
AC7A-F (Casting)	-	-	30.5	17.7	12	10,152.7	2,711.5	Support bracket

주 1) 최대전단강도(Ultimate shear strength) =  $0.58 \times \sigma_{UTS}$  [4]

주 2) 전단항복강도(Shear yield strength) =  $0.58 \times \sigma_{yield}$  [4]

## 2.2 나사 강도 계산

### 2.2.1 폰 미세스 응력 이론

본 계산에는 폰 미세스 응력 이론(von Mises Stress Criterion)을 이용하였으며, 기준 좌표 방향별 나사에 작용하는 힘을 구한 후, 다음의 복합응력을 계산하여 최종적으로 선반 취부 나사에 작용하는 응력을 구할 수 있다.

$$\sigma_{combined}^{fastener} = \sqrt{\left(\frac{F_{preload} + \phi \times F_{per\ fastener\ tension}}{A_{shear}}\right)^2 + 3 \times \left(\frac{F_{per\ fastener\ shear}}{A_{shear}}\right)^2} \quad (5)$$

여기서,

$F_{preload}$ : 나사의 초기체결축력

$\phi$ : 이음부 강성계수(Joint Stiffness Factor)

### 2.2.2 안전율

폰 미세스 응력 이론(von Mises Stress Criterion)을 이용한 나사에 작용하는 복합응력을 구한 뒤, 최종적으로 다음 '식 (6)'로부터 안전율(Margin of Safety)을 구하여 나사의 강도 적합성을 평가하게 된다.

$$MS = \frac{\sigma_{UTS}^{fastener}}{\sigma_{combined}^{fastener}} - 1 \quad (6)$$

## 2.3 유한요소해석

선반 각 부재의 기계적 물성값을 이용하여 유한요소 기법(Finite Element Analysis)을 통해 선반 자체 재질의 강도에 대한 적정성을 평가한다.

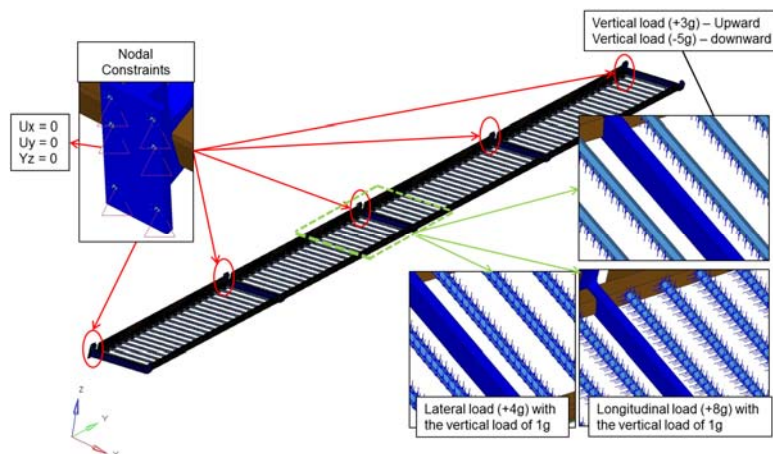


Fig. 7 Analysis load cases for the overhead luggage rack

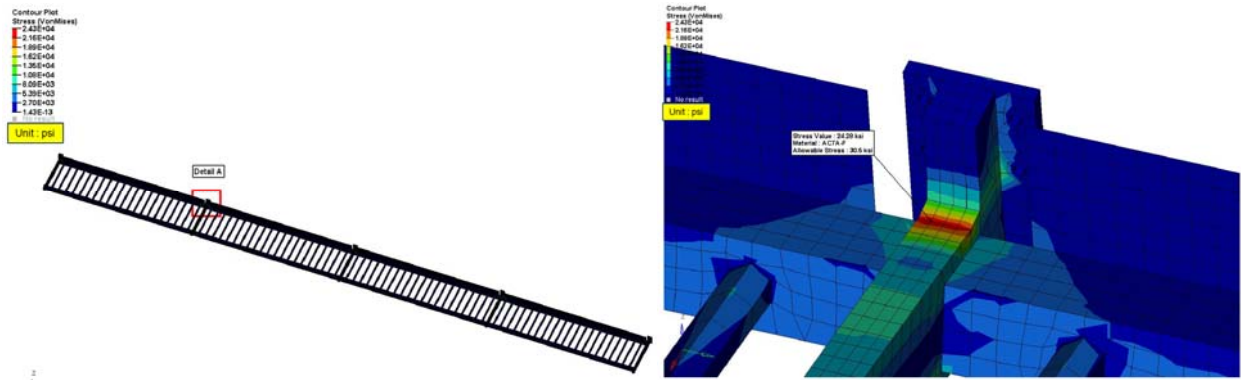


Fig. 8 Analysis result of stress distribution acting on vertical load (-Z)

따라서, 각 X, Y, Z 좌표 방향별 선반에 작용하는 최대응력 값을 도출한 뒤, 선반 재료의 최대허용응력 값과 비교하여 안전율(Margin of Safety)을 구하여 선반의 선정재질에 대한 강도의 구조 안전성을 판단하게 된다.

### 3. 결론

재료의 외력에 의한 파괴를 예측하는 폰 미세스 응력 이론(von Mises Stress Criterion)을 이용한 철도차량 의장 설치품인 선반 취부나사의 강도해석 및 선반 자체 재질에 대한 유한요소해석을 이용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 철도 기준좌표 각 방향에 대한 나사에 가해지는 복합응력을 구하여 나사의 강도 안전성을 판단하고 결과적으로 설계 목적에 부합하는 나사를 선정하는 기준을 세우게 된다.
- (2) 제작에 사용된 선반의 재질에 대한 기계적 물성치를 입력값으로 선반의 3D 모델을 활용한 미세요소 간 힘의 흐름을 시뮬레이션하여 응력 및 변형량 등을 유추해봄으로써, 선반 자체 제품의 안전성과 결함유무를 검증하게 된다.

### 참고문헌

- [1] 49 CFR 238.233, *Interior fittings and surfaces. Code of Federal Regulations – Title 49: Transportation.*
- [2] APTA Standard SS-C&S-006-98, *Standard for Attachment Strength of Interior Fittings for Passenger Railroad Equipment, Section 7.1, Overhead Luggage Storage Racks.*
- [3] ISO-3501-1 – *Mechanical properties of corrosion resistant stainless steel fasteners*
- [4] Text book, *Advanced strength & applied elasticity* and AAR standard, Section C, Part II, Volume 1, 4.2.2.8.