

# UIC기준에 근거한 틸팅 대차프레임의 피로강도평가

## Fatigue Strength Investigation of Bogie Frame for the Tilting Train under UIC standard

김경석\* 김남포\* 박병화\*\*  
Kim, Jung-Seok Kim, Nam-Po Park, Byung-Hwa

### ABSTRACT

This paper has evaluated the fatigue strength of a tilting bogie frame for the Korean tilting train. We have established the loading combinations for the tilting bogie frame based on the UIC standard because there are no standards for the tilting train. For this study, we have derived 31 load cases to consider tilting effect. Then, we have performed the static and fatigue analysis. From this study, we can make sure the safety of the tilting bogie.

### 1. 서론

틸팅 대차에서 차체는 틸팅 볼스타 상면에 위치한 공기스포링위에 위치하며, 틸팅 볼스타는 프레임과 스윙링크로 연결되어 곡선부에서 차체를 틸팅시키게 된다. 또한 틸팅액츄에이터는 대차 프레임과 틸팅 볼스타 사이에 설치되어 차체틸팅을 위한 힘을 발생시키게 된다. 이상에서 알 수 있듯이 틸팅차량을 대차에는 기존궤도차량의 대차에는 존재하지 않는 틸팅 볼스타, 스윙링크 및 액츄에이터가 추가로 필요하게 된다. 따라서 틸팅 대차의 구조강도평가를 위해서는 이러한 구성요소들에 유기적인 동작에 의해 유발되는 차체의 틸팅시 발생하는 하중을 정확히 도출하고 이를 적용한 구조해석을 수행해야 한다. 본 연구에서는 한국형 틸팅 열차의 대차 프레임의 구조강도해석을 통해 틸팅 대차의 피로강도평가를 수행하였다.

일반적인 대차에 대한 구조강도 평가시 KS R9210, JIS E4207, JIS E4208 또는 UIC 515/615-4 규격에 근거한 강도평가를 수행한다. 그러나 틸팅대차 프레임의 경우에는 이러한 표준화된 규격이 아직 마련되어 있지 않으며, 현재 틸팅열차가 운행중인 유럽의 철도선전국의 경우 각 국가에 적합한 독자적인 규격을 적용하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 개발중인 한국형 틸팅 열차의 대차 프레임의 피로강도평가를 위해 UIC615-4규격을 근간으로 하여 대차프레임에 대한 피로평가를 수행하고 이에 틸팅 차량에서만 존재하는 아래의 조건을 고려한 하중조건을 추가 하여 틸팅시 하중조건을 도출하였다.

- ① 곡선부 주행시 차체의 틸팅에 따른 대차 사이드 프레임 파우측에서의 하중 재분배 효과
- ② 기존차량 대비 곡선부 고속주행에 따른 초과 횡가속도 효과
- ③ 차체 틸팅시 틸팅 액츄에이터 동작에 의한 액츄에이터 하중

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 연세대학교 대학원

위와 같은 틸팅시 하중조건을 정적인 상태에서 도출하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서 틸팅

차량에 대한 동적인 모델링을 통해서 위의 모든 조건을 고려한 하중조건을 도출하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발중인 한국형 뒤틀림차량의 대차의 구성도를 나타낸 것이다.

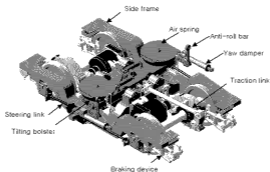


Fig. 1 Schematic diagram of a tilting bogie for M car.

## 2. UIC조건에 따른 강도평가

UIC에서 규정하는 대차 프레임에 대한 하중조건은 UIC 615-4 규격에서는 동력대차와 UIC 515-4 부수대차에 대한 하중조건을 규정하고 있다. 본 연구에서는: 동력대차 하중규격에 근거한 평가를 수행하였다. UIC에서는 하중조건을 예외하중(exceptional load), 주운용하중(main-in service load) 및 특수운용하중(particular in service load)로 구분하고 있는데 본 연구에서는 이에 뒤틀림 하중조건을 추가하였다. Fig. 2와 3은 각각 구조해석을 위한 유한요소 모델링과 경계조건을 나타낸 것이다. 구조해석을 위한 뒤틀림대차 유한요소 모델의 총 요소수는 50821개이고 결점수는 56823개로 구성되어 있다. 뒤틀림대차 프레임은 인장한 부재를 갖는 강관들을 이용한 용접구조물이므로 이러한 부분은 필요소로 모델링하고 뒤틀림 액츄에이터 브라켓, 감속기 브라켓 및 뒤틀림 액츄에이터 브라켓과 같은 주강품들은 솔리드 요소를 이용하여 모델링하였다. 경계조건은 1차 현수장치가 설치되는 브라켓 위치에 각각 x-y-z방향으로 1차 현수장치와 동일한 강성을 갖는 스프링요소로 구현하였다.

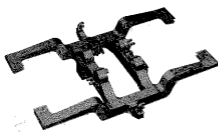


Fig. 2 FE model of the tilting bogie.

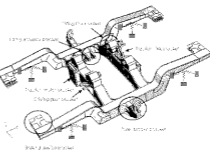


Fig. 3 Boundary condition for FEA.

### 2.1 예외하중 조건

UIC에서 규정하는 예외하중조건은 운행중 발생할 수 있는 최대하중들을 종합한 것으로 예외하중하에서 대차 프레임은 영구변형이 발생하지 않아야 한다. 대차프레임에서 발생할 수 있는 예외하중과 부파위치는 표1과 같고 하중시나리오는 표 2와 같다.

표 1 정적예외 하중조건 및 부과위치.

| 하중형태  | 하중식  | 하중부과 위치             |
|---|--|---------------------|
| 수직하중/sole-bar당<br>$F_{z1max} = F_{z2max}$ (N) | $\frac{Lg}{2n_b}(m_n + C_1 - n_b m^4)$               | 틸팅링크<br>설치부에 부과     |
| 좌우하중/대차당<br>$F_{y1max}$ (N)                   | $2\left(10^4 + \frac{(m_n + C_1)g}{3n_e n_b}\right)$ | 틸팅 액츄에이터<br>설치부에 부과 |
| 비틀림 하중, $F_{tmax}$ (N)                        | 트래의 10% 비틀림 조건                                       | 1차 현수장치에 부과         |
| 전후하중, $F_{xmax}$ (N)                          | $F_x = 2\mu m_{axel}$                                | 걸인링크<br>설치부에 부과     |

표 2 예외하중조건 하중부과 시나리오.

| Load case | 수직하중     |          | 전후하중   | 비틀림 하중 | 좌우하중   | 제동하중 (브레이크) |
|-----------|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|
|           | $F_{z1}$ | $F_{z2}$ | $F_x$  | G      | $F_y$  | $F_b$       |
| 1         | 24407.5  | 24407.5  |        |        |        |             |
| 2         | 15864.9  | 15864.9  | 9000.0 |        |        |             |
| 3         | 15864.9  | 15864.9  |        | 921.26 |        |             |
| 4         | 15864.9  | 15864.9  |        |        | 9407.5 |             |
| 5         | 15864.9  | 15864.9  |        |        |        | 2250        |

Fig. 4는 예외하중조건에 대한 구조해석 결과들이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 동하중 계수 2g를 적용한 첫 번째 하중조건에서 최대응력은 사이드 프레임의 굴곡부에서 발생하였고 값은 약  $24.8\text{kgf/mm}^2$ 으로 항복강도  $33\text{kgf/mm}^2$ 을 초과하지 않음을 알 수 있다. 또한 나머지 예외하중조건에 대해서도 항복이 발생하지 않았다.

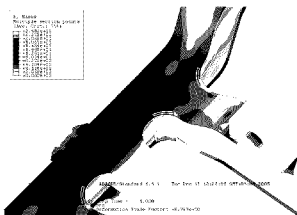


Fig. 4 Von-Mises stress distribution for load case 1 of the exceptional load.

## 2.2 주운용 하중 조건

주요 운행 하중조건은 수직과 좌우 하중 및 트랙의 비틀림 효과의 중첩에 대해서 피로균열이 발생하지 않음을 검증하기 위한 하중조건이다. UIC에서는 적선타랙, 곡선부, 대차의 롤링(rolling)과 마운싱(bouncing)에 의해 유발되는 동하중 변화 및 트랙의 비틀림을 고려하도록 조건이 구성되어 있다. 주운용하중조건에서의 각 하중의 산출법과 부과위치는 표 3과 같다.

표 3 운행하중조건에서의 각 하중의 산출법과 부과위치

| 하중조건                    | 하중식                                      | 하중부과 위치             |
|-------------------------|--|---------------------|
| 수직하중sole-bar당, $F_x(N)$ | $\frac{g}{2n_b}(m_v + 1.2C_2 - n_b m^+)$ | 틸팅링크<br>설치부에 부과     |
| 좌우하중/대차당, $F_y(N)$      | $0.5(F_x + 0.5m^+ g)$                    | 틸팅 액츄에이터<br>설치부에 부과 |
| 비틀림 하중                  | 트랙의 5% 비틀림 조건                            | 1차 현수장치에 부과         |

주운용 하중에 대한 시나리오는 표 4와 같다.

표 4 주운용하중 시나리오.

| Load case | 수직하중                                |       | 좌우하중   | 비틀림 하중 |     |     |     |
|-----------|-------------------------------------|-------|--------|--------|-----|-----|-----|
|           | Fz1                                 | Fz2   |        | G1     | G2  | G3  | G4  |
| 0         | Installation of the traction motors |       | 0      |        |     |     |     |
| 1         | 12320                               | 12320 | 0      |        |     |     |     |
| 2         | 11088                               | 8624  | 0      |        |     |     |     |
| 3         | 11088                               | 8624  | +7100  |        |     |     |     |
| 4         | 16016                               | 13552 | 0      |        |     |     |     |
| 5         | 16016                               | 13552 | +7100  |        |     |     |     |
| 6         | 8624                                | 11088 | 0      |        |     |     |     |
| 7         | 8624                                | 11088 | - 7100 |        |     |     |     |
| 8         | 13552                               | 16016 | 0      |        |     |     |     |
| 9         | 13552                               | 16016 | - 7100 |        |     |     |     |
| 10        | 11088                               | 8624  | + 7100 | 461    |     |     | 461 |
| 11        | 11088                               | 8624  | + 7100 |        | 461 | 461 |     |
| 12        | 16016                               | 13552 | + 7100 | 461    |     |     | 461 |
| 13        | 16016                               | 13552 | + 7100 |        | 461 | 461 |     |
| 14        | 8624                                | 11088 | - 7100 | 461    |     |     | 461 |
| 15        | 8624                                | 11088 | - 7100 |        | 461 | 461 |     |
| 16        | 13552                               | 16016 | - 7100 | 461    |     |     | 461 |
| 17        | 13552                               | 16016 | - 7100 |        | 461 | 461 |     |

### 2.3 틸팅하중 조건

본 연구에서 개발중인 유틸차량의 경우에는 이전에서 언급한 바와 같이 UIC에서 규정하고 있는 하중조건에 의해 유틸 차량에서만 존재하는 아래의 조건을 고려한 하중조건을 추가로 고려하여 유틸차 하중조건을 도출하였다. 본 연구에서는 차체 유틸에 의한 하중조건을 도출하기 위해 동적해석(Dynamic analysis)을 수행하였고 운행시나리오 중 가장 극단적인 상황을 고려하였다. 동적해석을 통해서 구해진 좌우 유틸 링크에 부재되는 수직방향 하중의 예시는 Fig. 5와 같다.

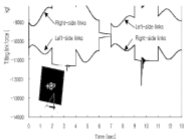


Fig. 5 Vertical load history of the tilting links.

표 5 유틸차체에 대한 시나리오.

| Load case |    | 역유에이머 마다씩에 부재되는 하중 (kgf) |            | 유틸 역유에이머 하중(kgf) | 비틸링 하중 (kgf) |     |     |     |
|-----------|----|--------------------------|------------|------------------|--------------|-----|-----|-----|
|           |    | $F_{right}$              | $F_{left}$ | $F_{tilt}$       | G1           | G2  | G3  | G4  |
| +8% 유틸    | 18 | 7138                     | 18836      | -30000           |              |     |     |     |
|           | 19 | 7138                     | 18836      | -30000           | 451          |     |     | 451 |
|           | 20 | 7138                     | 18836      | -30000           |              | 451 | 451 |     |
| -8% 유틸    | 21 | 16247                    | 7775       | +30000           |              |     |     |     |
|           | 22 | 16247                    | 7775       | +30000           | 451          |     |     | 451 |
|           | 23 | 16247                    | 7775       | +30000           |              | 451 | 451 |     |

본 연구에서는 주운동회중과 유틸하중 하중시나리오에 대해 대차(Msp)에 대한 구조해석을 수행하고 피로검사를 수행하였다.

### 3 피로강도 평가

이상의 하중조건하에서 수행한 피로강도 평가 결과는 아래와 같이 정리하였다. 본 연구에서는 피로 평가를 위해 주운용하중과 틸팅하중은 일상적인 열차운행중에 발생하는 하중조건으로 간주하여 두 하중조건을 조합하여 피로평가를 수행하였다. 이전의 하중조건하에서 수행된 유한요소 해석 결과를 바탕으로 대차 프레임의 모든 질점에서 UIC 규격에서 규정의 평균응력과 응력진폭을 피로내구선도 상에 나타낸 것은 Fig. 6과 같다. 피로안전계수가 가장 낮은 부위는 트랜شم과 만나는 사이드 프레임 내의 리브에서 발생하였다. 그러나 피로안전도 평가에서 모든 질점이 응력후 그라딩인선 이하에 위치하고 있으며 피로내구성을 잘 만족하고 있었다.

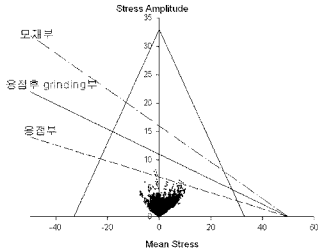


그림 6 주운용하중과 틸팅하중에 대한 피로내구선도.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 현재 개발중인 틸팅대차에 대한 피로내구성 평가를 위해 대차에 부과되는 각종 하중조건을 도출하였다. 또한 기존 대차와 다른 틸팅대차의 하중조건을 동역학 해석을 통해서 도출하였다. 또한 틸팅 대차프레임에 대한 피로평가를 통해 대차프레임의 피로안전성을 확신할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. J. T. Pearson, R. M. Goodall and I. Pratt: Proc Instn Mech Engrs Vol. 212 Part F (1998), p. 43-60
2. J. Forstberg : Motion-Related Comfort in Tilting Trains VTI Rapport 449A (2000).
3. S. Koyanagi, I. Okamoto, S. Fujimori and K. Terada : JSME International Journal Vol. 32 No.2 (1989), p. 316-322.
4. UIC Code 615-4 : Motive Power Units Bogies and Running Gear Bogie Frame Structure Strength Tests (1994).

#### 후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업으로 지원된 “틸팅시스템 실용기술개발”과제의 연구결과와 일부입니다.