

국제 철도 연맹 규정(UIC Code)에 따른 RCV 대차 프레임 구조 안전성 평가

RCV bogie frame structure safety evaluation according to UIC Code

노상철^a, 박지형^b, 강신유^{c*}
Sang Cheol Rho^a, Ji Hyeong Park^b, Shin You Kang^{c*}

^a Kumchun System Co. Ltd, Technical Director, Chungcheongnam-do, Dangjin City, 31739, Republic of Korea

^b Department of Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Graduate School of Industrial Technology, Chuncheon 24341, Republic of Korea

^c Department of Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Professor, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Received 25 October 2023; Revised 24 November 2023; Accepted 28 November 2023

Abstract

Nowadays, traffic congestion is emerging as a major problem due to the rapid population growth and the increase in automobiles. The train is a convenient means of transportation that can efficiently solve these problems. Trains have been developed in line with human aspirations for a long time, but research on safety is still insufficient. This study aims to check safety by conducting static tests and fatigue tests on bogie frames, and to help develop bogie frames in the future. For the static test, a strain gauge was attached to the point where the local stress concentration was expected beforehand, and the result value was derived, compared with existing theories, and expressed as a Goodman diagram. In the fatigue test, a total of 10 million loads were applied over three stages, and no cracks appeared in the non-destructive test conducted after each stage. Both tests were conducted according to the strict test method of the bogie frame presented by the UIC Code. It satisfied both fatigue life and strength evaluation criteria and was judged to be a bogie frame usable for safe train production.

Keywords: UIC, UIC Code, Bogie frame, Static test, Fatigue test, train, train frame

1. 서론

인구가 급격히 증가하고 자동차의 운행이 늘어난 현대 사회에서 교통 문제는 나날이 깊어지고 있다. 기차는 이런 문제들을 효과적으로 안전하게 분담할 수 있는 친환경 대중교통이다. 특히 기차는 안전성, 정시성, 운송 능력 등의 이점 덕분에 많은 사람이 이용하는 교통편이다.

이런 이유로 기차 시장은 국내외를 막론하고 큰 규모로 성장해 왔으며 국제철도연맹(UIC)은 이러한 발전에 맞춰 기차 제작에 엄격한 규정(Code)을 제시하고 있다. UIC Code 515-4^[1]/615-4^[2]는 정적 시험과 피로 시험의 방법을 제시하고 그 결과를 바탕으로 피로 강도와

안전성을 평가하도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 이 규정에 따라 RCV 대차 프레임의 구조 안전성을 시험하고 안전한 기차 운용에 기여하고자 한다.

대차 프레임은 기차의 주행 장치를 구성하고 있는 기초 틀로써 안전한 기차 운행에 필수적인 핵심 부품이다. 지난 2022년 1월 발생한 KTX 탈선 사고도 충북 영동터널 인근에서 운행 중인 기차의 대차 프레임이 파손되면서 일어났다^[3]. 정해진 선로 위를 적절한 속도로 달리는 기차의 사고는 자동차 사고에 비하면 무척 적은 확률로 발생하지만 한번 일어나면 대형 참사로 이어질 수 있는 만큼 제작에 앞서 정밀한 시험과 검증이 필요하다.

정적 시험은 Solid works를 이용한 사전 구조 해석을 통해 대차

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6373

E-mail address: sykang@kangwon.ac.kr (Shin You Kang).

프레임의 고응력 집중 부위에 로제트 스트레인 게이지를 부착하여 실시하였다. 제시된 기준으로 계산한 9개의 로드 케이스를 차례로 재하해 스트레인 값을 확인하였다. 그 값들을 활용하여 변형률을 계산하여 최대전단응력, 변형에너지설의 파손조건과 비교해 예측하였다.

피로 시험은 정적하중을 여러 동적 효과를 구현해 주기에 맞게 단계별로 재하해 균열 발생 여부를 확인하였다. 1단계 600만 회, 2단계 200만 회, 3단계 200만 회 등 총 1000만 회의 반복되는 부하를 가하고, 단계별 종료 시 비파괴 검사(자분탐상)를 실시해 균열을 확인하고 피로 강도를 검증하였다.

2. 대차 프레임

2.1 대차 프레임

시험한 RCV 대차 프레임은 Fig. 1과 같다. 대차 프레임은 SM490A를 재료로 만들어졌으며 질량 6,215kg로 제작되었다. RCV 대차 프레임으로 제작하는 기차는 공차 중량 37,000kg의 특수 크레인 기차로 철도의 유지 보수, 사고 처리를 위해 운용된다. 한 량의 기차는 두 개의 대차 프레임으로 구성된다.

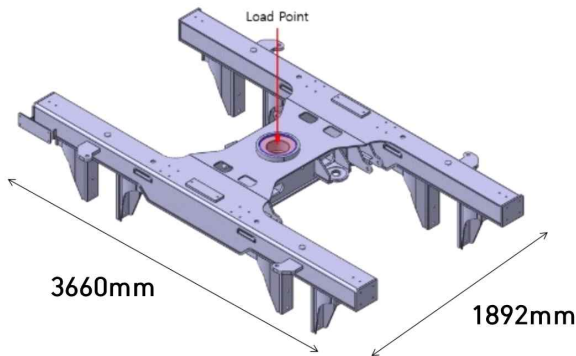


Fig. 1 RCV Bogie frame

Table 1 Material of bogie frame

Designation		SM490A
Yield strength		355 [MPa]
Tensile strength		490 [MPa]
Fatigue strength	Basic material	155 [MPa]
	Grinding after welding	110 [MPa]
	Welding	70 [MPa]

3. 정적 시험

3.1 정적 시험

정적 시험은 수직 시험력과 횡 방향 시험력을 산출된 9개의 로드 케이스에 따라 차례로 재하하여 직선 트랙, 곡선, 롤링 및 바운스, 선로 꼬임 등의 4가지 시나리오를 적용했다. 유한요소 해석을 통해 국부 응력의 집중이 예상되는 부위를 확인하고 로제트 스트레인 게이지를 부착하였다. 측정된 변형률로 주응력, 최대전단응력, 상당응력 등을 구해 파손조건과 비교하고 굿맨 다이어그램으로 표현해 안전성을 판단하였다.

3.2 정적 시험 장치

정적 시험 장치는 Fig. 2와 같이 구성하였다. 유압을 재하할 수 있는 제어 장치와 유압 펌프, 실린더가 포함되어 정밀한 하중 제어가 가능하다.



Fig. 2 Static test device

3.3 하중 조건

UIC Code를 바탕으로 대차 질량, 공차 중량, 탑승 인원 및 화물의 질량 등을 종합적으로 고려하여 시험 하중을 정의하였다. 고속 주행, 악천후, 차체 흔들림 등의 악조건 속에서도 파손 없이 운행할 수 있는지 확인하기 위해서다. 하중 계산을 위해 필요한 항목은 Table 2와 같다.

Table 2 Load calculation condition

Division	Formula	Mass	
Bogie frame weight	m^+	6,215 kgf	
Unladen weight	m_{com}	37,000 kgf	
Passenger weight	C_2	80 kgf	154.5 kgf
Luggage weight		74.5 kgf	

3.4 정적 시험 하중

식 (3.1)과 (3.2)는 UIC Code에 규정된 공식이며 아래와 같이 Table 2의 하중을 대입하여 수직 시험력과 횡 방향 시험력을 구했다.

(1) 수직 시험력

$$F_Z(N) = \left(\frac{m_{vom} + 1.2C_2 - 2m^+}{4} \right) \cdot g \quad (3.1)$$

위 수직 시험력 공식에 Table 2의 하중을 대입하면 다음과 같다.

$$F_Z(N) = \left(\frac{37000 + 1.2 \times 154.5 - 2 \times 6215}{4} \right) \times 9.8$$

$$= 60650 [N]$$

(2) 횡 방향 시험력

$$F_Y(N) = 0.5(F_Z + 0.5m^+ \cdot g) \quad (3.2)$$

위 횡 방향 시험력 공식에 Table 2의 하중을 대입하면 다음과 같다.

$$F_Y(N) = 0.5(60650 + 0.5 \times 6215 \times 9.8)$$

$$= 45551 [N]$$

위와 같이 구한 각 시험력은 수직 시험력 60,650 N (6,189 kgf), 횡 방향 시험력 45,551 N (4,648 kgf)이다. 준정적 및 동적 효과를 위해 기준서에 제시된 Table 3과 같이 서로 다른 하중을 재하해 시험하였다. Table 4는 Table 3에 제시된 공식에 따라 계산한 하중 값이다. (for rolling $\alpha = 0.1$, for bouncing $\beta = 0.2$)

Table 3 Load scenario formulas in static test

Load cases	Vertical force		Transverse force
	F_{z1}	F_{z2}	
1	F_z	F_z	0
2	$(1+\alpha-\beta)F_z$	$(1-\alpha-\beta)F_z$	0
3	$(1+\alpha-\beta)F_z$	$(1-\alpha-\beta)F_z$	$+F_y$
4	$(1+\alpha+\beta)F_z$	$(1-\alpha+\beta)F_z$	0
5	$(1+\alpha+\beta)F_z$	$(1-\alpha+\beta)F_z$	$+F_y$
6	$(1-\alpha-\beta)F_z$	$(1+\alpha-\beta)F_z$	0
7	$(1-\alpha-\beta)F_z$	$(1+\alpha-\beta)F_z$	$-F_y$
8	$(1-\alpha+\beta)F_z$	$(1+\alpha+\beta)F_z$	0
9	$(1-\alpha+\beta)F_z$	$(1+\alpha+\beta)F_z$	$-F_y$

Table 4 Load calculation in static test

Load cases	Vertical force [kgf]		Transverse force [kgf]
	F_{z1}	F_{z2}	
1	6,189	6,189	0
2	5,570	4,332	0
3	5,570	4,332	+ 4,648
4	8,046	6,808	0
5	8,046	6,808	+ 4,648
6	4,332	5,570	0
7	4,332	5,570	- 4,648
8	6,808	8,046	0
9	6,808	8,046	- 4,648

3.5 정적 시험 수행

시험 수행에 앞서 Solid Works를 이용하여 사전 구조 해석을 수행하였다. Fig. 3은 구조 해석의 결과이며 응력 집중 부위를 확인해 로제트 스트레인 게이지 부착 위치를 결정하였다. Fig. 4처럼 평면 도면 위에 스트레인 게이지 부착 위치를 표시하고 대차에 부착하였다.

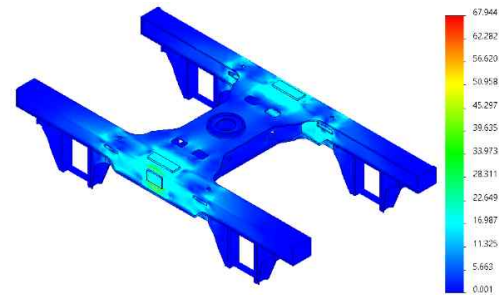


Fig. 3 Structure analysis of bogie frame

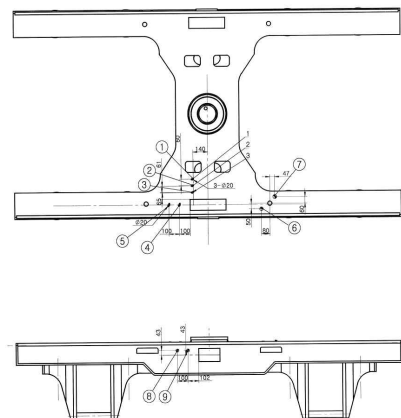


Fig. 4 Place to attached gauges

Fig. 5 비틀림 측정 장치를 설치하여 하중 재하 간 비틀림을 관찰해 동적 효과가 적용되는지 점검하였다. 기준서에 따라 축간거리 2,200mm의 0.5%인 11mm의 비틀림 효과를 구현했다. 이는 대차의 대각선 반대 방향 전체의 비틀림이므로 중심에서 한쪽 축까지의 거리 1,100mm의 0.5%인 5.5mm가 양쪽 다른 Z축 방향 변위로 적용되는지 시험 중 지속 확인하였다.



Fig. 5 Twist measuring device

3.6 정적 시험 결과

Table 4의 9개 load case를 차례로 재하하였으며, 부착한 총 8개의 로제트 스트레인 게이지, 3회의 반복된 정적 시험을 통해 216개의 계산 값을 분석하였다. 첫 번째 정적 시험의 5번 load case, 3번 스트레인 게이지에서 최대의 상당응력이 측정되어 아래에 계산식 및 파손조건 비교 이론을 정리하였다. 결과 값은 Table 5와 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= \epsilon_x \cos^2 \theta_a + \epsilon_y \sin^2 \theta_a + \gamma_{xy} \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \epsilon_b &= \epsilon_x \cos^2 \theta_b + \epsilon_y \sin^2 \theta_b + \gamma_{xy} \sin \theta_b \cos \theta_b \\ \epsilon_c &= \epsilon_x \cos^2 \theta_c + \epsilon_y \sin^2 \theta_c + \gamma_{xy} \sin \theta_c \cos \theta_c \\ (\theta_a &= 0^\circ, \theta_b = 45^\circ, \theta_c = 90^\circ) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= \epsilon_x = -82 \\ \epsilon_b &= \frac{1}{2} \epsilon_x + \frac{1}{2} \epsilon_y + \frac{1}{2} \gamma_{xy} = 83 \\ \epsilon_c &= \epsilon_y = -84 \\ \gamma_{xy} &= 2\epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c = 332 \end{aligned} \quad (3.4)$$

식 (3.4)를 통해 변형률과 전단응력을 구했다. 식 (3.5), (3.6)은 평면 응력을 구하기 위한 식이다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \\ &= \frac{210 \times 10^9}{1-0.3^2} (-82 + 0.3 \times -84) \cdot 10^{-6} \\ &= -24.74 [MPa] \end{aligned} \quad (3.5)$$

여기서, 탄성계수 $E = 210$ [GPa]^[4]
포아송 비 $\nu = 0.3$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \\ &= \frac{210 \times 10^9}{1-(0.3)^2} (-84 + 0.3 \times -82) \cdot 10^{-6} \\ &= -25.06 [MPa] \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} = 80 \cdot 10^9 \times 332 \cdot 10^{-6} = 26.56 [MPa] \quad (3.7)$$

여기서, 전단 탄성계수 $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 80$ [GPa]

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-24.74 - (-25.06)}{2}\right)^2 + (26.56)^2} \\ &= 26.56 [MPa] \end{aligned} \quad (3.8)$$

식 (3.8)에서 구한 최대전단응력(τ_{max})을 ‘최대전단 응력설’^[5]에 대입하여 파손조건과 비교하였다.

파손조건은 $\tau_{max} \geq \frac{1}{2} \sigma_Y$ 로서, 최대전단응력이 재료의 항복강도 절반을 넘으면 파손된다. 여기서 최대전단응력은 26.56 [MPa]로, 재료 SM490A의 항복강도(355 [MPa], Table 1)의 절반인 177.5 [MPa]를 넘지 않았으므로 안전하다고 판단했다.

추가적으로 변형에너지설에 대입해 안전성을 확인해 보기 위해 주응력과 상당응력을 구하고 인장항복강도와 비교하였다.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{-24.74 + (-25.06)}{2} \\ &+ \sqrt{\left(\frac{-24.74 - (-25.06)}{2}\right)^2 + (26.56)^2} \\ &= 1.66 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{-24.74 + (-25.06)}{2} \\ &- \sqrt{\left(\frac{-24.74 - (-25.06)}{2}\right)^2 + (26.56)^2} \\ &= -51.46 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{(1.66)^2 + (-51.46)^2 - (1.66) \cdot (-51.46)} \\ &= 52.31 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

변형에너지설^[5]에서는 2축 응력인 경우 상당응력이 인장항복강도를 넘으면($\sigma_{VM} \geq \sigma_Y$) 파손된다. 본 연구에서는 상당응력 52.31 [MPa]이 재료 SM490A의 인장항복강도 355 [MPa]을 넘지 않았으므로 안전하다고 판단했다.

Table 5 Stress calculation in static test

Load cases 5			
Gauge # 3	Ch. 07	-82	[μSt]
	Ch. 08	83	[μSt]
	Ch. 09	-84	[μSt]
	σ_x	-24.74	[MPa]
	σ_y	-25.06	[MPa]
	τ_{xy}	26.56	[MPa]
	γ_{xy}	332	
	σ_1	1.66	[MPa]
	σ_2	-51.46	[MPa]
	τ_{max}	26.56	[MPa]
	σ_{VM}	52.31	[MPa]

위와 같이 최대전단응력설, 변형에너지설 등으로 판단한 정적 시험 결과 RCV 대차 프레임은 안전한 기차 생산이 가능할 만큼 충분한 강도를 가졌음을 확인했다.

4. 피로 시험

4.1 피로 시험

피로 파괴는 고체 재료에 반복적으로 힘을 가하면 인장강도보다 낮은 응력에서도 재료가 파괴되는 것을 말한다. 고체 재료로 만들어진 대차 프레임도 피로 파괴에서 자유로울 수 없다. 또, 한 번 파손되면 큰 사고로 이어질 수 있으므로 제작 단계에서부터 엄격한 기준에 의해 생산되어야 한다⁷⁾.

피로 시험은 총 3단계로 나눠 증가된 준정적 요소, 동적 요소의 하중을 재하하였다. 1단계(100%) 600만 회, 2단계(120%) 200만 회, 3단계(140%) 200만 회 등 총 1,000만 회의 하중을 가하고 각 단계가 끝날 때마다 비파괴 검사(자분 탐상, 총 3회)를 실시하여 균열 여부를 확인하였다.

4.2 피로 시험 수행

피로 시험의 하중은 정적 시험 하중을 활용하여 결정한다. 수직 시험력은 정적 시험 하중인 60,650 N, 횡 방향 시험력은 정적 시험 하중의 절반인 22,776 N을 재하한다. 이는 변하지 않는 정적 구성 요소의 하중이며, 준정적 및 동적 구성 요소를 적용해 일정한 하중 주기를 가진다.

(1) 수직 시험력

- 정적 구성 요소 : $F_Z = F_{ZS1} = F_{ZS2} = 60,650 \text{ N (6,189kgf)}$
- 동적 요인 : $\alpha = 0.1$ (for rolling), $\beta = 0.2$ (for bouncing)
- 준정적 구성 요소 : $F_{ZQ1} = F_{ZQ2} = \pm \alpha \cdot F_Z$
 $= \pm 0.1 \times 60,650 \text{ N} = \pm 6,065 \text{ N (619kgf)}$
- 동적 구성 요소 : $F_{ZD1} = F_{ZD2} = \pm \beta \cdot F_Z$
 $= \pm 0.2 \times 60,650 \text{ N} = \pm 12,130 \text{ N (1,238kgf)}$

(2) 횡 방향 시험력

- 준정적 구성 요소 : $F_{YQ} = \pm 0.25(F_Z + 0.5m^+ \cdot g)$
 $= \pm 22,776 \text{ N (2,324 kgf)}$
- 동적 구성 요소 : $F_{YD} = \pm 0.25(F_Z + 0.5m^+ \cdot g)$
 $= \pm 22,776 \text{ N (2,324 kgf)}$

위 식은 1단계 600만 회의 하중을 표현한 것이다. 2단계, 3단계에서는 정적힘은 그대로 두고, 준정적 및 동적 힘에 각각 1.2, 1.4의 계수를 곱해 각 200만 회씩 하중을 재하였다.

Fig 7은 1단계에서 재하한 수직 시험력 데이터를 그래프로 표현한 것이다. 모든 시험에서 계산한 시험력이 정확히 적용되는지 확인하였다.

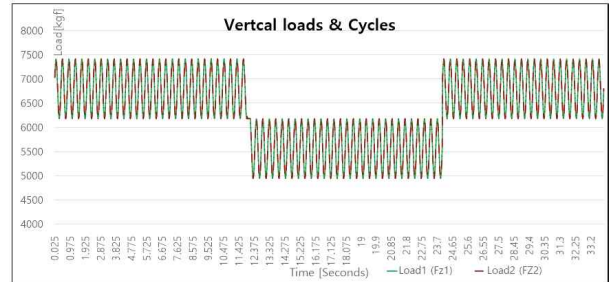


Fig. 7 Vertical load graph in fatigue test (step 1)

비틀림 효과는 1단계에서 5.5mm, 2단계 6.6mm, 3단계 7.7mm를 각각 적용하고 측정 장치를 통해 피로 시험 간 지속 확인하였다. 1단계 비틀림 변위에 대한 그래프는 Fig. 8과 같다.

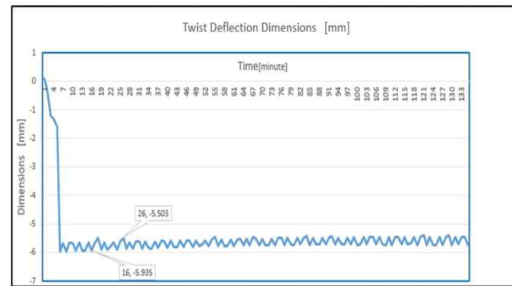


Fig. 8 Twist deflection dimensions (step 1)

4.3 비파괴 검사

비파괴 검사는 각 단계별 피로 시험이 끝날 때마다 실시했다. 총 3회의 자분 탐상 검사 간 발견된 균열은 없다.



Fig. 9 Magnetic particle detection test

4.4 피로 시험 결과

피로 시험 결과 대차에 발생한 균열이 없으므로 시험한 RCV 대차 프레임은 기차 제작에 사용할 수 있는 안전한 대차 프레임이라고 판단하였다.

5. 결 론

본 연구는 기차의 안전성을 증진하고자 대차 프레임을 정적 및 피로 시험해 강도를 점검하였다.

정적 시험에서는 대차 프레임에 로제트 스트레인 게이지를 부착하고 공식에 의해 산출된 하중을 재하였다. 시험은 총 3회 반복 실시하였으며 결과로 도출된 변형률을 바탕으로 전단응력, 주응력, 최대 전단응력을 구했다. 이를 최대전단응력설, 변형에너지설에 대입하여 파손조건과 비교해 안전하다는 결과를 도출하였다.

피로 시험에서는 하중을 3단계로 나누어 총 1000만 회 반복 재하였다. 단계별 비파괴 검사를 실시하여 균열 여부를 확인하였다. 모든 시험 과정에서 작은 균열도 발생하지 않아 기차 운행 간 안전성이 보장된 대차 프레임이라는 결과를 확인하였다.

우리나라 철도 건설, 기차 제작의 기술이 세계 어디에서도 뒤처지지 않는 높은 기술력을 갖추고 있다. 특히 국내 기업에서 만든 철도 차량은 37개국에 수출하며 세계 곳곳을 누비고 다닌다고 해도 과언이 아닐 정도로 세계 시장에서의 입지가 탄탄하다.^[8] 하지만 안전 점검이나 시험 등의 자료들은 아직 많이 부족하다. 추가로 국내에서 안전한 기차 제작을 위한 노력을 계속 기울인다면 친환경 미래 교통 수단으로 큰 성장을 이룰 수 있을 것으로 보인다.

References

- [1] UIC Code 515-4 (E), 1993, 초판, 1993년 1월 1일, International union of railways (UIC).
- [2] UIC Code 615-4 (E), 2003, 2판, 2003년 2월, International union of railways (UIC).
- [3] Song. I. G., 6 Jan.2011, 경부선 KTX 탈선 원인은?...충돌 아닌 부품 정비 불량 가능성, <<https://www.hani.co.kr/arti/area/chungcheong/1026290.html>>.
- [4] Goo. B. C., 2022, Ultrasonic Pin Peening and Fatigue Life Evaluation of SM490A Welded Specimens, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 23, No. 4 pp.574-581, 2022, Korea.

- [5] Hong J. P., 2021, 기계설계 이론과 실제 제9판, pp. 104-105, 교보 문고, 대한민국.
- [6] Hong J. P., 2021, 기계설계 이론과 실제 제9판, pp. 180-196, 교보 문고, 대한민국.
- [7] Kim J. H., 2008, A Study on Fatigue Strength Improvement of SS400 Steel Welded Parts by Shot Peening for EMU, 서울산업대학교 철도전문대학원, 대한민국.
- [8] Hyundai Rotem, 2020, ‘메이드 인 코리아’ 열차가 세계를 달린다! 현대로템 수출 이야기, <<https://blog.hyundai-rotem.co.kr/503>>.