

철도적용에서 구동장치의 피로강도에 관한 시험적 연구

Experimental Study on the Fatigue Strength of a Running Equipment in Railway Applications

윤성철^{1,✉}, 김정국¹
Sung Cheol Yoon^{1,✉} and Jeongguk Kim¹

¹ 한국철도기술연구원 신교통연구본부 (New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)
✉ Corresponding author: scyoon1@krrri.re.kr, Tel: +82-31-460-5512

Manuscript received: 2016.3.14. / Revised: 2016.6.8. / Accepted: 2016.7.21.

The truck that is used as running equipment for tank freight car support is a core structural part that supports the load of the car body and significantly influences the safety of freights and vehicles, as well as their running performance. Running equipment is composed of truck frames, wheels and wheel axles, independent suspensions, and brakes. Among these components, the truck frame supporting the load of the vehicles and freights may be the most important component. This study was carried out to analyze the structure of truck frames and to determine whether they are safe when the maximum vertical load, braking part load, and the front and rear load are applied to truck frames. This was achieved by subjecting the truck frames to stress tests and then measuring the stress on each part. The results of the stress tests showed that truck frames have a safe vehicle load design.

KEYWORDS: Truck (대차), Yield stress (항복응력), Fatigue limit (피로한도), Stress limit diagrams (응력한계선도)

기호설명

E = Young's modulus

ν = Poisson's ratio

S1 = Stress under vertical static load

S2 = Stress under vertical dynamic load

S3u = Stress under braking parts load in the upward direction

S3d = Stress under braking parts load in the downward direction

S4 (L,R) = Stress under left and right load

S5 (F,B) = Stress under front and rear load

S7 (L,R) = Stress under torsional load 2

1. 서론

한국에서 철도궤도를 사용하는 화물차량은 다른 수송수단과 비교하여 운행시간을 정확하게 지키며 큰 체적의 화물을 수송할 수 있기 때문에 편리하다고 할 수 있다.^{1,2} 황산을 수송하기 위해 제작되는 탱크차량 주행장치의 여러 부품중 대차프레임은 중요한 부품중 하나라고 할 수 있다.

대차프레임의 구조설계 상태를 검증하기 위해 대차하중시험을 실시하고자 한다. 대차하중시험을 실시하여 대차프레임의 강도를 확인하고 설계가 안전한가를 검증하는데 그 목적이 있다.

대차프레임의 형상은 Fig. 1과 같으며 대차프레임은 용접구조로서 현수장치로는 코일스프링을 사용하였으며,^{3,4} 하중시험방법은 JIS E 4208(철도 차량용 대차의 하중시험 방법)에 의거하면서 하중조건은 최대한 가혹한 조건을 선택하였다.^{5,7}

2. 시험⁸

2.1 스트레인게이지 취부

대차프레임은 좌우 방향에 대해 대칭을 이루고 전후방향에 대해서도 대칭이므로 1/4 영역에서 Fig. 1은 수직하중조건에서 응력분포를 나타낸 것이다. 수직하중 작용시 Transom 중앙부 주변에 166.7 MPa의 응력이 발생하고, 좌우하중 및 전후하중 작용시에는 각각 68.6 MPa와 49.0 MPa의 응력이 Side frame 굴곡부와 Transom 중앙부 주변에 발생하는 것으로 나타났다. 그리고, 제동하중 작용시에는 Fixed lever bracket 주위에 137.3 MPa의 응력이 발생하였으며, 비틀림하중 작용시 Side frame 굴곡부에 26.5 MPa의 응력이 발생하였다. 모든 하중에서 허용응력 324 MPa 이하의 응력이 발생하여 안전한 것으로 판단된다.

구조해석결과를 바탕으로 하여 응력집중이 예상되는 지점에 26개의 단축 스트레인게이지 (Strain Gauge)와 8개의 3축 스트레인게이지 (Rosette Strain Gauge)를 취부하여 총 50채널의 1 게이지 휘스톤브릿지 (Wheatstone Bridge)를 구성하였다.⁹

용접대차의 중량조건은 Table 1에서 알 수 있다. 부착된 스트레인게이지의 내역은 사이드 프레임 (Side Frame) 14개(1)와 Bolster cross beam 12개(7) 이었다. 여기서 괄호 안에 숫자는 3축 스트레인게이지의 개수이다. 게이지 부착위치를 Fig. 2는 Bolster의 옆면을 보여주고 Fig. 3은 Side frame의 옆면을 보여주고 있다.

2.2 수직하중 시험

수직하중은 차체자중 및 적재하중에 대해서 대차프레임이 지지하는 하중으로 수직 정하중은 최대 적재시 동적효과를 고려하지 않은 하중이며, 수직 동하중은 가장 열악한 상태로 가정하여 차체의 상하방향으로 0.5 g의 가속도를 고려한 것으로 수직 정하중의 1.5배를 고려하였다.

Table 1 Weight condition

Type	Weight (kg)
Tare weight	21,500
Freight weight	50,000
Spring bottom weight	5,400
Weight per truck	33,050

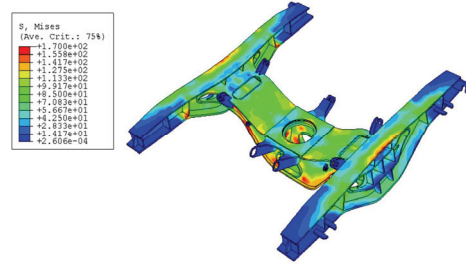


Fig. 1 Stress distribution of truck frames

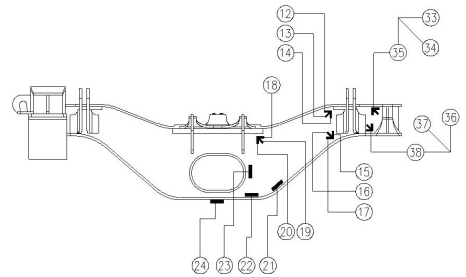


Fig. 2 Side-View of bolster

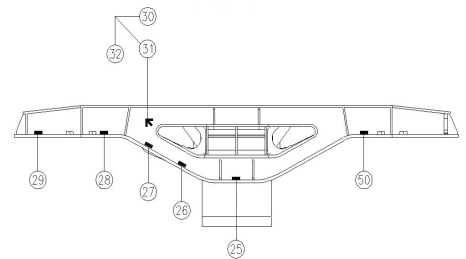


Fig. 3 Side-View of side frame

$$\begin{aligned}
 &\text{Vertical static load} \\
 &= (\text{Tare weight} + \text{Maximum loading} \\
 &\quad - \text{Spring bottom weight}) \div 2 \tag{1} \\
 &= 33.05 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Vertical dynamic load} \\
 &= \text{Vertical static load} \times 1.5 \tag{2} \\
 &= 49.57 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

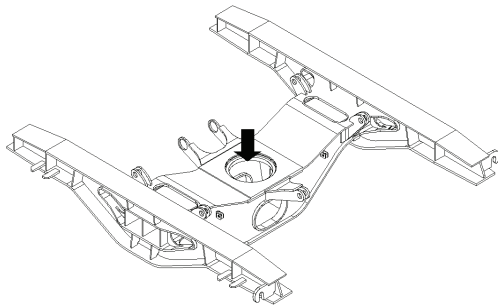


Fig. 4 Vertical load test method

대차 프레임을 코일스프링 (Coil Spring)이 장착된 축박스 (Axle Box)의 축센터 (Axle Center) 위치에서 지지하고, 더미센터피봇 (Dummy Center Pivot) 상에 수직 정하중과 수직 동하중을 부가하였다. Fig. 4는 수직하중 시험방법을 나타낸 것이다.

2.3 제동부품하중 시험

제동부품하중 시험은 제동장치 부품의 중량에 의해 발생하는 하중을 각 브레이크 행거 브라켓 (Brake Hanger Bracket)에 상,하 방향으로 구분하여 부가하였다. 수직하중 시험과 동일하게 더미센터피봇 (Dummy Center Pivot)에 수직 동하중을 부가한 상태에서 행거 브라켓 (Hanger Bracket)에 하중을 부가하였고, 행거 브라켓 (Hanger Bracket) 1과 2, 3과 4의 순서로 시험을 실시하였다. 하중은 제동부품하중에 10 g의 가속도를 고려하였다. Fig. 5는 제동부품하중 시험방법을 나타낸 것이다.

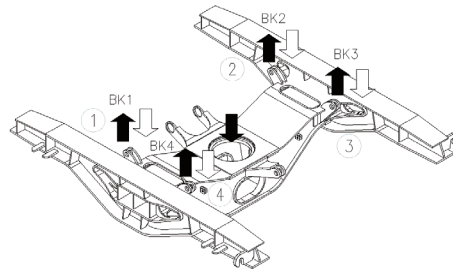


Fig. 5 Brake parts load test method

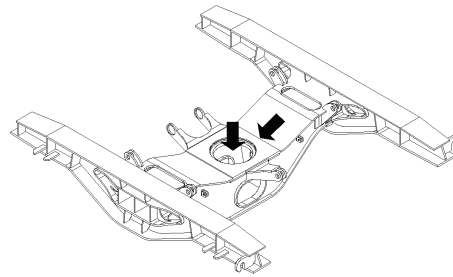


Fig. 6 The left and right load test method

Table 2 Load condition for test

Load condition	Load (ton)	Remarks
Vertical static load	33.05	Wt
Vertical dynamic load	49.57	Wt + (0.5 × Wt)
Brake parts load	2.64	10 × Wf
Left and right load	9.91	0.3 × Wt
Front and rear load	13.22	0.4 × Wt
Torsional load 1	50.6	
Torsional load 2	60.0	

The weight of brake equipment parts = 0.264 ton (3)

The test load = The weight of brake equipment parts × 10 = 2.64 ton (4)

2.4 좌우하중 시험

차체 좌우방향의 동적효과를 고려하여 수직 정하중의 30%에 해당하는 하중을 대차프레임의 좌우에 부가하였다.

The left and right load = Vertical static load × 0.3 = 9.91 ton (5)

대차프레임을 축박스 (Axle Box)위치에서 지지

하고 더미센터피봇 (Dummy Center Pivot)과 좌우하중 지그를 설치한 다음 축박스 (Axle Box)의 좌우방향 변위를 구속한 후, 수직 동하중을 부가한 상태에서 좌우방향으로 하중을 부가하였다. Fig. 6은 좌우하중 시험방법을 나타낸 것이고 하중조건은 Table 2에서 알 수 있다.

2.5 전후하중 시험

차체 전후방향의 동적효과를 고려하여 수직 정하중의 40%에 해당하는 하중을 대차프레임의 전후방향에 부가하였다.

The front and rear load = Vertical static load × 0.4 = 13.22 ton (6)

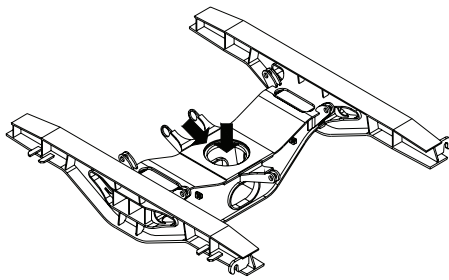


Fig. 7 The front and rear load test method

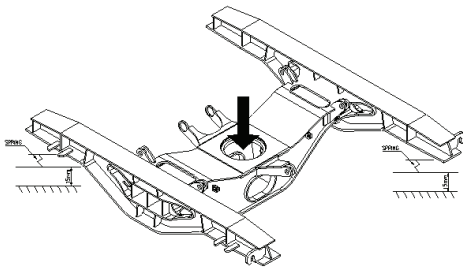


Fig. 8 Torsional load test method

대차프레임을 축박스 (Axle Box) 위치에서 지지하고 더미센터피봇 (Dummy Center Pivot)과 전후하중 지그를 설치한 다음 축박스 (Axle Box)의 전후 방향 변위를 구속한 후, 수직 동하중을 부가한 상태에서 전후하중을 부가하였다. Fig. 7은 전후하중 시험방법을 나타낸 것이다.

2.6 비틀림하중 시험

대차프레임의 비틀림은 휠과 레일사이의 불균일과 곡선주행시 편차로 인해 발생하는 현상이다. 첫번째 비틀림 시험은 대차 프레임 대각선 위치의 코일스프링 (Coil Spring) 지지부에 라이너 (Liner)를 삽입하여 15 mm의 강제변위를 부여하고 50.6 ton의 수직하중을 가하였으며, 두 번째 시험은 좀 더 열악한 조건으로 수행하기 위해 축박스 (Axle Box) 상단에 라이너 (Liner)를 삽입하여 15 mm의 강제변위를 부여한 후 60.0 ton의 수직하중을 가하였다. Fig. 8은 비틀림하중 시험방법을 나타낸 것이고 Fig. 9는 하중시험장치를 나타낸 것이다.

3. 시험결과

시험결과는 KRS 9210(철도차량용 대차스톡-설계통칙)에 따라 하중시험에서 구한 응력을 이용하여 합성평균응력과 합성변동응력을 구하고 이를



Fig. 9 Loading test equipment

응력 한계도에 도시하여 평가한다.

합성응력 산출시 비틀림하중에 의한 응력은 더 열악한 조건인 S7으로 합성응력을 산출하고 이를 응력한계도로 나타내어 비교하였다.¹⁰

3.1.3 축 게이지의 주응력

하중시험의 응력측정에 사용된 3축 게이지는 3개의 단축 게이지가 45°씩 90°로 이루어진 직각의 3축 게이지 (Rectangular Rosette Gauge)이다. 이 게이지는 90° 각도의 어느 한 게이지를 ε1으로 설정하며 90°의 반대편 게이지를 ε3로 반시계방향으로 ε1, ε2, ε3의 순서를 정하게 되며 ε2는 반드시 두 게이지 사이의 45°방향에 위치해야 한다. 직각의 3축 게이지의 측정결과로부터 주응력과 주응력 방향을 구하는 식은 다음과 같다.¹¹

$$\sigma_p = \frac{E}{2} \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{1 - \nu} + \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \right) \quad (7)$$

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \right) \quad (8)$$

각각의 하중조건에 따라서 주응력 방향이 다를 경우에는 합성응력이 가장 큰 방향으로 각각의 하중조건에 따른 응력을 변환하였다.

Table 3 Mechanical properties of used material

Material (MPa)	Yield stress	Tensile stress	Fatigue limit		
			Base metal	Welding and grinding	Welding
SWS490A	324	490	157	110	70

3.2 합성응력

3.2.1 합성평균응력

평균응력은 정하중에 따른 응력으로 하며, 편진동되는 동하중이 있는 경우의 평균응력은 그 하중에 따른 응력의 1/2을 정하중에 따른 응력에 더한 것으로 한다.

$$\sigma_{mean} = S1 + \frac{S3u + S3d}{2} + \frac{S4R + S4L}{2} + \frac{S5F + S5B}{2} + \frac{(S7L - S1) + (S7R - S1)}{2} \quad (9)$$

3.2.2 합성변동응력

변동응력은 동하중에 따른 응력을 합성한 것으로 하고, 편진동되는 동하중에 따른 응력은 그 1/2의 응력을 사용하여 합성한다.

$$\sigma_{dyn} = \sqrt{\left((S2 - S1)^2 + \left(\frac{S3u - S3d}{2} \right)^2 + \left(\frac{S4L - S4R}{2} \right)^2 + \left(\frac{S5F - S5B}{2} \right)^2 + \left(\frac{(S7L - S1) - (S7R - S1)}{2} \right)^2 \right)} \quad (10)$$

3.3 응력한계도

대차프레임에 사용된 재질은 SWS490A이며, 그 기계적 성질은 Table 3과 같다.^{5,11} 각각의 측정위치에서 합성평균응력과 합성변동응력을 구하여 피로내구선도에 나타내었으며 Fig. 10과 같다.

시험결과에 의한 높은 응력이 발생한 부위는 게이지 No. 15, 16, 17은 볼스타 옆면의 위치로서 용접부이며, 게이지 No. 26은 사이드프레임 하부의 위치로서 모재이며, 게이지 No. 36, 37, 38은 볼스타 옆면의 위치로서 용접부이고, 게이지 No. 48은 사이드프레임 하부의 위치로서 모재이다. 앞서 서술한 부분에서 높은 응력이 발생하였으나, 모두 허용응력을 만족하고 있다.

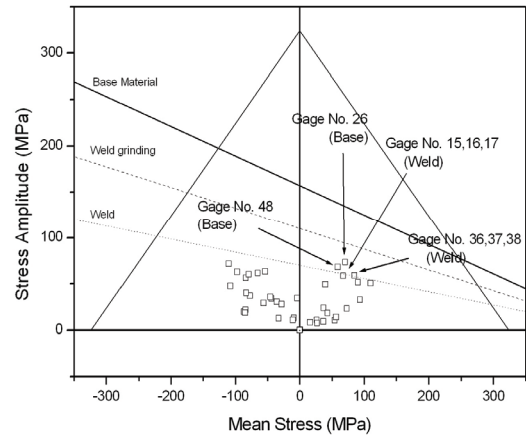


Fig. 10 Goodman diagram

4. 결론

용접대차 프레임에 대한 하중시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

시험결과 높은응력이 발생한 부위는 게이지 No. (15, 16, 17), 26, (36, 37, 38), 48 들이고, 이 중 게이지 No. 15, 16, 17은 볼스타 옆면의 위치로서 용접부이며, 게이지 No. 26은 사이드프레임 하부의 위치로서 모재이며, 게이지 No. 36, 37, 38은 볼스타 옆면의 위치로서 용접부이고, 게이지 No. 48은 사이드프레임 하부의 위치로서 모재이다. 여기서 괄호는 3축 스트레인게이지를 표시한다.

시험결과 모든 조합응력은 피로내구선도상의 안전영역에 위치하고 있어 대차설계가 안전한가를 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Kim, J. G., Yoon, S. C., Seo, J. W., and Kwon, S. T., "Structural Safety Assessment of Railway Freight Car during Static Loading," Key Engineering Materials, Vols. 385-387, pp. 653-656, 2008.
- Yoon, S. C., Kim, J. G., Baik, K. S., Goo, B. C., and Choe, K. Y., "A Study on the Fracture Test in Railroad Truck," Key Engineering Materials, Vols.

- 488-489, pp. 210-213, 2012.
3. Yoon, S. C., Kim, W. K., and Kim, J. G., "A Study on the Structural Analysis and Loading Test of the Bogie Frame," *Key Engineering Materials*, Vols. 326-328, pp. 1087-1092, 2006.
 4. Yoon, S. C., Kwon, S. T., Kim, M. R., and Lee, K. W., "Strength Evaluation of Bogie by Loading Test," *Proc. of the Korean Society for Railway of Autumn Conference*, pp. 174-179, 2004.
 5. JIS E 4207, "Truck Frames for Railway Rolling Stock-General Rules for Design," 1992.
 6. JIS E 4208, "Test Methods of Static Load for Truck Frames and Truck Bolsters of Railway Rolling Stock," 1988.
 7. Park, K. J., Lee, H. Y., Lee, K. S., and Kim, W. K., "Fatigue Strength Evaluation of a Bogie Frame for Standard Electrical Multiple Unit," *Journal of the Korean Society for Railways*, Vol. 3, No. 3, pp. 170-176, 2000.
 8. Yoon, S. C., Kim, J. G., and Seo, S. I., "A Study on the Design in Truck of Tank Car," *Proc of KSPE Spring Conference*, pp. 661-662, 2015.
 9. Ham, Y. S., Chung, H. C., Lee, D. H., and Seo, J. W., "A Study on Improvement Method of Running Safety for Welded Bogie Structure of Railway Freight Car," *Korea Railroad Research Institute Research Report*, pp 18-19, 2004.
 10. KS R 9210, "General Code of Design for Bogie Stock for Railway Rolling Stock," 1996.
 11. Park, K. J., Kim, W. K., Lee, K. S., and Park, J. S., "Evaluation of Fatigue Strength of the Bogie Frame of the Standard Electrical Multiple Unit," *Korea Railroad Research Institute Research Report*, pp. 25, 56-57, 1999.