

디젤기관차 대차프레임의 하중이력 측정 및 피로수명평가

서정원[†]·권석진*·함영삼*·권성태*

The Fatigue life evaluation and load history measurement for Bogie frame of locomotive

Jung-Won Seo, Suck-Jin Kwon, Young-Sam Ham, Sung-Tae Kwon

Key Words: Locomotive(기관차), Bogie frame(대차프레임), Fatigue Life Evaluation(피로수명평가), Structural Analysis(구조해석)

Abstract

Bogie frame of the locomotive is an important structural member for the support of vehicle loading. A lot of study has been carried out for the prediction of the structural integrity of the bogie frame in experimental and theoretical domains. The objective of this paper is to estimate the structural integrity of the bogie frame. Strength analysis has been performed by finite element analysis. From these analysis, stress concentration areas were investigated. For evaluation of the loading conditions, dynamic stress were measured by using strain gage. It has been found that the stress and strain due to the applied loads were multi-axial condition according to the location of strain gage. The fatigue strength evaluations of the bogie frame are performed to investigate the effect of the multi-axial load through the employment of the critical plane approach.

기호설명

c_f' : 피로강도계수
 ϵ_f' : 피로연성계수
 b : 피로강도지수
 c : 피로연성지수
 τ_f' : 전단피로강도계수
 γ_f' : 전단피로연성지수

1. 서론

대차는 크게 대차 프레임, 차체를 지지하는 현가장치, . 이러한 대차는 형상이 복잡하고 또한 하중조건도 정적 및 동적 하중이 복잡하게 작용하고 있으므로, 구조강도 해석 외에 실제 운용하중의 측정, 정하중시험, , 피로시험 등 다양한 시험이 요구되고 있다. 이러한 구조체의 건전성 평가는 시험대를 이용한 정하중 시험이나 피로시험을 통하여 관련규격을 만족하는지 평가하는 방법, 유한요소법 등 수치해석을 이용하는 방법을 이용하고 있다.

본 논문에서는 디젤기관차 대차프레임의 피로수명을 평가하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며 이로부터 취약부위 및 정적하중에 의한

[†] 한국철도기술연구원

E-mail : jwseo@krii.re.kr

TEL : (031)460-5210 FAX : (031)460-5279

* 한국철도기술연구원

응력을 평가하였다. 응력해석에서 취약부위로 예측되는 부위에 단축 및 3-스트레인 게이지를 부착하여 실제 운행중에 발생하는 실동응력을 측정하여 피로수명을 평가하였다.

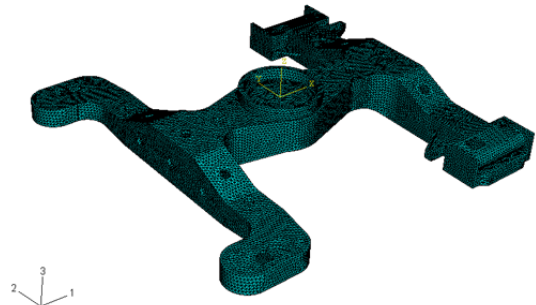
2. 대차프레임의 유한요소해석

2.1 유한요소 모델

기관차 운행 중 차체 및 전장품들로부터 정적 및 동적하중으로 인한 대차틀 및 볼스터 취약부위의 피로수명을 평가하기 위하여 대차틀과 볼스터의 3-원 유한요소모델을 생성하고 구조해석을 수행하였다. Fig. 1 : 구조해석을 위해 생성한 대차틀의 유한요소모델을 나타내고 있다. 구조해석 결과에 영향을 미치지 않는 작은 구멍 및 부속품은 제거함으로써 해석모델을 단순화 하였으며, 치수단위는 mm 단위로 하였다. 대차틀 구조해석은 탄성해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 재료물성치는 탄성계수=207,000 MPa, $\nu=0.3$ 이다. 10-점 삼각뿔 이차요소(10 node quadratic tetrahedron) 요소의 평균크기는 약 30 mm 사용된 요소가 이차요소인 것을 감안하면 실제 절점과 절점의 간격은 15 mm 국부위치에서의 해석의 신뢰성을 확보하는데 충분한 크기라 판단된다. 모델구성을 위한 요소수는 154,764, 455,706. 볼스터 경우에는 유한요소의 평균크기는 20mm이다. 161,067, 절점수는 459,940.



a) Bogie frame



b) Bolster

Fig. 1 F.E. model

2.2 하중 및 경계조건

Fig. 2 : 대차틀에 작용하는 하중 및 경계조건으로써 대차틀에 작용하는 하중은 다음과 같이 계산하였다.

구체중량 = 80.900 ton

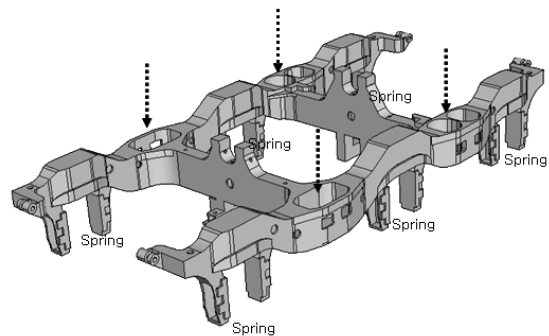
대차중량 = 25.000 ton/set

스프링하중량 = 1.83 ton/set

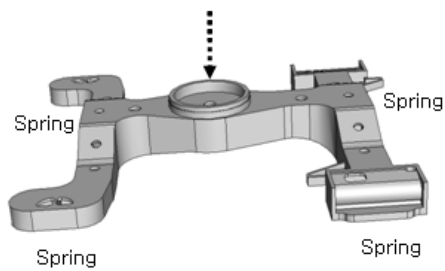
대차틀 1 = $\frac{1}{2} \times (\text{구체중량} + \text{대차중량}) = 64.62 \text{ ton}$

하중이 작용하는 위치는 그림과 같이 볼스터와 대차틀이 조립되는 위치 4 등분하여 2-스프링이 안착되는 위치에 분포하중으로 작용하였다.

1차 스프링으로 지지되어 있으므로 1-스프링이 조립되는 위치에 스프링 구속조건을 부여하였으며, $x=0.41 \text{ MN/m}$, $y=0.82 \text{ MN/m}$, $z=1.19 \text{ MN/m}$ 이다.



a) Bogie frame

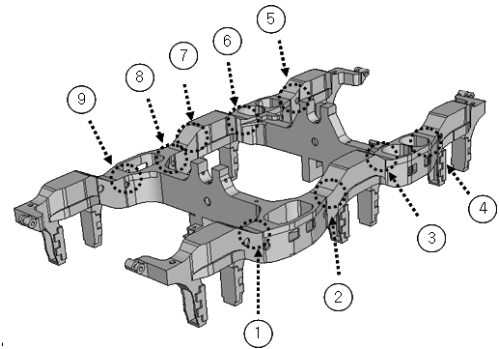


b) Bolster

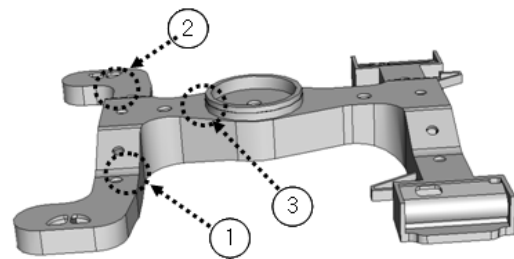
Fig. 2 Loading and constraint condition

2.3 해석결과

Fig. 3 1-11 지 가리키는 곳에서 상대적으로 높은 하중이 발생하였으며 그 크기는 Table 1 . 특히 스프링이 안착되는 ③ ④ ⑥ ⑧ ⑨ | 위치들은 대차틀 비파괴검사시 균열이 자주 발견된 곳으로 구조적으로 취약한 부분임을 알 수 있다. Fig. 4-4-28 : 볼스터 구조해석결과 상대적으로 높은 응력이 발생한 부위이다. ① Von Mises 응력은 108 MPa , ② Von Mises 응력은 147 MPa, ③ Von Mises 121 MPa . ① ② | 위치는 높은 응력이 발생했으나 모재부로 균열의 발생가능성이 낮다고 생각되나, ③ |치에서는 용접부로 균열이 발생할 가능성이 상대적으로 높은 것으로 생각된다.



a) Bogie frame



b) Bolster

Fig. 3 F.E analysis results

Table 1 F.E analysis results(Von mises)

Location	Stress(MPa)	Location	Stress(MPa)
1	132	7	135
2	109	8	167
3	140	9	170
4	77	10	127
5	101	11	84
6	124		

3. 대차프레임의 실동응력측정

3.1 게이지 부착위치 및 시험방법

대차 프레임의 피로수명을 평가하기 위하여 실제 운행조건에서 발생하는 실동응력을 측정하였다. 스트레인 게이지 부착위치는 비파괴 검사 결과 균열발생 부위, 참고자료 및 구조해석결과를 참고하여 부착하였다. 1 | 지점 및 대차틀에 6 | 지점에 부착하였고 대차틀의 경우에는 주응력의 방향을 예측하기 어렵기 때문에 3 . Fig. 4 : 대차틀에 게이지 부착위치를 나타내고 있다.

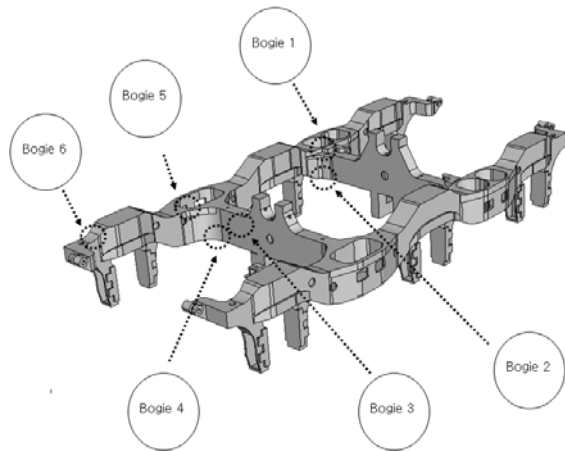


Fig. 4 Locations of strain gages

3.2 실동응력 측정 및 싸이클 카운팅 결과

실동응력을 측정하기 위하여 Data Acquisition (MGC Plus, HBM) 을 이용하였고 측정장비는 Fig. 5 . Fig. 4-4-36~ ig. 4-4-59 : 운행 중 발생한 변형률 파형을 나타내고 있으며, Fig. 18 1 !에서의 발생한 변형률 파형을 나타내고 있으며 3 는 게이지를 이용하였기 때문에 3 |의 파형이 발생하고 있다. 3 는 게이지로부터 발생한 변형률부터 주응력을 구하였고 수명평가를 위하여 각각의 범위에 따라 싸이클 카운팅을 하였으며, Rainflow 싸이클 카운팅 방법을 사용하였다. Fig. 4-4-60~ Fig. 4-4-85 : 각각의 채널에 대하여 싸이클 카운팅 결과를 나타내고 있다.



Fig. 5 Measurement equipments

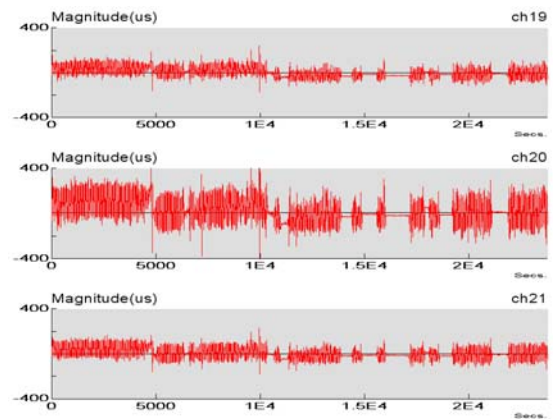


Fig. 6 Strain history of bogie frame(ch.19-21)

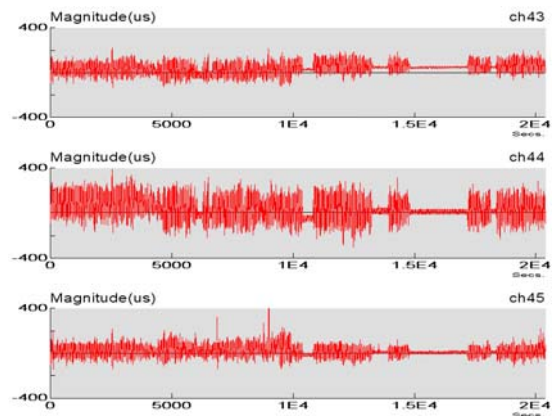


Fig. 7 Strain history of bogie frame(ch.43-45)

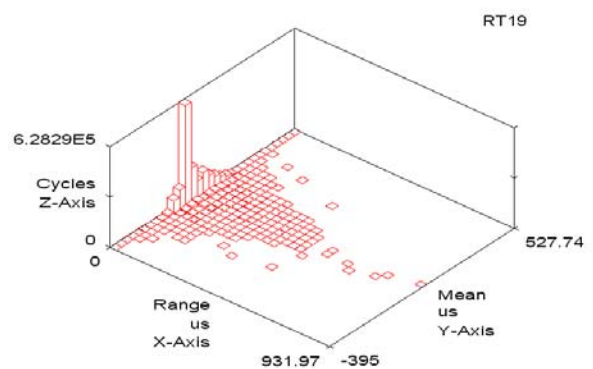


Fig. 8 Cycle counting result(ch.19-21)

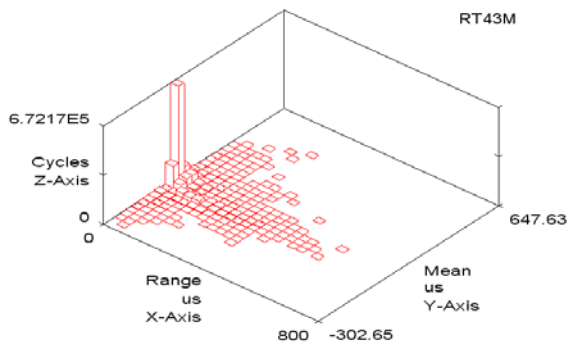


Fig. 9 Cycle counting result(ch.43-45)

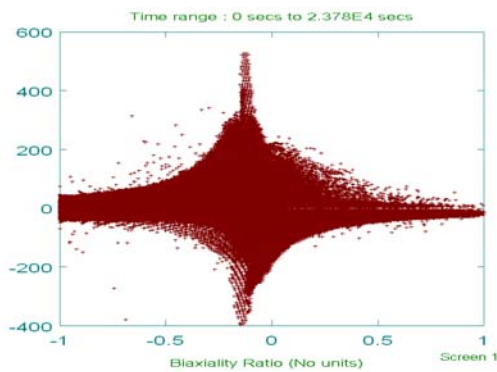


Fig. 10 Biaxiality ratio distribution(ch.19-21)

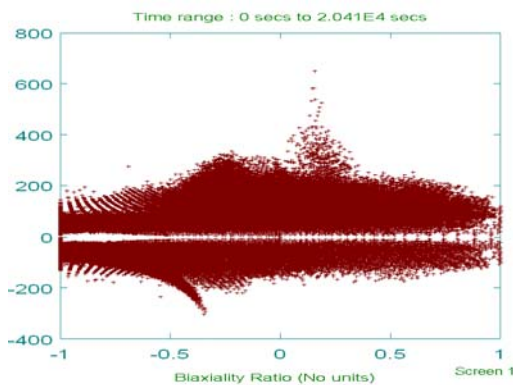


Fig. 11 Biaxiality ratio distribution(ch.43-45)

4. 피로수명평가 결과 및 고찰

피로수명평가는 ϵ -N 방법을 사용하였고 단축 상태 일 경우에는 다음의 식(1)

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (1)$$

여기서, σ_f' 와 b 는 각각 피로강도계수, 피로강도 지수이며, ϵ_f' 와 c 는 각각 피로연성계수, 피로연성 지수이다.

대차 프레임의 하중이력 측정결과 게이지 부착 위치에 따라서는 Biaxiality ratio $-1 \sim 1$ 까지 다양하게 변화하는 다축상태인 경우가 있다. 따라서 이러한 경우에는 다음의 S.W.T 관계식인 식(2) F.S. (3) 이용하여 평가하였다⁽¹⁻⁵⁾.

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta\epsilon_1}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (2)$$

$$\Delta\gamma (1 + K \frac{\sigma_n}{\sigma_y}) = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^b + \gamma_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

여기서 τ_f' , γ_f' 는 전단피로강도 및 전단피로 연성계수이고 b , c 는 피로강도 및 피로연성 지수이며 해석에 사용된 값은 Table 2

Table 3 은 대차프레임에서 발생한 대표적인 하중이력에 대하여 평가한 결과를 나타내고 있다. Gage 18 | 경우에는 단축 상태에 가까운 경우이고 Gage 43 Biaxiality ratio $-1 \sim 1$

Gage 18 | 경우에는 단축 상태에 가깝기 때문에 식(1) (2), (3) 로 평가 할 경우에 결과가 유사하게 나오고 있다. Gage 43 | 경우에는 다축 상태이기 때문에 식(1) (2),(3) 로 평가 하는 경우가 차이가 많이 발생하고 있다.

Table 2 Material properties for fatigue analysis

E (GPa)	ν	σ_f' (MPa)	ϵ_f' (%)	b	c
209	0.3	927	0.656	-0.084	-0.73

Table 3 Fatigue life evaluation results

Method	Uniaxial	Multiaxial		angle
		S.W.T	F.S.	
Gage 18	1.15E5	1.21E5	1.42E5	50
Gage 43	1.44E4	3.11E4	4.01E4	120

5. 결 론

대차 프레임의 피로수명평가를 위하여 구조해석, 실동응력측정 및 피로수명을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대차 프레임 및 볼스타의 구조해석을 통하여 하중작용시 대차 프레임의 취약부위를 평가하였다.
- 2) 대차프레임에 발생하는 하중이력은 각각의 위치에 따라서 다축 상태가 발생함을 알 수 있었다.
- 3) 단축 상태에 가까운 경우에는 평가 방법에 따라서 차이가 크지 않으나, 다축 상태일 경우에는 평가방법에 따라서 차이가 크게 발생하였다.

참고문헌

1. W. Fricke, H. Paetzold, 1995, "Fatigue strength assessment of scallops - an example for the application of nominal and local stress approaches", Marine Structures Vol. 8, pp 423 - 447
2. M. Backstrom, G. Marquis, 2001, "A review of multiaxial fatigue of weldments : Experimental results, design code and critical plane approaches", Fatigue Fract. Eng.. Mater. Struct. Vol. 24, pp 279 - 291
3. S. Kang, W. Kim, 2003, " A proposed S-N Curve for Welded ship structures - A hot-spot stress-based design S-N curve for fillet weld joints takes into account the effects of static cargo loads", Welding Journal 2003, pp 161 - 169.
4. C.M. Sonsino, M. Kueppers, 2001, "Multiaxial fatigue of welded joints under constant and variable amplitude loadings", Fatigue Fract. Eng.. Mater. Struct. Vol. 24, pp 309 - 327
5. B. Atzori, G. Meneghetti, 2001, " Fatigue strength of fillet welded structural steels :

Finite element, Strain gauges and reality", Int. Journal of fatigue, Vol. 23, pp 713 - 721, 2001