

전동차 대차 프레임의 피로수명 평가

Fatigue life evaluation of Electric Car Bogie Frame

서정원* 권성태** 김정국**
Seo Jung-won, Kwon Sung-tae, Kim Jeong-Guk

ABSTRACT

Bogie frame of the electric car is an important structural member for the support of vehicle loading. In general, more than 25 years' durability is necessary. 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 of an electric car, which is under the running test. F.E. analysis of bogie frame was performed to find locations for attaching strain gage and to estimate static stress. Dynamic stress were measured by using strain gage in order to evaluate the structural integrity of the bogie frame.

1. 서 론

대차는 크게 대차 프레임, 차체를 지지하는 현가장치, 차축 및 차륜으로 구성되어있다. 이러한 대차는 형상이 복잡하고 또한 하중조건도 정적 및 동적 하중이 복잡하게 작용하고 있으므로, 구조강도 해석 외에 실제 운용하중의 측정, 정하중시험, 주행성능시험, 피로시험 등 다양한 시험이 요구되고 있다. 전동차의 대차 프레임은 차체와 함께 하중을 지지하는 역할을 하는 주요 구조체로서 25년 이상의 긴 수명을 요구하고 있다. 이러한 구조체의 건전성 평가는 시험대를 이용한 정하중 시험이나 피로시험을 통하여 관련규격을 만족하는지 평가하는 방법, 유한요소법 등 수치해석을 이용하는 방법을 이용하고 있다.

본 논문에서는 전동차 대차프레임의 피로수명을 평가하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며 이로부터 취약부위 및 정적하중에 의한 응력을 평가하였다. 응력해석에서 취약부위로 예측되는 부위에 단축 및 3축 스트레인 게이지를 부착하여 실제 운행중에 발생하는 실동응력을 측정하여 피로수명을 평가하였다.

2. 대차프레임의 유한요소해석

2.1 유한요소 모델

* 한국철도기술연구원 선임연구원
** 한국철도기술연구원 책임연구원
*** 한국철도기술연구원 선임연구원

철도차량의 경우에는 대차프레임 용접부에서 균열이 발생하므로 이를 대상으로 선정하였다. 해석 대상차량은 볼스타가 있는 프레임으로 2차 현가장치는 공기스프링이다. Fig. 1은 유한요소모델을 나타내고 있으며 Shell요소와 Spring 요소를 사용하여 모델을 하였고 요소수는 51,811개 절점수는 47,356개이다.

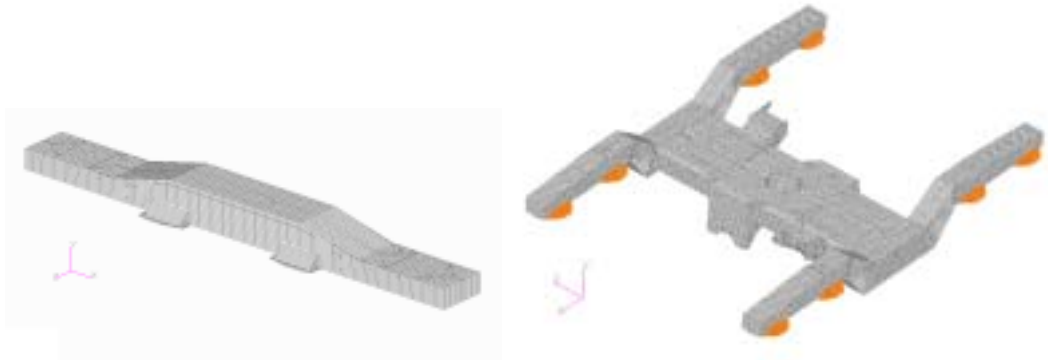


Fig. 1 유한요소모델

2.2 하중 및 경계조건

하중조건으로는 공차중량 41.5 ton과 승객하중 30.0 ton에 대차중량 14.2 ton을 제외한 값을 하중을 압력으로 환산하여 볼스타와 경계면에 부가하였다. 경계조건은 스프링요소를 사용하여 3방향 모두 고정하였다.

2.3 해석결과

Fig. 2는 수직하중 작용시 변형된 모습을 나타내고 있다. 볼스타를 가지고 있기 때문에 하중이 사이드 프레임 안쪽에서 작용하므로 볼스타가 없는 경우와 차이를 보인다. Fig. 3은 수직하중이 하중이 가장 많이 발생한 부위를 나타내고 있으며 가장 큰 응력이 발생한 부위는 볼스타와 사이드 프레임 교차부위와 감속기 브라켓 부위이다.

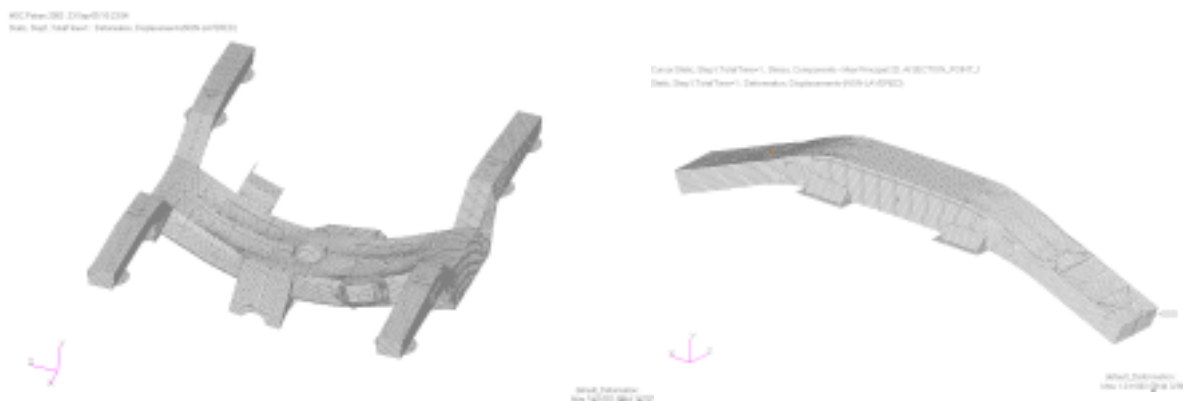
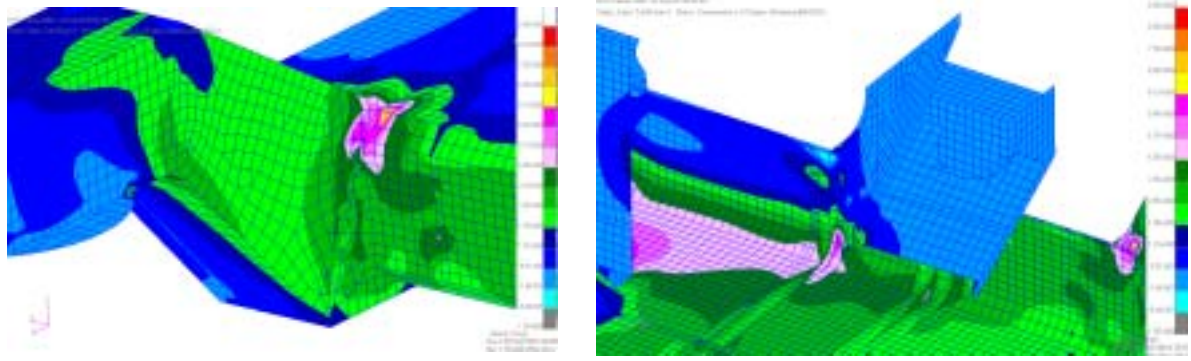


Fig. 2 수직하중 작용시 변형모습



a) 사이드프레임과의 교차부위

b) 감속기 브라켓

Fig. 3 유한요소 해석결과

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 구조해석결과 참고하여 부착하였다. 게이지는 볼스타 3지점 및 대차프레임 11지점을 부착하였고 주응력의 방향을 예측하기 어려운 지점에는 로켓게이지를 부착하였다. Fig. 4는 볼스타 및 대차프레임에 게이지 부착위치를 나타내고 있다.

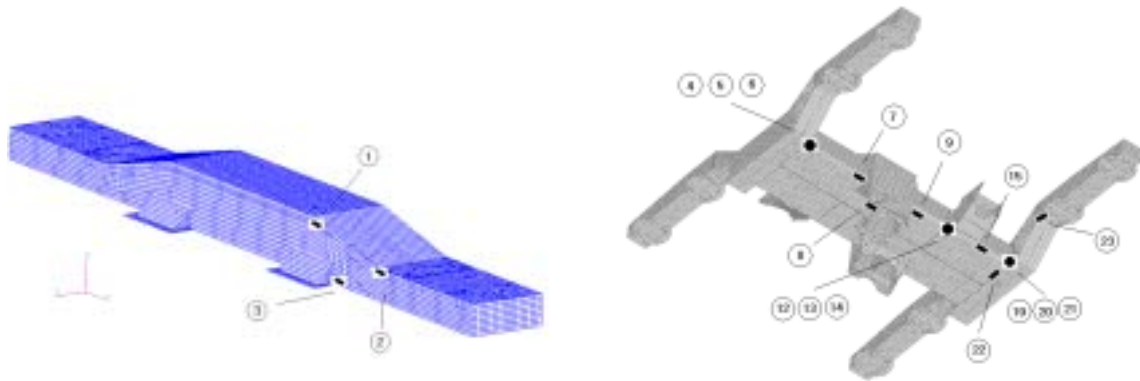


Fig. 4 게이지 부착위치(대차프레임)

3.2 실동응력 측정 및 사이클 카운팅 결과

실동응력을 측정하기 위하여 다이내믹 스트레인 앰프와 Data Acquisition 장비를 이용하였고 측정모습은 Fig. 5와 같다. Fig. 6은 볼스타에서 측정된 파형을 나타내고 있으며 채널 1 - 3은 측정된 스트레인을 나타내고 있고 채널 4번째는 속도파형을 나타내고 있다. 운행조건이 각각의 역마다 정차를 하였기 때문에 속도가 0 km/h에서 100 km/h 까지를 반복하고 있다. 측정된 응력파형은 수명평가를 위하여는 각각의 범위에 따라 카운팅을 하여야 한다. 사이클 카운팅에 사용된 방법은 BS7608에서 추천하고 있는 Rainflow 사이클 카운팅 방법을 사용하였다. Fig.7 ~ Fig. 8은 사이클 카운팅 결과 및 주응력 방향을 나타내고 있다.

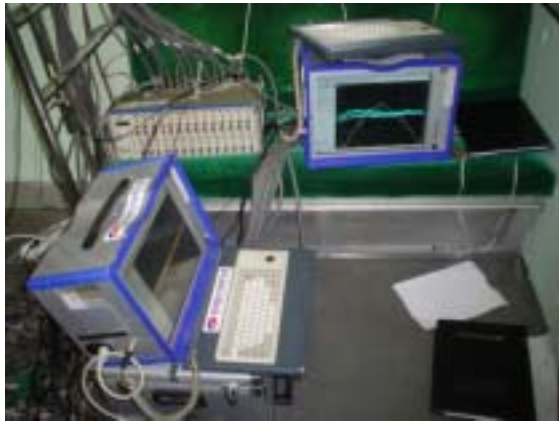


Fig. 5 측정에 사용된 장비

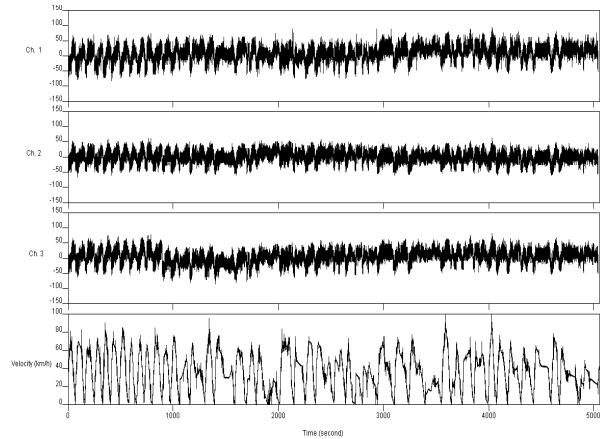


Fig. 6 볼스타에서 발생한 변형을 과형

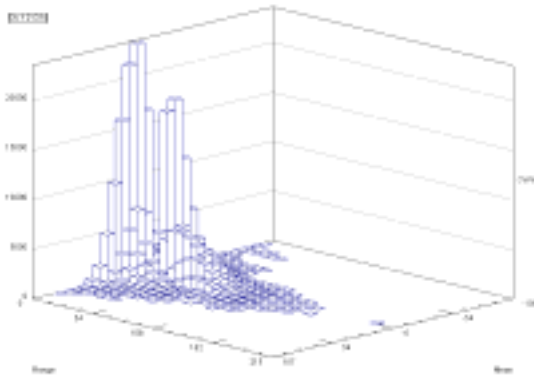


Fig. 7 싸이클 카운팅 결과

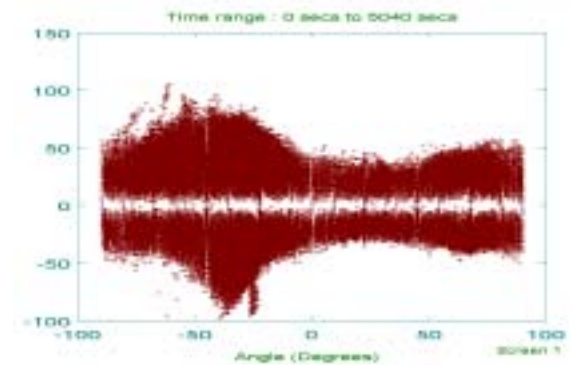


Fig. 8 주응력 및 방향 분포

4. 대차프레임의 피로수명평가

용접부에 대한 수명평가는 BS7608에 의한 방법이 많으므로 이를 이용하여 평가하였다. BS7608에서는 각각의 Class 별로 구분하였으며 Nominal stress를 계산하여 적용하도록 되어있으며 Tubular nodal joints의 경우에는 Hot-spot stress를 적용한 S-N 선도가 주어져 있다. 또한 용접형상별에 따라 피로노치계수를 계산하여 사용하도록 되어있으며 응력해석이나 측정을 통하여 구하게 되어있다. 대차프레임의 측정위치는 F Class에 형상이 해당되므로 이를 이용하여 평가하였다. 측정 위치가 용접선단에 충분히 떨어진 경우에는 측정된 응력이 공칭응력으로 가정할 수 있지만 그렇지 않는 경우에는 수명이 보수적으로 평가되므로 이에 대한 보정이 필요하다. Fig. 9 - 10은 용접부에서의 응력의 정의를 나타내고 있다.

4.1 응력집중계수 계산

용접부에서의 응력집중을 고려하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며 Fig. 11은 유한요소모델을 나타내고 있고 Fig. 12는 길이방향 응력 분포를 나타내고 있으며 최대응력이 발생한 지점이 Notch의 중앙부이다. Hot spot stress는 용접선단에서 $0.5 \times t$ 가 되는 곳에서의 응력과 $1.5 \times t$ 에서의 응력을 외삽하여 그림과 같이 구할 수 있다. 여기서 Hot spot stress는 100.9MPa이고 Nominal stress 100MPa이고 최대응력은 271.1MPa이다. 용접부의 Notch에 의한 최대 응력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{\text{peak}} = K_t \times \sigma_n = (K_s \times K_w) \times \sigma_n$$

$$= (K_s \times \sigma_n) \times K_w = \sigma_{hs} \times K_w$$

여기서, σ_{peak} : 최대응력, σ_n : 공칭응력, σ_{hs} : Hot-spot 응력
 K_t : 응력집중계수, K_w : 용접비드에 기인한 응력집중계수,
 K_s : 구조적인 응력집중계수

따라서 해석으로부터 응력집중계수를 구하면 다음과 같다.

$$K_t = 271.1/100 = 2.71, \quad K_w = 271.1/100.9 = 2.69$$

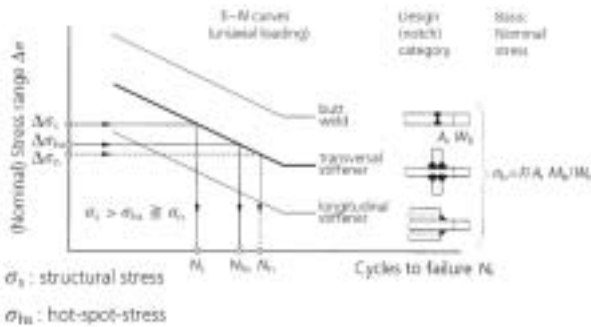


Fig. 9 Nominal stress을 이용한 피로수명평가

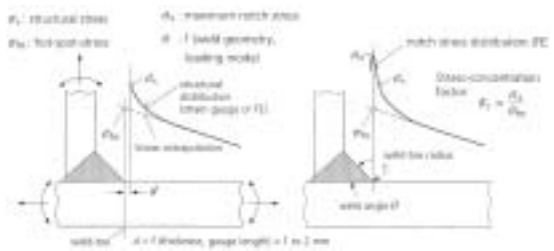


Fig. 10 용접부에서의 스트레스의 정의

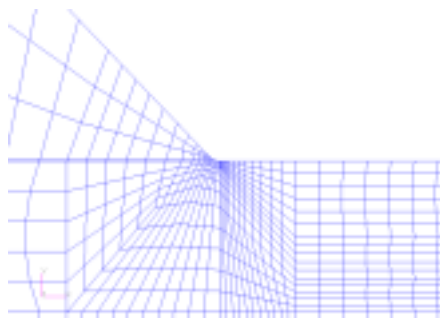


Fig. 11 용접부 선단 형상

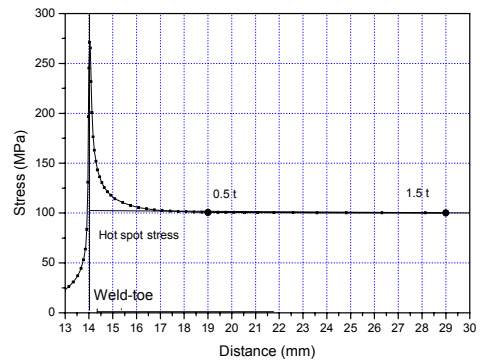


Fig. 12 길이방향 응력분포

4.2 피로수명평가 결과

피로수명평가 방법은 여러 가지가 있지만 일반적으로 용접구조물의 수명평가에 이용되는 BS7608 "Fatigue design and assessment of steel structures", 1993 에 따라서 수명을 평가하였다. 현재 측정된 응력 파형은 공차상태이므로 영차상태에 대하여는 영차응력 = 공차응력 × 1.60로 하였고 수명평가지 Class F(파손확률 2.3%)를 적용하여 평가하였으며 Notch 계수(S-N 곡선을 Notch 계수 만큼 변환 ($K_t = 2.71$, $K_f=1.63$)는 1.63을 적용하였다.

Table 1은 수명평가 결과를 나타내고 있으며 가장 수명이 짧은 곳은 채널 16으로써 사이드프 레임과 볼스타 교차부위으로써 구조해석결과 가장 큰 응력이 발생한 부위이며 수명평가결과 안전계 수는 1.7 이다.

Table 1 수명평가 결과

채널	공차 (damage)	영차 (damage)	수명	안전계수
1	1.395E-07	1.496E-06	2.089E+ 06	31.80
2	6.084E-08	6.380E-07	4.875E+ 06	74.21
3	7.636E-08	8.187E-07	3.818E+ 06	58.11
4	1.056E-06	1.116E-05	2.793E+ 05	4.25
7	6.302E-09	6.608E-08	4.707E+ 07	716.46
8	2.940E-08	3.083E-07	1.009E+ 07	153.57
9	8.878E-08	9.309E-07	3.341E+ 06	50.86
10	1.827E-07	1.933E-06	1.612E+ 06	24.54
11	1.558E-07	1.719E-06	1.829E+ 06	27.85
12	1.842E-06	1.931E-05	1.610E+ 05	2.45
15	1.135E-07	1.243E-06	2.525E+ 06	38.44
16	2.066E-06	2.172E-05	1.118E+ 05	1.70
19	8.086E-07	8.614E-06	3.623E+ 05	5.52
22	4.090E-08	4.436E-07	7.063E+ 06	107.52
23	4.120E-07	4.144E-06	7.435E+ 05	11.32

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) 대차프레임의 취약부위는 대부분 용접부위이며 스트레인 게이지를 이용하여 실동응력을 측정시 용접부 선단에서는 응력이 크게 발생하므로 수명평가지 이를 고려하여야 한다.
- 3) 전동차 대차프레임의 피로수명평가 결과 가장 취약부위의 안전계수가 1.7(Class F, 2.3% 파손확률)이었다.

참고문헌

1. BS 7608, 1993, "Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures"
2. 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
3. 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
4. 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.
5. 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
6. 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