

# 다축 Random Dynamic 하중을 받는 대차 저널박스의 피로수명평가 Fatigue Life Assessment of Journal Box Attached to Bogie under Multiaxial Random Dynamic Loading

박상구\*      김승섭\*      한성욱\*      박근수\*      우관제\*  
Park, Sanggoo   Kim, Seungseob   Han, Sungwook   Park, Geunsu   Woo, Kwanje

---

## ABSTRACT

This paper presents the evaluation of fatigue life for a journal box attached to rolling stock bogie under random dynamic loading condition. Because a journal box was under random dynamic loading conditions, the fatigue life assessment due to these loads requires the analysis considering the multiaxial effect of random dynamic loading. To do this work, the finite element analysis has been conducted to calculate random dynamic response using multiaxial acceleration data. Then, the fatigue life assessment of component has been conducted using vibration fatigue analysis applying the power spectral densities of the responses obtained through the FEA. The results of fatigue life assessment were compared to the damage from the strain measurement. This study shows that can be evaluated the fatigue life assessment considering real service condition about a component attached to rolling stock bogie.

---

## 1. 서 론

철도차량은 실제 운행시 정적하중상태에 놓여있기보다는 지속적으로 불규칙한 동적하중을 받고 있다. 따라서, 불규칙 동적하중에 의한 영향을 분석하는 것이 무엇보다 중요하다

철도차량의 대차에 부착된 저널박스의 경우 25년의 설계수명을 가져야 한다. 이를 설계단계에서는 구조해석을 통해 평가하고 반영하고 있다. 그림 1은 설계단계에서 수행되는 구조해석의 절차를 나타내고 있다. 구조해석을 통해 검증되었을지라도 수십년의 설계수명을 저야 하는 철도차량의 경우 내구시험을 위한 주행시험장을 가질수 없고 제한된 시험장비를 통해 피로시험만을 수행하고 있다. 이는 실제 운행환경에서 노반과 궤도의 조건에 따라 불규칙한 동적하중을 지속적으로 받는 철도차량의 부품에 대한 수명을 평가하기에는 제한적이다. 일반적으로 피로해석은 시간영역안에서 수행되었다. 그리고, 철도차량에 영향을 주는 수직하중, 좌우하중, 비틀림하중등의 정적해석의 결과를 이용하여 해석한다. 그런데 이러한 해석은 모든 시간동안의 하중이력이 필요하고 제한된 정적해석의 결과를 이용하기 때문에 실제 운행에서 발생할 수 있는 동적인 영향을 반영할 수 없다.

본 논문에서는 주파수 영역에서 표현되는 다축의 불규칙한 동적하중을 이용하는 진동피로해석을 통해 철도차량에 부착된 저널박스에 대한 수명을 평가하였다. 그리고, 동일한 저널박스에 대해 이를 실제궤도에서 측정된 응력을 이용하여 피로누적손상을 구하여 진동피로해석 결과와 비교하였다.

---

† 책임저자 : 정회원, 연세대학교, 토목공학과, 박사과정  
E-mail : civil90@hyundai-rotam.co.kr

TEL : (031)596-9512    FAX : (031)596-9747

\* 현대로템, 기술연구소

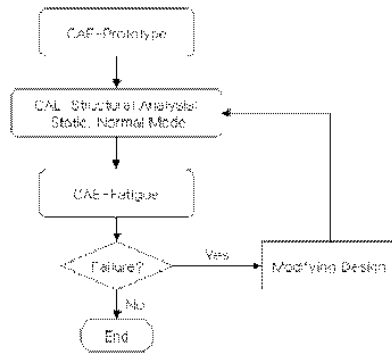


그림 1. 설계 및 해석과정

## 2. 불규칙 랜덤하중에 대한 피로해석

시간영역에서의 피로해석은 비교적 정확하지만 불규칙하고 동적인 하중에 대해서는 Transient Analysis 시간이 오래걸리고 경우에 따라서는 불가능 할 수 있다. 반면에, 주파수영역에서의 피로해석은 불규칙한 동적하중에 대해서 빠르고 비교적 정확한 결과를 얻어낼수 있다. 불규칙하게 동적하중 이력은 주파수영역에서 Power Spectral Density(PSD)함수로 나타낸다. PSD선도는 주파수와 Mean Square값을 이용하여 표현한다. 진동피로해석의 절차는 그림2와 같다.

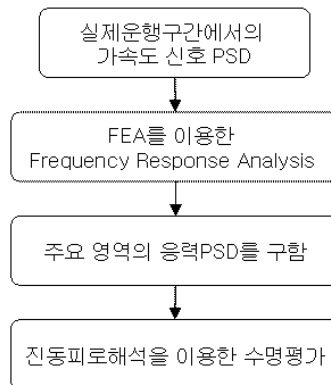


그림 2. 진동피로해석 과정

랜덤하중에 대한 피로해석으로는 PSD입력하중에 대한 결과인 응력 PSD를 이용한다. 응력PSD로 얻어지는 식(1)로 표현되는 면적 모멘트인  $m_0, m_1, m_2, m_4$  4개의 변수만으로 계산된다.

$$M_n = \int_{f_0}^{f_1} f^n PSD(f) df \quad (1)$$

Rice[1]는 PSD모멘트를 기초로 E[0]와 E[P]의 관계를 도출하였다.

그림3에서와 같이 불규칙한 랜덤하중에 대해서 E[0], E[P]를 식(2)~(4)와 같이 구할 수있다.

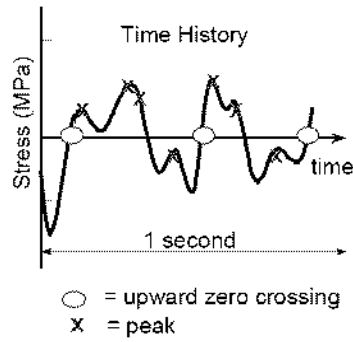


그림 3. B[0], B[P]

$$E_0 = \sqrt{\frac{M_4}{M_0}}, \quad (2)$$

$$E_P = \sqrt{\frac{M_4}{M_2}}, \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{E_0}{E_P}} \quad (4)$$

피로해석을 위해서는 불규칙한 랜덤하중의 입력에 대한 PSD이용하여 유한요소 해석을 수행하고 구조물 관심부위의 응력 PSD을 추출하여 피로손상을 구한다. 이와 같은 일련의 과정은 그림4와 같이 나타낼 수 있다.

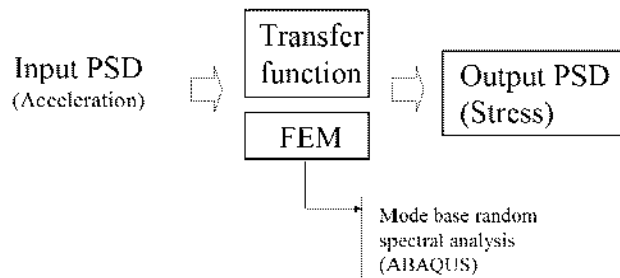


그림 4 PSD 피로해석 절차

여기서의 응력PSD는  $G(f)$ 는 하나의 입력하중  $W(f)$ 이 작용될 경우에 식(5)와 같이 전달함수와의 곱으로 계산되므로 매우 빠르게 계산할 수 있다[2].

$$G(f) = |H(f)|^2 \cdot W(f) \quad (5)$$

일반적으로  $2n$  개의 하중이 동시에 작용하는 경우에는 응력PSD  $G(f)$ 는 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$G(f) = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n H_a(f) \cdot H_b(f) \cdot W_{ab}(f) \quad (6)$$

### 3. 불규칙 동적하중을 받는 저널박스의 피로해석

#### 3.1 구조해석

불규칙 동적하중을 받는 저널박스에 대한 피로해석을 수행하기전 정적해석을 통해 최대응력을 받게 되는 부위를 선정하는것이 필요하다. 이는 일반적으로 표준규격을 적용하여 해석을 수행하였다[3]. 수직, 좌우, 비틀림의 하중조건을 적용하여 구조해석과 피로해석을 수행하였다. 표1은 본 해석모델의 기계적 특성을 나타내었다. 유한요소 해석모델은 빔과 솔리드로 표현하였다.

표 1 저널박스의 기계적 특성(단위: MPa)

Material	Yield Strenght	Tensile Strength
BS3100-A4	320	540

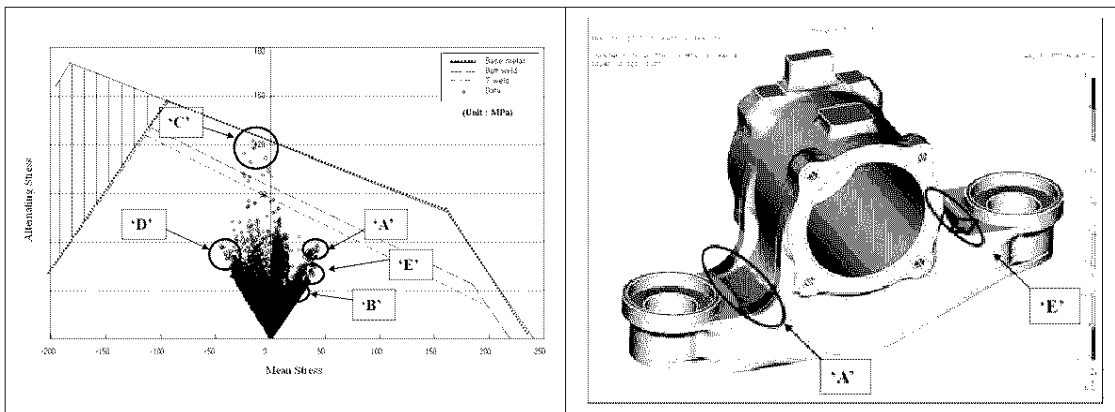


그림 6 구조 및 피로해석의 결과

그림6에서와 같이 구조해석 및 피로해석의 결과 저널박스의 곡선부위에서 최대응력이 나타나며 Goodman 내구성도에 표현된 것과 같이 최대 피로손상부위이다. 해석시간의 단축을 위해 이상에서 나타난 최대응력 및 손상부위를 선택하여 PSD 입력에 대한 유한요소 해석을 수행한다.

#### 3.2 불규칙 동적하중에 대한 피로해석

철도차량의 대차에 부착된 저널박스의 경우 실제운영환경에서 불규칙한 동적하중이 다축적으로 입력 받게 된다. 따라서, 그림7과 같이 다축의 입력하중을 모두 고려하여 유한요소 해석을 수행한다. 또한, 대차에 부착되어 거동하므로 대차에 의해 발생하는 질량을 Mass로 추가하였다.

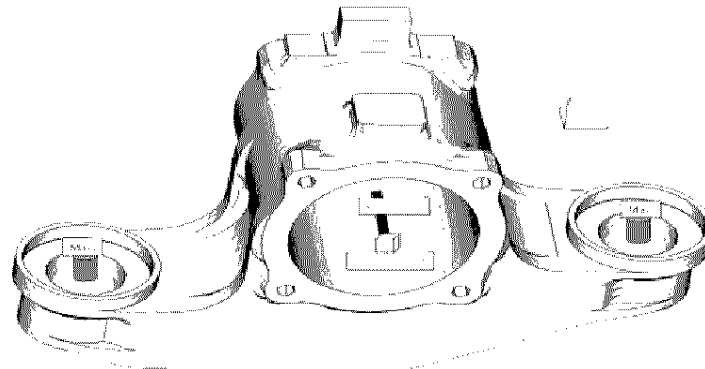


그림 7 PSD해석 수행을 위한 Mass부가 및 PSD입력

철도차량이 운행하게 되는 실제운행간에서의 3축의 가속도 신호를 그림8에서 중첩되어 나타내었다. 이에 대한 PSD를 FFT를 통해 도출하고 이를 입력하중으로 하여 해석을 수행하였다.

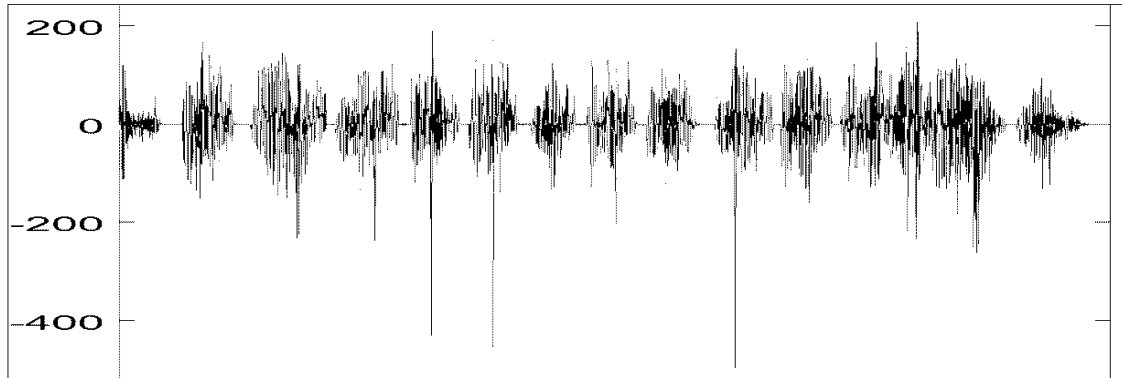


그림 8 실제 운행구간에서의 3축의 가속도 신호

범용유한요소 해석 Solver인 ABAQUS의 경우 PSD를 입력하중으로하여 해석을 수행하고 결과가 곧 응력PSD로 나타낼 수 있다. 진동피로해석의 수행을 위해 고유진동수 모드를 추출하고 공진 피크 주파수 대역에서의 변형양상은 그림9와 같다.

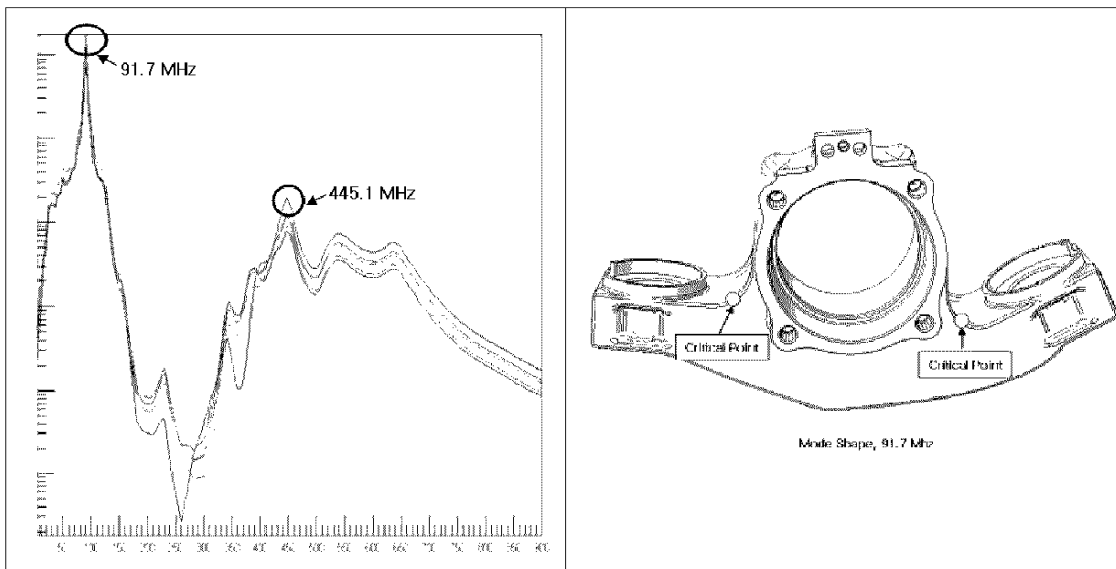


그림 9. Mode Shape 및 고유진동수

Critical Point에서의 해석된 결과를 통해 나타난 응력 PSD는 그림10과 같다. 응력PSD를 이용하여 식 (7)과 식(8)을 이용하여 X, Y, Z 축 각각의 손상을 평가하여 합산한다.

$$N(S) = E(P) = \sqrt{\frac{M_4}{M_2}} \quad (7)$$

$$E_D = \frac{N_s}{N_f(s)} \quad (8)$$

여기서,  $E_D$  피로손상을 나타내고,  $N(S)$ 는 응력 S범위에서의 사이클,  $N_f(S)$ 는 응력S범위에서의 파손 사이클을 나타낸다.

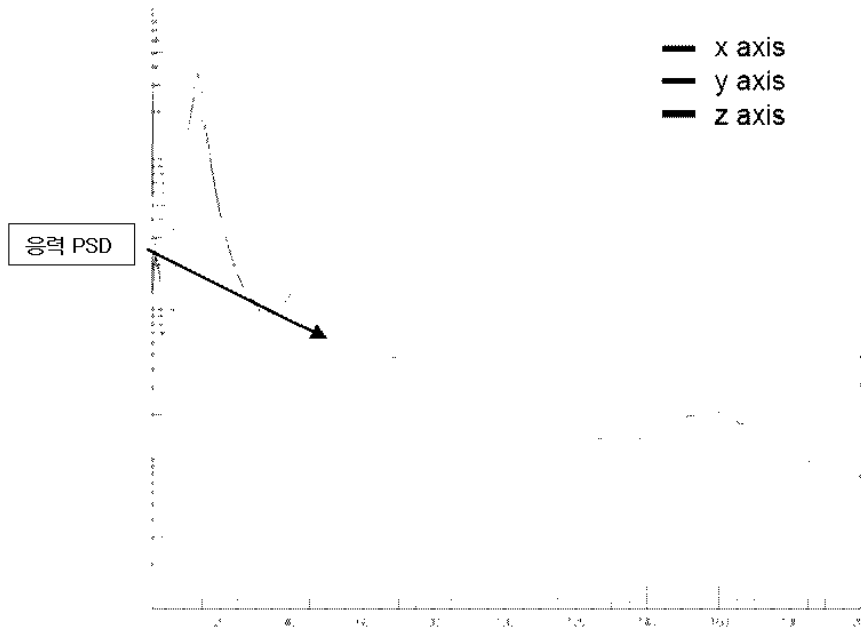


그림 10 해석을 통해 도출된 응력 PSD

다축의 불규칙 동적하중을 받는 저널박스에 대해 진동피로해석을 통해 평가된 피로손상분포는 그림11에서 나타내고 있는데 이는 Critical Point에서의 피로손상 분포를 보이고 있다.

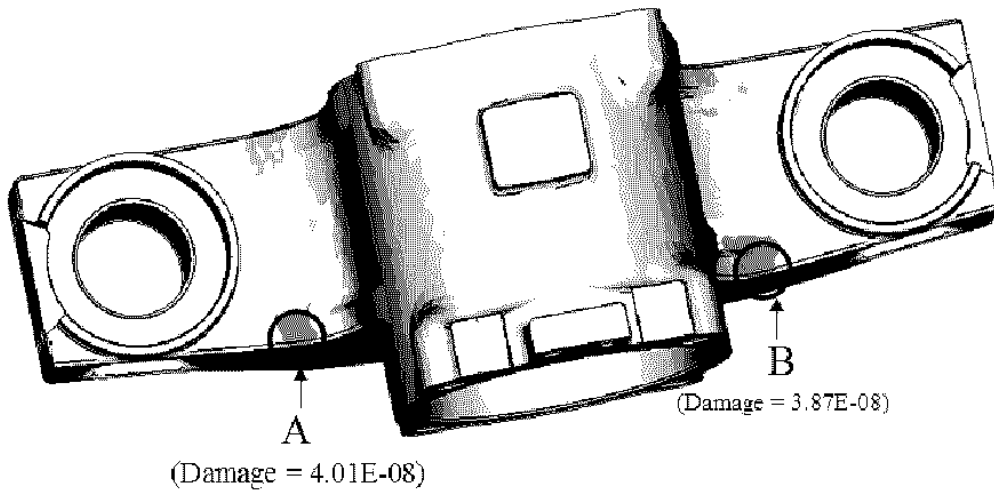


그림 11 진동피로해석에 의한 피로손상분포

피로손상은 A부위에서 4.01E-08이고 B부위에서 3.87E-08이다.

### 3.3 실동응력측정을 통한 피로손상과 비교

다축의 불규칙 동적하중을 받는 저널박스에 대한 진동피로해석 결과를 해당부위에 스트레인게이지를 취부하여 도출된 피로손상과 비교하였다. 그림12는 실동응력 측정을 위해 저널박스에 취부된 스트레인게이지이고 실제 운행구간을 운행하며 실시간으로 스트레인 값을 받아서 이를 응력으로 변환하여 피로누적손상법을 이용하여 데미지를 평가하였다. 이때의 S-N선도는 BS7608을 이용하였다.

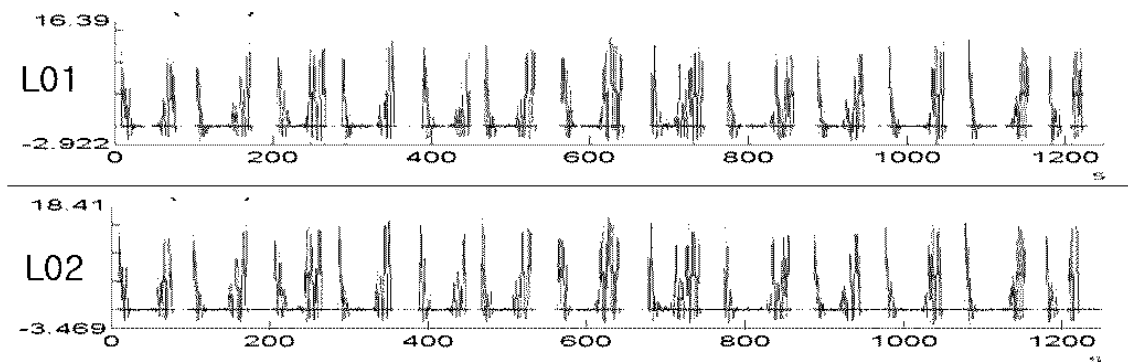


그림 12 측정된 실동응력

표3은 진동피로해석에 의한 데미지와 실동응력 측정에 의한 데미지를 비교한 것이다. 약 15%정도의 오차를 보이고 있다. 이는 저널박스에 전달되는 하중값을 대차에 전달되는 Mass로만 부가하였는데 이를 더 실제전달하중값에 적절하도록 입력한다면 보다 더 정확한 피로손상값을 가질 수 있을것으로 추정된다.

표 3 해석결과와의 비교

위치	진동 피로해석에 의한 손상	실동응력 측정에 의한 손상
A	4.01E-08	3.48E-08
B	3.87E-08	3.11E-08

#### 4. 결 론

철도차량은 지속적으로 불규칙한 동적하중을 받고 있으며 이를 고려한 피로손상평가가 설계단계에서 선행되어야 목표하는 설계수명을 만족시킬 수 있을것이다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 실제 궤도에서 지속적으로 동적하중을 받는 철도차량에 부착된 부품에 진동피로해석 기법을 적용하여 설계단계에서 목표하는 수명을 평가할 수 있었다.
- (2) 다축의 불규칙한 동적하중을 고려하여 진동피로해석기법을 적용할 수 있음을 보였다.

이후에는 불규칙 동적하중을 받는 부품에 대한 피로수명을 고려하여 최적설계에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. Rice, So (1954), "Mathematical analysis of random noise", Selected papers on noise and stochastic processes, Dover, New York.
2. J.S. Bendat, A.G. Piesol, "Random Data : Analysis and Measurements Procedures", Wiley, 1971.
3. GM/RT 2100(2000), Structural Requirements for Railway Vehicles October 2000
4. J.Draper, "Fatigue Analysis from the PSD : ABAQUS/Safe", Chapter12, 2000.