

차체 구조물의 확률론적 피로수명 평가 연구

Probabilistic Fatigue Life Evaluation for a Car Body Structure

구병준* 서정원** 김재훈***
Goo Bycong-choon, Seo Jungon-won, Kim Jai-hoon

ABSTRACT

In case of the fatigue life evaluation of rolling stock structures, mainly deterministic fatigue life evaluation has been carried out. But most of the parameters influencing on the fatigue life have a probabilistic distribution such as normal, log-normal, Weibull, etc. Therefore, to take probabilistic factors into fatigue life evaluation, probabilistic methods are being applied to the fatigue life evaluation of rolling stock. In this paper, probabilistic S-N analysis and methods using limit state functions are introduced. And some results of fatigue life evaluation obtained with these methods for rolling stock structures are shown.

1. 서론

그동안 구조물의 피로 수명평가 연구는 주로 결정론적 (Deterministic) 방법이 사용되어 오고 있다. 그러나 수명평가에 관여하는 대부분의 변수들은 일정한 값을 갖기보다는 넓은 범위에 걸쳐 확률적으로 분포되어 있어 결정론적 방법으로 현상을 제대로 기술하기에는 적절하지 않다고 할 수 있다. 최근 이러한 변수의 분포특성을 고려한 확률론적 평가방법이 구조물의 건전성 평가나 피로 수명평가 등의 분야에 도입되어 활발히 연구되고 있다. 신재철⁽¹⁾과 김상효 등⁽²⁾은 철도 강 교량의 잔존피로수명을 신뢰성 이론을 적용하여 평가였고, 송재영과 신찬호는⁽³⁾ 선체구조물의 피로수명 해석에서 변동응력의 분포가 와이불 (Weibull) 분포를 따른다고 가정하여 Miner-Palmgren의 피로누적손상을 유도하여 피로수명을 예측하는 방법을 제시하였다. 박상록 등⁽⁴⁾은 압력 배관의 확률론적 구조건전성을 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 적용하여 평가하였고 Harlow와 Wei는⁽⁵⁾ 알루미늄 합금의 부식피로수명 예측에 확률론적 방법을 적용하고 있다.



Figure 1. 표준전동차의 차체 구조

본 연구에서는 확률론적 피로수명 평가 방법으로 S-N 선도와 등가응력으로부터 한계상태방정식 (Limit state function)을 유도하고 이를 이용하여 실제 철도차량 차체 구조물의 수명평가를 수행한 사례를 소개하고자 한다. 그림 1은 한국철도기술연구원이 개발한 표준전동차의 차체 골조이다. 철도차량의 차체의 주요 구조물은 25년 이상 사용이 가능하도록 제작되고 있다.

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원
** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 주임연구원
*** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 연구원

이러한 구체의 구조 건전성은 국내외의 여러 관련규격에 의한 시험을 거쳐 평가되고 있지만 피로수명평가에 대해서는 확립된 방법이 없는 것이 현실이다. 본 연구에서는 구조해석을 통하여 취약부로 예상되는 지점에 스트레인 게이지를 붙여 선로위를 주행하면서 동하중을 측정하여 위에서 언급한 방법에 따라 확률론적 피로수명을 평가하였다.

2. 한계상태방정식을 이용한 확률론적 수명평가

2.1 신뢰성 지수

정확한 파손확률의 수학적 해석을 위해서는 각각의 확률변수 X_1, X_2, \dots, X_n 로 구성된 결합확률밀도함수(joint probability density function)를 구하여 이를 적분하여야 한다. 그러나 결합확률밀도함수의 유도 및 적분이 난해한 경우가 대부분으로 해석이 용이하지 않다. 결합확률밀도함수가 주어진 경우 파손기준을 적용한 한계상태방정식(Limit state function) $g(X)$ 를 수식으로 구성한다. 수식의 구성은 한계상태방정식이 0보다 크면 파손이 발생하지 않으며, 음의 값을 가지면 파손이 발생하도록 한다. 따라서 파손확률의 계산은 다음의 수식과 같이 한계상태방정식이 음의 값을 갖는 범위에 대한 적분을 수행하면 된다.

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) > 0 \quad (\text{safe}) \quad (1)$$

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0 \quad (\text{unsafe}) \quad (2)$$

$$P_f = P\{g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0\} \quad (3)$$

여기서 확률변수 X 는 항복강도, 탄성계수, 피로손상을 등이 될 수 있으며, 조건을 나타내는 한계상태방정식 $g(X)$ 는 파괴역학 및 재료역학의 조건이 될 수 있다. 이러한 수식의 구성 및 적분의 계산이 가능하다면 FORM(First Order Reliability Method), SORM(Second Order Reliability Method)의 적용없이 파손확률의 예측이 가능하다.

반면 수식의 구성 및 적분이 용이하지 않은 경우 파손확률의 근사값을 얻기 위해 FORM, SORM을 많이 사용하고 있다. 파손확률의 근사값 계산시 Taylor 급수전개를 사용하며, Taylor 급수의 1차항만을 사용하는 경우 FORM, 2항까지 사용하면 SORM이라 한다. 위의 과정을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$G = g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4)$$

한계상태방정식에 대해 Taylor 급수의 1차항만을 사용하는 FORM의 경우에는 새로운 확률변수 G 에 대한 평균(μ_G)과 분산(σ_G^2)이 다음과 같이 간단한 식으로 주어진다.

$$\mu_G \approx g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) \quad (5)$$

$$\sigma_G^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial g}{\partial X_i} \frac{\partial g}{\partial X_j} Cov(X_i, X_j) \quad (6)$$

여기서, $Cov(X_i, X_j)$ 는 X_i 와 X_j 의 공분산이다.

한계상태방정식 $g(X)$ 에 대한 파괴확률은 새로운 확률변수 G 가 0보다 작은 확률이므로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$P_f = P(G \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) \quad (7)$$

여기서 한계상태방정식의 표준편차에 대한 평균의 비인 μ_G/σ_G 를 신뢰도 지수(Reliability Index)라 하며 β 로 정의한다. 파괴확률 P_f 와는 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad \text{여기서 } \beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (8)$$

위에서 설명한 일개이차모멘트법인 FORM에서는 한계상태방정식의 구성방법에 따라 파손확률에 차이가 발생할 수 있음에 유의할 필요가 있다.

2.2 한계상태 방정식

해석에 사용된 S-N 선도는 식(9)와 같이 파손확률 50% 선도이다. 하중이력에 대한 등가응력은 식(10)으로 정의된다.

$$N\sigma^m = A \quad (9)$$

$$\sigma_e = \sqrt[m]{\sum_{i=1}^{n_b} f_i \sigma_i^m} \quad (10)$$

여기서 σ_e : Miner의 평균 등가응력

σ_i : 블록 i 의 응력

f_i : 전체 사이클 수에 대한 블록 i 에 해당하는 응력 사이클 수의 비

m = S-N 곡선의 기울기

n_b = 응력 블록의 수

A : 재료상수, S-N 곡선의 N축과의 교점

식 (9)와 (10)으로부터 한계상태방정식(Limit state function)은 식(11) 또는 식(12)와 같이 쓸 수 있다.⁶⁾

$$g1 = \frac{\Delta * A}{k_s \sigma_e^m} - N_t \quad (11)$$

또는

$$g1' = \log(\Delta) + \log(A) - m \log(\sigma_e) - m \log(k_s) - \log(N_t) \quad (12)$$

여기서 Δ : 피로손상률(fatigue damage ratio)

k_s : 피로 응력 불확실도

N_t : 수명 주기 (300백만 km) 동안 차체에 작용하는 총 하중 사이클의 수

식 (11) 혹은 (12)에서 확률변수로는 등가응력(σ_e), 피로손상률(Δ), S-N 선도의 계수(A), 등가응력에 대한 불확실도(k_s)로서 4가지이다. 이러한 확률변수 중 σ_e , Δ , A , k_s 는 대수 정규 분포, 혹은 정규분포로 가정할 수 있고 이로부터 신뢰성지수 β 와 파손확률을 구할 수 있다.

3. 표준전동차 차체의 피로수명 예측

3.1 차체의 동하중 측정

가) 기계적 성질

표준전동차 차체의 기계적 성질은 표 1과 같다. 소재의 피로 물성치는 그림 2와 같으며 이에 대한 S-N 선도 식은 아래와 같이 표현된다.

$$\sigma = 264.85 N^{-0.257} \quad (13)$$

Table 1. 기계적 성질

재질 (kg/mm ²)	항복강도 (kg/mm ²)	인장강도 (kg/mm ²)	탄성계수 (kg/mm ²)	포아송비 (kg/mm ²)	밀도 (kg.s ² /mm ⁴)
A6005A-T6	21.9	26.5	7.3 E3	0.33	2.857 E-10

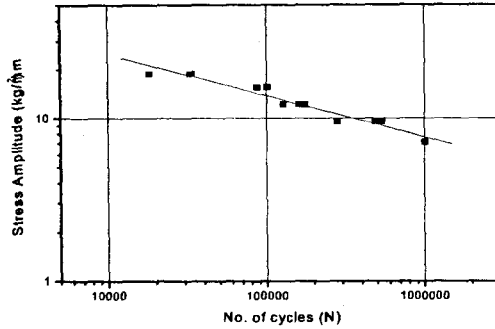


Figure 2. 알루미늄 A6005A-T6의 피로시험 데이터

나) 동하중 측정

주행 중에 발생하는 실 동하중을 측정하기 위하여 전동차 차체의 구조해석 및 정하중 시험결과로부터 가장 큰 응력이 발생한 부위인 출입문 코너부 아래쪽에 스트레인 게이지를 취부하였다 (그림 3의 게이지 번호 54, 55, 56). 3축 스트레인 게이지를 사용하였으며 이 때 발생한 파형은 그림 4, 5와 같다. 그림 4는 최고속도 80km/h에서 김천방향(하행)으로 운행하는 경우의 하중이력을 나타내고 있으며, 그림 5는 상주방향으로 운행하는 경우의 하중이력(상행)을 나타내고 있다. 측정 거리는 편도 약 1km이다. 발생한 파형을 최대주응력 (Maximum principal stress)을 구하여 동가 응력으로 환산하였고, 싸이클 카운팅은 간이 레인플로 카운팅 (Simplified rainflow counting) 방법을 사용하였다. 이때 카운팅 결과는 그림 6과 같다. 싸이클 카운팅시 최대 진폭의 5% 미만의 데이터는 삭제하였으니 정하중 시험시 발생한 응력을 평균응력으로 하였다. 정하중 시험시 3축 게이지에 발생한 응력 $\sigma_1=4.19\text{kg/mm}^2$, $\sigma_2=-8.79\text{kg/mm}^2$, $\sigma_3=-2.64\text{kg/mm}^2$ 으로부터 주응력을 구하면 8.92kg/mm^2 가 되고 이를 평균응력으로 사용하였다.

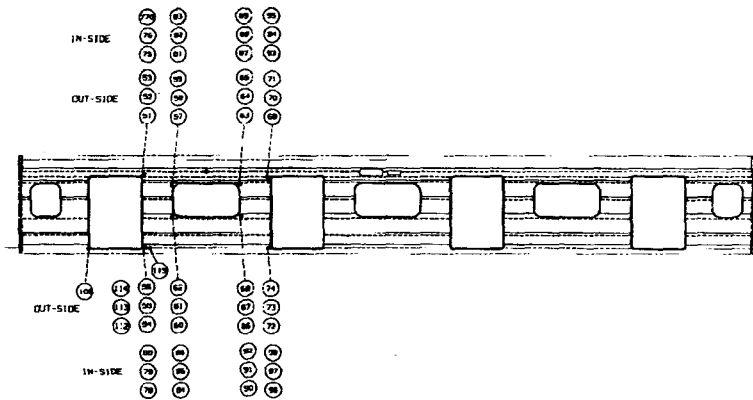


Figure 3. 스트레인게이지 취부위치

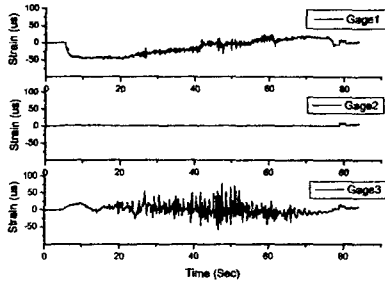


Figure 4. 차체의 동하중 이력 (김천방향)

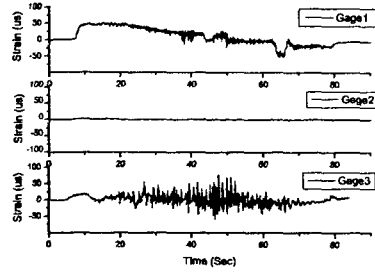


Figure 5. 차체의 동하중 이력 (상주방향)

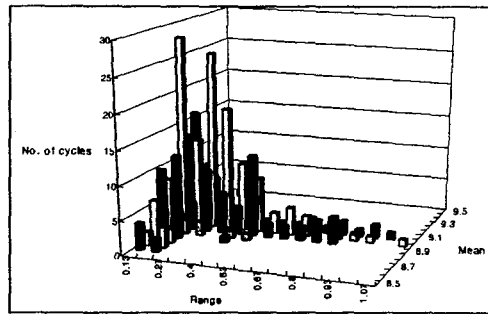


Figure 6. 사이클 카운팅 결과

4. 피로수명 평가 결과

Goodman 식으로 평균응력을 고려하여 하중이력에 대한 등가응력을 식(10)으로 계산하면 0.36 kg/mm² 이다. 4가지 확률변수 중에 σ_e , Δ , A는 대수 정규 (Log-normal) 분포로 가정하고, k_s 는 정규분포로 가정하였으며 각 변수에 대해 사용된 평균과 표준편차는 표 2와 같다.

Table 2. 입력 데이터

Random variable	Mean	Standard Deviation	Distribution type
σ_e	0.36	0.2	Log-normal
Δ	1.0	0.4	Log-normal
A	2.68E9	0.13	Log-normal
k_s	1	0.2	Normal
m	3.89		

실제 발생한 응력으로 신뢰성지수 및 파손확률을 구하면 신뢰성지수는 4.33이고 파손확률은 7.61E-4 %이다. 등가응력(σ_e)을 조금씩 크게 하여 해석을 수행하면 표 3과 같은 결과볼 얻는다. 측정된 등가응력에 대해 등가응력이 1.6배 커지면 신뢰성 지수는 2.75로 낮아지고 파손확률은 0.295 %로 높아진다. 등가응력이 2배 커지면 신뢰성 지수는 2.01이고 파손확률은 2.24%이다. 신뢰성 지수와 파손확률을 도시하면 그림 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 신뢰성 지수가 커질수록 파손확률은 낮아진다.

Table 3. 해석 결과

등가응력(S_{eq})	신뢰성지수	파손확률(%)
0.36	4.33	7.61E-04
0.432	3.72	1.01E-02
0.504	3.20	6.87E-02
0.576	2.75	2.95E-01
0.648	2.36	9.15E-01
0.72	2.01	2.24E+00
0.792	1.69	4.57E+00
0.864	1.40	8.12E+00
0.936	1.13	1.29E+01

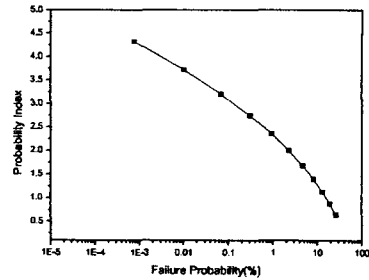


Figure 7. 파손확률과 신뢰성지수

5. 결론

본 연구에서는 등가응력과 한계상태방정식을 이용하여 확률론적 피로수명을 평가하는 방법을 적용하여 표준전동차 차체 구조물이 피로수명 3백만 km에 대해 안전한지를 평가하였다. 수명평가에 관계하는 4가지 확률변수 중에 σ_s , Δ , A 는 대수 정규 (Log-normal) 분포로, k_s 는 정규분포로 가정하였다. 수명평가의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 이들 변수의 확률분포에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 차체 구조물에 대한 구조 건전성 평가 결과 3백만 km (12만 km/년 × 25년) 수행에 대해 파손확률 0.1 %에서 안전한 것으로 판정되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업 (NRL)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 신재철, "강철교의 피로신뢰성 해석모형" (1990), 과학재단연구보고서 [881-1301-002-2 구조]
- 2) 김상호, 이상우, 마호성, 김종학 (1999), "강 철도교의 잔존피로수명 평가," 한국강구조학회 제11권 4호, pp. 329~338.
- 3) 송세영, 신찬호 (1997), "선체구조물의 피로강도 해석기법," 전산구조공학 제 10권 제 3호, pp. 7~14.
- 4) 최상록, 이준성, 김영진, 박유원 (2001) "결합 발생 시점을 고려한 CANDU 압력관 결함의 확률론적 건전성 평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp.155~160.
- 5) D. Gary Harlow and Robert P. Wei, (1994), "Probability Approach for Prediction of Corrosion and Corrosion Fatigue Life," AIAA Journal Vol.32, No. 10, pp.2073~2079.
- 6) I.A. Assakkaf and B.M. Ayyub, (1999), "Reliability based Design for Fatigue of Marine Structures," Third International Workshop on Very Large Floating Structures, University of Hawaii, Honolulu, September 22-24.