

# 터널주행시의 고속전철 차체 피로신뢰성 평가에 관한 연구

## A Study on the Fatigue Reliability Assessment of Car Body for High Speed Train passing through Tunnels

박춘수\* 서승일\* 이태형\* 목진용\*

Park, Choon-Soo Seo, Sung-Il Lee, Tae-Hyung Mok, Jin-Yong

### ABSTRACT

In order to develop a high speed train, various conditions have been considered. Fatigue strength assessment by the fluctuation of pressure is an important one. When high speed train passing through tunnels, the pressure wave is generated in tunnels and pressure variation by the wave is acting on carbody structure with dynamic load repeatedly. In this study, formulation for reliability based fatigue assessment method has been performed when the high speed train passes through tunnels. The formulation was based on structural reliability index method and followed the proposed ISO method. The result by this study would be a good guidance to calculate the fatigue life and reliability index of body structure.

### 1. 서론

철도차량의 차체에 대한 피로특성 분석은 정적하중 측면에서 구조해석 및 하중시험을 통하여 설계시 및 차체 제작후에 수행되는 것이 일반적이며, 한국형 고속전철의 차체 피로특성에 대해서도 이러한 방법에 따라 수행되었다[1]. 그러나, 고속전철은 주어진 선로를 고속으로 주행하기 때문에 정적하중 이외에도 다양한 변동하중을 받고 있으며, 변동하중에 의한 피로강도 특성에 대해서는 운행중에 차체에 작용하는 하중을 분석하는 과정을 거쳐 안정성 및 신뢰성 검증이 필요하다. 특히, 고속열차에서만 고려되어야 하는 터널주행시 터널내 압력파에 의한 하중은 새로운 현상의 하나이다. 고속전철은 경량화된 알루미늄 차체로 터널 통과때 변동하중이 작용하며, 이로 인한 피로손상이 큰 문제점으로 지적되어, 이에 대한 연구가 추진되었다[2]. 반복적으로 변동압력을 받는 고속전철 차체는 피로균열 발생의 위험성에 노출된다. 특히, 내부 결함이 많이 존재하는 알루미늄 차체 용접부의 피로강도는 취약하므로 피로 균열의 위험성이 더욱 증가한다.

따라서 본 연구에서는 변동 압력을 받는 고속전철 알루미늄 차체에 대해 기존의 확정론적(deterministic)인 철도차량 차체의 피로 강도 설계 및 평가 방법과 달리, 확률론적인 신뢰성 기반(probabilistic reliability based)의 피로 강도 설계 및 평가 방법을 정리하였다. 이를 위해 확률적인 특성을 고려할 수 있는 한계 상태식을 정의하고 신뢰성지수 방법에 의한 차체의 피로신뢰성 평가방법을 개발하였다.

\* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단, 정회원

## 2. 구조물의 피로 신뢰성 해석의 기초

### 2.1 구조물의 확률론적 피로평가

일반적으로 구조물의 파괴는 구조물에 가해지는 하중요소(Load factor)  $L$ 과 하중에 저항하는 구조물의 저항요소(Resistance factor)  $R$ 의 상관관계로 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$Z = R - L \quad (1)$$

여기서  $Z = 0$  보다 크지 아니면 작은지에 따라 구조물의 안전성이 판가름된다. 구조물의 피로 평가에서  $R$ 과  $L$ 의 값을 어떻게 택하느냐에 따라 확정론과 확률론적인 방법으로 나누어 볼 수 있다. 확률론적 방법에서는  $R$ 과  $L$ 을 고정된 값이 아니라 확률적인 분포특성을 갖고 있음을 고려하여 평가를 수행하는 방법이다. 즉 저항요소(재료의 물성치)와 하중요소를 확률변수로 보고 발생가능성을 고려하여 두 변수간의 (1)식의 확률적인 파괴가능성으로 피로평가를 수행하는 방법이다.

### 2.2 구조물의 확률론적 피로평가

확률론적 방법으로 구조물의 신뢰성을 평가하는 절차는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다[3]. Action은 외부 환경에 의해 구조물에 가해지는 하중이나 구조물의 변형을 유발시키는 요인이라 할 수 있다. Action 모델을 정의한 후에 구조 모델(structural model)을 정의해야 하는데, 구조모델은 하중에 의한 구조물의 응답으로 볼 수 있으므로 외부 하중 작용 시의 차체의 구조 해석 결과로부터 얻어지는 응력 분포를 통해 정의할 수 있다. 저항 모델(resistance model)은 반복적으로 가해지는 외부 하중에 대항하여 손상이 발생하지 않도록 하는 차체의 능력이라 할 수 있다. 또한 각 모델에 대해서는 불확실성이 존재하므로 불확실성에 대한 모델링 방법을 정의해야 하는데, 통계 자료를 기초로 하여 불확실성을 표현할 수 있다. 구조 모델과 저항 모델을 기초로 차체에서 손상이 발생할 수 있는 한계 상태를 정의하고 한계 상태 방정식을 통해서 파손 확률을 계산할 수 있다. 계산된 차체의 파손 확률을 기초로 차체의 신뢰성을 평가한다.

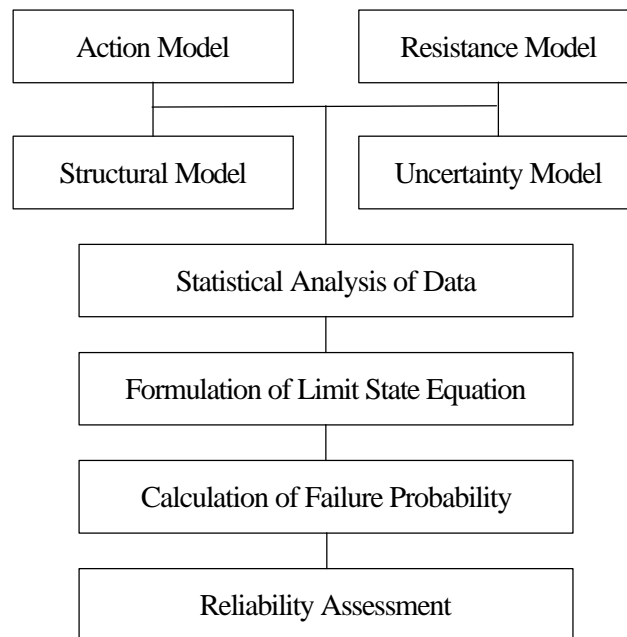


Fig.1 Procedure for reliability assessment of structures

### 2.2.1 차체의 저항 모델

열차가 고속으로 터널을 주행할 때 발생하는 반복적인 압력 변동은 차체 피로 손상을 유발할 수 있고, 차체의 피로 내구성인 피로강도는 재료의 물성치인 S-N 곡선으로 표현할 수 있다. 재료의 S-N 곡선에서 피로 손상 발생시까지의 응력을 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\sigma_R = \sigma_{SN} = \left( \frac{C}{N} \right)^{1/m} \quad (2)$$

이를 차체에 작용하는 압력 하중을 고려하는 문제에 적용하면 다음식과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\sigma_R = \sigma_{SN} = \left( \frac{C}{N_b n_s} \right)^{1/m} \quad (3)$$

여기서,  $N_b$ 는 1회 왕복시의 압력 변동 회수,  $n_s$ 는 총 주회수,  $C$ 는 피로강도상수이다.

S-N 곡선의 기울기  $m$ 과 상수  $C$ , 변동 압력과의 총 사이클  $N$ 의 함수로 표현되는데, 기울기를 표현하는  $m$ 은 재질과 이음부의 형상에 따라 변화하는 값인데, 동일 재질의 동일 형상 이음부이면 동일하다고 가정할 수 있다. 총 사이클은 해석하고자 하는 차량의 주행패턴 및 운행구간 등에 따른 변동 압력의 빈도에 따라 결정되므로 확률변수가 된다. 또한, 동일한 재질과 형상에 대해서도 다른 강도 및 수명을 나타낸다는 것이 일반적이며, 이를 피로상수  $C$ 의 변화로 표현할 수 있어, (2)식은 확률변수  $N$  및  $C$ 를 따르는 확률식으로 정의할 수 있다.

### 2.2.2 차체의 하중 모델

변동하는 하중에 대한 누적 손상이론 가운데 가장 일반적으로 사용되는 방법이 Miner 법칙이다. 이 방법은 피로부재의 피로수명은 각 응력에서 소모된 수명의 비율의 합으로 표현된다고 가정하는 선형 누적 손상법칙(Liner Cumulative Damage Rule)이다. 알루미늄 합금의 피로강도에 대한 연구 결과를 체계적으로 정리하여 피로강도를 평가하는 절차와 기준을 제시하고 있는 ERAAS (European Recommendations for Aluminum Alloy Structures Fatigue Design)에서는 선형 누적 손상법칙의 변형식인 등가 균일 진폭 응력(equivalent constant amplitude stress range)[3]을 기준으로 피로수명을 평가한다. 등가 균일 진폭 응력( $\sigma_e$ )은 다음식으로 정의된다.

$$\sigma_e = \left( \frac{\sum_i n_i \sigma_i^m}{\sum_i n_i} \right)^{1/m} = [ \sum f_i \sigma_i^m ]^{1/m}$$

(4)

여기서,  $n_i$  = 응력 사이클 수

$m$  = S-N 곡선의 기울기

$\sigma_i$  = 블록  $i$ 의 응력변동

변동하중의 누적 반복 횟수에 해당하는 S-N 곡선상의 응력을 기준으로  $\sigma_e = \sigma_{SN}$  이면 재료가 파손됨을 의미한다. (4)식을 연속적인 응력 빈도 분포식으로 표현하면 다음의 (5)식과 같이 된다.

$$\sigma_e = \left( \int_0^\infty f_i \sigma_i^m d\sigma_i \right)^{1/m}$$

(5)

등가 균일 진폭 응력을 계산하기 위해서는 차체 외부 압력 변동에 의해 차체 내부에 발생하는 응력을 계산하여야 한다. 차체 외부 압력 변동에 의한 차체 응력은 설계 단계에서는 구조 해석을 통해 얻을 수 있다. 유한 요소 해석 결과는 차체 응력과 외부 압력값과의 관계를 나타내는 응력 전달 계수를 이용하여 다음 식과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\sigma_i = k_p(S) p_i \quad (6)$$

여기서,  $k_p(S)$  = 응력 전달 계수

$\sigma_i$  = 외압에 의한 차체 응력

$p_i$  = 차체에 작용하는 외압

(4)식을 (5)식에 대입하여 등가 균일 진폭 응력을 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$\sigma_e = \left( \int_0^\infty f(p) (k_p p_i)^m k_p dp_i \right)^{1/m} \quad (7)$$

### 3. 압력 변동 하중에 의한 신뢰성 지수

#### 3.1 차체에 작용하는 압력의 표준 빈도 분포식

고속전철이 터널을 주행할 때 차체가 받는 압력의 표준빈도를 수학적으로 표현하기 위해 장기 적 하중 추정에 적합한 Weibull 분포함수를 사용한다. Weibull 분포함수는 다음 식으로 표현된다.

$$f(p) = \frac{\alpha}{\theta} \left( \frac{p}{\theta} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left( \frac{p}{\theta} \right)^\alpha \right\} \quad (8)$$

여기서,  $\alpha$  = 형상 모수(shape parameter)

$\theta$  = 척도 모수(scale parameter)

$f(p)$ 는 빈도분포함수이므로 다음식을 만족한다.

$$\int_0^\infty f(p) = 1 \quad (9)$$

따라서 특정한  $p_0$ 까지의 누적값을  $F_C$ 라 하면 다음식이 성립한다.

$$\int_0^{p_0} f(p) = F_C \quad (10)$$

이를 식(8)식에 대입하면

$$\int_0^{p_0} \left[ \frac{\alpha}{\theta} \left( \frac{p}{\theta} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left( \frac{p}{\theta} \right)^\alpha \right\} \right] dp = \left[ - \exp \left\{ - \left( \frac{p}{\theta} \right)^\alpha \right\} \right]_0^{p_0}$$

이를 다시 쓰면, 다음식과 같다.

$$1 - \exp \left\{ - \left( \frac{p_0}{\theta} \right)^\alpha \right\} = F_C$$

(9)식을 (7)식에 대입하여 정리하면 압력과 빈도의 경우 척도 모수는 다음식으로 표현될 수 있다.

$$\theta = \frac{p_0}{\left[ \log \frac{1}{1 - F_C} \right]^{1/\alpha}} \quad (11)$$

여기서,  $p_0$  = 특성 압력값(characteristic pressure)

$F_C$  = 특성 압력값까지의 누적 빈도

(11)식을 (8)식에 대입하여 다시 표현하게 되면 다음식과 같이 된다.

$$f(p) = \frac{B\alpha}{p_0} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-B\left(\frac{p}{p_0}\right)^\alpha\right\}$$

(12)

여기서,  $B = \log \frac{1}{1-F_c}$  (누적 빈도)

### 3.2 등가 균일 진폭 응력 계산식

등가 균일 진폭 응력을 구하기 위해 식(7)에 압력빈도 분포함수 식(12)을 대입하여 등가 균일 진폭 응력을 다시 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\sigma_e = \left[ \int_0^\infty k_p^{m+1} p_i^m \frac{B\alpha}{p_0} \left(\frac{p_i}{p_0}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-B\left(\frac{p_i}{p_0}\right)^\alpha\right\} dp_i \right]^{1/m}$$

(13)

이를 감마함수를 이용하여 표현하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_e = k_p^{1+\frac{1}{m}} \frac{p_0}{B^{1/\alpha}} \left[ \Gamma\left(\frac{m}{\alpha} + 1\right) \right]^{1/m}$$

(14)

### 3.3 피로신뢰성 지수 계산

압력변동 하중을 받는 차체의 한계상태방정식(limit state equation)을 저항모델과 하중모델에 의한 재료의 피로강도 및 균일 등가 진폭 응력을 이용하여 대수 정규 분포로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} g &= \log \sigma_R - \log \sigma_e \\ &= \frac{1}{m} \log C - \frac{1}{m} \log N_p - \frac{1}{m} \log n_s \\ &\quad - \left(1 + \frac{1}{m}\right) \log k_p - \log p_0 + \frac{1}{\alpha} \log B - \frac{1}{m} \log \left[ \Gamma\left(\frac{m}{\alpha} + 1\right) \right] \end{aligned}$$

(15)

(15)식에서 확률변수는 차체에 작용하는 특성 압력값  $p_0$ 와 변동 압력의 누적 회수  $N_p$ , 재료의 피로강도 상수  $C$ 가 된다. 대수 정규(log normal) 함수로 표현된 식(15)와 같은 한계 상태식의 신뢰성 지수  $\beta$ 는 식(17)과 같이 계산된다.

$$g = \log R - \log L$$

(16)

$$\beta = \frac{\mu_{\log R} - \mu_{\log L}}{\sqrt{s_{\log R}^2 + s_{\log L}^2}}$$

(17)

일반 구조물의 신뢰도 목표값은 파손 시의 영향과 안전 설계의 상대적인 비용에 따라 달리 설정되어야 한다. 신뢰도 목표값은 ISO에 따르면 다음의 Table 1과 같이 표현할 수 있으므로, 고속 열차 차체의 신뢰성 목표값을 설정하고 열차의 운행패턴 및 설계된 차체의 구조해석을 통해 이를 검증하는 과정을 거치면 Fig.2 와 같은 절차에 따라 알루미늄 차체의 피로 손상을 방지하기 위해 신뢰성 해석에 기초한 설계를 할 수 있다.

Table 1. Target  $\beta$ -values

Relative costs of safety measures	Consequences of failure			
	small	some	moderate	great
High	0	1.5	2.3	3.1
Moderate	1.3	2.3	3.1	3.8
Low	2.3	3.1	3.8	4.3

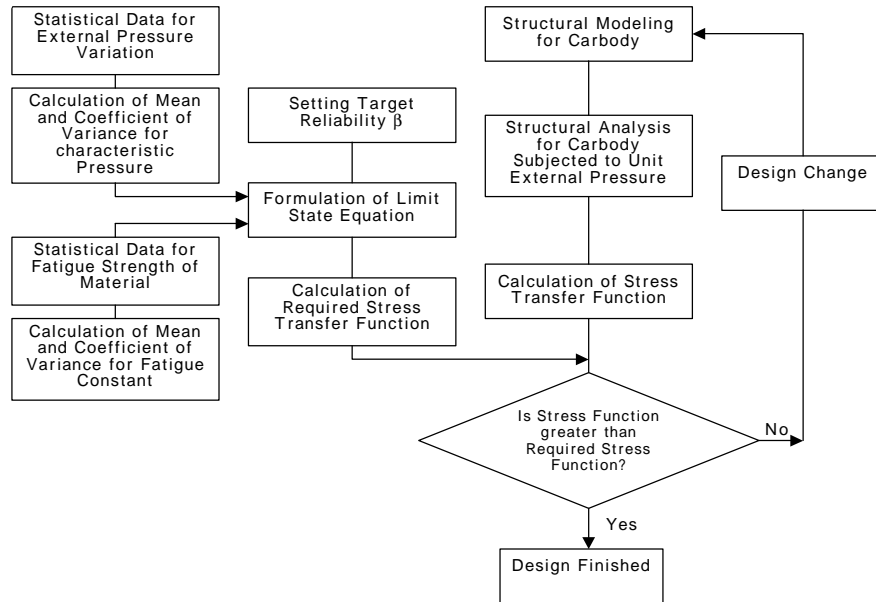


Fig. 2 Probabilistic design procedure for aluminum carbody under external fluctuating pressure

#### 4. 결 론

고속으로 주행하는 열차가 터널 진입시에는 터널내 공기의 압축 및 팽창과에 의한 압력 변동하중을 차체가 받게되며, 이는 차체 피로강도에 영향을 미치는 결과를 초래한다. 본 연구에서는 고속철도 차량의 터널 주행 중의 외부 압력 변동에 의한 차체 피로 강도 신뢰성 해석 기법과 신뢰성 해석에 기초한 차체 피로 평가기법을 수식적으로 제시하였다. 터널 주행 중의 압력 변동은 차량의 고속화에 따라 새롭게 등장하는 문제이고 기존에 사용 실적이 없는 새로운 재질인 알루미늄 차체에 대해서는 변동 압력에 의한 피로 파괴가 더욱 심각한 문제가 될 수 있다.

철도차량의 차체 설계는 지금까지 안전계수에 기초한 확정론적인 설계 방법이 주류를 이루어 왔으나, 하중과 강도의 변동이 심하고 안전에 대한 요구가 중요한 구조물의 설계 문제에서는 확률론적인 설계 방법의 적용이 필요하다

#### 참고문헌

1. “G7 고속전철 기반기술개발(00-II-1-1)” (2002), 연차보고서, 한국기계연구원.
2. Kanta Nihei, Hideo Ono, Shigeki Koe and Fumihide Inamura,(1998) “Fatigue Strength Assessment Method for Shinkansen Aluminum Car Body Structuresw”, Kawasaki Engineering Review, Vol. 138,
3. ISO 2394, (1998) General principles on reliability for structures, International Organization for Standardization,
4. 양영순 외(2002), “구조 신뢰성 공학”, 서울대학교 출판부