

터널을 통과하는 고속열차 차체의 피로신뢰성 평가의 정식화

Formulation for Reliability-based Fatigue Assessment of Car Body for High Speed Train Passing Through Tunnels

박춘수[†] · 서승일* · 민옥기**

Choon-Soo Park · Sung-Il Seo · Oak-Key Min

Abstract

In designing the structures of railway rolling stocks, deterministic methods associated with the concept of a safety factor have been traditionally used. The deterministic approaches based on the mean values of applied loads and material properties have been used as safety verification for the design of rolling-stock car body structures. The uncertainties in the applied loading for the high speed train and the strength of new materials in the rolling stocks require the application of probabilistic approaches to ensure fatigue safety in the desired system. Pressure loadings acting on the car body when the train passes through tunnels show reflected pressure waves for high-speed trains and they may cause a fatigue failure in vehicle bodies. Use of new material technology as body structures also introduces uncertainties in the material strength. A probabilistic approach is more adaptable in designing reliable structures when the pressure waves from the tunnels pounds and new material technology is adopted. In this paper, it is proposed that a fatigue design and assessment method based on a reliability which deals with the loading variations on a railway vehicle due to the pressure reflected in tunnels and the strength variations of material. Equation for the fatigue reliability index has been formulated to calculate the reliability assessment of a vehicle body under fluctuating pressure loadings in a tunnel. Considered in this formulation are the pressure distribution characteristics, the fatigue strength distribution characteristics, and the concept of stress-transfer functions due to the pressure loading.

Keywords : Reliability Index(신뢰성지수), Fatigue Assessment(피로평가), Car body(차체), High speed train(고속열차), Pressure fluctuation(압력변동)

1. 서론

고속으로 주행하는 열차가 터널을 주행하면서 발생하게 되는 압력파에 의한 터널내의 압력변동은 승객 보호를 위해 내부 기밀을 유지하고 있는 차체에 외부 압력으로 작용하게 되고, 터널 주행 시 마다 반복적인 외부 압력을 받는 차체는 피로 균열 발생의 위험성에 노출된다. 특히 내부 결합이 많이 존재하는 알루미늄 차체 용접부에 내부결합이 존재할 때 피로강도는 매우 취약하므로 피로 균열의 위험성은 더욱 증가하게 된다.

따라서 본 연구에서는 압력변동을 받는 고속열차 알루미늄 차체에 대해 기존의 확정론적(deterministic)인 철도차

량 차체의 피로 강도 설계 및 평가 방법과 달리 확률론적인 신뢰성 기반(probabilistic reliability based)의 피로 강도 설계 및 평가방법을 정식화하였다. 또한, 평가의 정식화를 위해 신뢰성지수이론과 실제 시운전시험의 계측 결과를 활용할 수 있는 간략화된 피로신뢰성 평가방법을 제시하였다. 외부 압력변동 하중을 받는 알루미늄 차체에 대해서는 구조 응답의 선형성에 기초한 응력 전달 계수 개념을 도입하여 간편한 방법으로 차체에 작용하는 압력에 의한 응력을 계산할 수 있는 방법도 제시하였다. 변동 압력 및 피로강도의 통계 분석 자료와 응력 전달 계수를 이용하여 한계상태 방정식을 정의하였고, 차체의 피로신뢰성을 평가할 수 있는 간략화된 식을 도출하였다.

고속열차 차체의 신뢰성 평가를 위한 실행모델(action model)은 주행 중 차체 가속도의 변화, 승객 하중의 변화, 불규칙한 궤도에 의한 비틀림 하중, 견인력의 변화에 의한

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단
E-mail : cspark@krrl.re.kr

TEL : (031)460-5621 FAX : (031)460-5649

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

** 연세대학교 기계공학부

차량 상호간의 상대 운동 등 다양한 요인을 고려하여 정의할 수 있으나, 본 연구에서는 고속열차에서 속도 증가와 함께 새로운 문제로 부각되는 터널 주행 중의 압력변동만을 실행모델로 정의하였다. 구조 모델은 차체의 정밀 구조해석 결과에 의해 정의되고, 저항 모델은 차체 피로 강도 특성으로 정의된다. 각 모델은 계측 및 해석 자료에 기초하여 확률 분포 함수로 표현하며, 확률분포 함수 표현 방법의 간략화를 위해 적절한 이상화 모델을 제시한다.

2. 알루미늄 차체의 피로신뢰성 평가 정식화

구조물의 파괴는 구조물에 가해지는 하중요소(Load factor) L 과 하중에 저항하는 구조물의 저항요소(Resistance factor) R 의 상관관계로 아래와 같은 한계상태식(limit state equation)으로 정의할 수 있으며,

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

$Z = 0$ 가 구조물의 안전과 파괴의 경계가 된다. 구조물의 피로평가를 위해서는 R 과 L 의 값을 어떻게 선택하느냐에 따라 확정론적인 방법과 확률론적 방법으로 나누어 볼 수 있는데, 확정론적 방법에서는 R 과 L 을 대표값으로 하고 그 값이 분산되는 특성을 보정하기 위해 안전율을 고려하고 있으며, 확률론적 방법에서는 R 과 L 의 값을 고정된 값이 아니라, 확률적 분포 특성을 갖는 값으로 설정하여 Z 가 0보다 작게 되는 확률을 고려하여 피로를 평가하는 방법이다.

2.1 구조물의 피로신뢰성 평가 절차

확률론적 방법으로 구조물의 신뢰성을 평가하는 절차는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다[1]. Action은 외부 환경에 의해 구조물에 가해지는 하중이나 구조물의 변형을 유발시키는 요인이라 할 수 있다. 실행모델(action model)을 정의한 후에 구조모델(structural model)을 정의해야 하는데, 구조모델은 하중에 의한 구조물의 응답으로 볼 수 있으므로 외부 하중 작용 시 차체의 구조해석 결과로부터 얻어지는 응력 분포를 통해 구조모델을 정의할 수 있다. 저항모델(resistance model)은 반복적으로 가해지는 외부 하중에 대하여 손상이 발생하지 않도록 하는 차체의 능력이라 할 수 있다. 또한 각 모델에 대해서는 불확실성이 존재하므로 불확실성에 대한 모델링 방법을 정의해야 하는데, 통계 자료를 기초로 불확실성을 표현할 수 있다. 구조모델과 저항모델을 기초로 차체에서 손상이 발생할 수 있는 한계상태를 정의하고 한계상태방정식을 통해서 손상 확률을 계산할 수 있다. 계산된 차체의 손상 확률을 기초로 차체의 신뢰성을 평가할 수 있다.

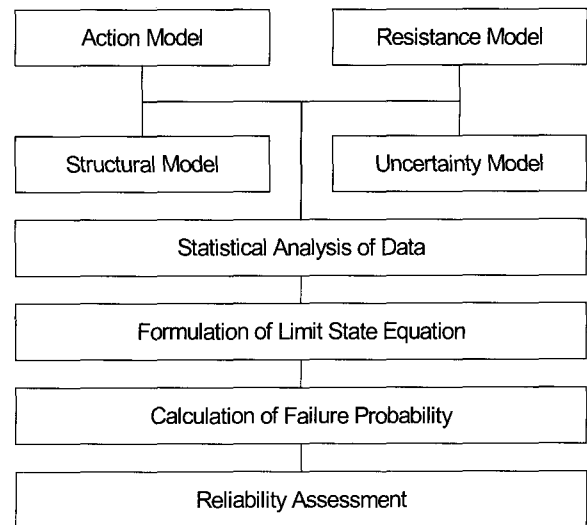


Fig. 1. Procedure for reliability assessment of structures

2.2 차체의 저항모델

열차가 고속으로 터널을 통과하면서 받는 반복적인 압력 변동에 의한 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 1회 왕복시의 압력변동 회수(N_p), 수명주기동안 총 주행회수(n_s), 피로강도상수(C)를 이용하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

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

피로강도는 S-N 곡선의 기울기 m 과 상수 C , 변동 압력 파의 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 열차의 주행패턴 및 운행구간 등에 따른 변동압력의 빈도에 따라 결정되므로 확률변수가 된다. 또한, 동일한 재질과 형상에 대해서도 다른 강도 및 수명을 나타낸다는 것은 일반적이며, 이를 피로상수 C 의 변화로 표현할 수 있어, 식 (2)는 확률변수 N 및 C 에 따르는 확률식으로 정의할 수 있다.

2.3 차체의 하중모델

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)을 기준으로 피로수명을 평가한다. 등가 균일 진폭 응력(σ_e)은 다음 식으로 정의된다.

$$\sigma_e = \left(\frac{\sum_i n_i \sigma_i^m}{\sum_i n_i} \right)^{1/m} \tag{4}$$

이식은 다음과 같이 응력 사이클의 빈도 분포식으로 변형될 수 있으며,

$$\sigma_e = \left(\sum_i f_i \sigma_i^m \right)^{1/m} \tag{5}$$

$$f_i = [n_i / \sum n_i] \tag{6}$$

식 (5)를 연속적인 응력 빈도 분포식으로 표현하면 다음의 식 (7)과 같이 된다.

$$\sigma_e = \left(\int_0^\infty f_i \sigma_i^m d\sigma_i \right)^{1/m} \tag{7}$$

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

$$\sigma_i = k_p(s) p_i \tag{8}$$

2.4 차체에 작용하는 압력의 표준빈도 분포식

식 (7)에서 알 수 있듯이, 고속열차가 터널 통과시에 받게 되는 압력변동에 의한 차체의 피로를 평가할 수 있는 등가 균일 진폭 응력은 차체에 작용하는 압력 빈도 분포식에 의해 표현할 수 있다. 또한, 진폭 응력의 빈도 분포는 압력 빈도 분포와 동일하며, 값의 크기만 식 (8)의 관계에 따라 확대 및 축소된다.

압력의 표준빈도를 수학적으로 표현하기 위해 장기적 하중 추정에 적합한 와이블(weibull) 분포함수를 사용한다[2].

와이블 분포함수는 다음 식으로 표현할 수 있으며,

$$f(p) = \frac{\alpha}{\theta_p} \left(\frac{p}{\theta_p} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left(\frac{p}{\theta_p} \right)^\alpha \right\} \tag{9}$$

응력의 빈도분포도 동일하게 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$f(\sigma) = \frac{\alpha}{\theta_\sigma} \left(\frac{\sigma}{\theta_\sigma} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\theta_\sigma} \right)^\alpha \right\} \tag{10}$$

$f(\sigma)$ 는 빈도분포함수이므로 다음 식을 만족하여야 하며,

$$\int_0^\infty f(\sigma) = 1 \tag{11}$$

특정한 σ_0 까지의 누적값을 F_C 라 하면 다음식이 성립하므로

$$\int_0^{\sigma_0} f(\sigma) = F_C \tag{12}$$

이를 식 (11)에 대입하여 정리하면 아래의 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \int_0^{\sigma_0} \left[\frac{\alpha}{\theta_\sigma} \left(\frac{\sigma}{\theta_\sigma} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\theta_\sigma} \right)^\alpha \right\} \right] d\sigma \\ = \left[- \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\theta_\sigma} \right)^\alpha \right\} \right]_0^{\sigma_0} \end{aligned} \tag{13}$$

식 (13)과 식 (11)로부터 아래와 같은 관계가 성립되고,

$$1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_0}{\theta_\sigma} \right)^\alpha \right\} = F_C \tag{14}$$

식 (14)을 식 (10)에 대입하여 정리하면 응력 빈도의 경우 척도 모수는 다음 식으로 표현될 수 있으며,

$$\theta_\sigma = \frac{\sigma_0}{\left[\log \frac{1}{1-F_C} \right]^{1/\alpha}} \tag{15}$$

식 (15)를 식 (10)에 대입하여 다시 표현하면 응력의 빈도 분포는 다음식과 같이 된다.

$$f(\sigma) = \frac{B\alpha}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - B \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\alpha \right\} \tag{16}$$

$$B = \log \frac{1}{1-F_C} \tag{17}$$

2.5 등가 균일 진폭 응력 계산식

등가 균일 진폭 응력을 구하기 위해 식 (10)에 응력빈도

분포함수 식 (16)을 대입하여 식 (7)의 등가 균일 진폭 응력을 다시 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\sigma_e = \left[\int_0^\infty \sigma_i^m \frac{B\alpha}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^{\alpha-1} \exp\left\{-B\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right)^\alpha\right\} d\sigma_i \right]^{1/m} \quad (18)$$

여기서, $B\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right)^\alpha = t$ 라 하면 $\sigma_i = \sigma_0\left(\frac{t}{B}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$ 이므로, 이를 식 (18)에 대입하여 정리하면 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \left[\int_0^\infty \sigma_0^m \left(\frac{t}{B}\right)^{\frac{m}{\alpha}} e^{-t} dt \right]^{1/m} \\ &= \left[\int_0^\infty \left(\frac{\sigma_0^m}{B^{\frac{m}{\alpha}}}\right) t^{\frac{m}{\alpha}} e^{-t} dt \right]^{1/m} \end{aligned} \quad (19)$$

이를 감마함수를 이용하여 정리하면 등가 균일 진폭 응력은

$$\sigma_e = \frac{\sigma_0}{B^{1/\alpha}} \left[\Gamma\left(\frac{m}{\alpha} + 1\right) \right]^{1/m} \quad (20)$$

이며, 식 (20)에 식 (8)을 적용하면 등가 균일 진폭 응력은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_e = k_p \frac{p_0}{B^{1/\alpha}} \left[\Gamma\left(\frac{m}{\alpha} + 1\right) \right]^{1/m} \quad (21)$$

2.6 한계상태방정식

한계상태방정식은 하중과 저항의 상관에 의해 정의되며, 식 (1)과 같이 표현된다. 구조물의 신뢰성 피로평가에서는 저항모델 R과 하중 L을 확률변수로 규정하여 한계상태방정식에 의해 새로이 정의된 확률변수 Z의 확률적인 특성을 살펴본다. 만일 식 (1)의 두 확률변수 R과 L이 각각 서로 독립인 정규분포 확률변수이면, 한계상태방정식에 의한 새로운 확률변수 Z는 평균과 분산이

$$\mu_z = \mu_R - \mu_L, \quad \sigma_z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 \quad (22)$$

인 정규분포함수로 표현할 수 있다. 따라서, 파괴확률(probability of failure)은 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_f &= P[Z < 0] = F_Z(0) \\ P_f &= \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right\} dz \end{aligned} \quad (23)$$

한편, 모든 정규변수는 다음식과 같은 변수변환을 이용하

여 표준정규변수로 변환할 수 있다.

$$u = \frac{z - \mu_z}{\sigma_z} \quad (24)$$

이렇게 변환된 표준정규분포함수는 평균이 0이고, 분산이 1인 분포특성을 갖게 된다.

식 (23)을 이용하여 파괴확률을 다시 쓰면, 식 (25)로 표현되며,

$$\begin{aligned} P_f &= \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\{-u^2\} du \\ &= \Phi(-\beta) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 파괴확률 P_f 와 표준정규 확률분포함수인 Φ 사이 식 (26)의 관계가 성립하도록 하는 β 를 신뢰도지수(Reliability index)라고 한다.

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{s_R^2 + s_L^2}} \quad (26)$$

대수 정규(log normal) 함수로 표현되는 저항과 하중 모델에 대해서는 다음의 식 (27)과 같이 한계상태방정식이 정의되고, 신뢰성 지수는 식 (28)과 같이 계산된다[3].

$$g = \log R - \log L \quad (27)$$

$$\beta = \frac{\mu_{\log R} - \mu_{\log L}}{\sqrt{s_{\log R}^2 + s_{\log L}^2}} \quad (28)$$

$\log x$ 의 분산은 좌표 변환에 의해 다음 식과 같이 x 의 분산 계수(coefficient of variance)로 표현할 수 있으며,

$$\text{Var}[\log x] = \log[V_x^2 + 1] \quad (29)$$

$$V_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (30)$$

$\log x$ 의 평균도 다음 식과 같이 x 의 평균과 분산 계수(coefficient of variance)로 표현할 수 있다.

$$E[\log x] = \log E[x] - \frac{1}{2} \log[V_x^2 + 1] \quad (31)$$

2.7 피로신뢰성 지수

차체의 피로신뢰성 평가를 위해 식 (3)과 식 (21)을 이용하여 재료의 피로강도 및 균일 등가 진폭응력을 대수 정규분포로 한계상태방정식을 구하면 다음과 같다.

$$g = \log \sigma_R - \log \sigma_e$$

$$= \frac{1}{m} \log C - \frac{1}{m} \log N_p - \frac{1}{m} \log n_s - \log K_p(s)$$

$$- \log p_0 + \frac{1}{\alpha} \log B - \frac{1}{m} \log \left[\Gamma \left(\frac{m}{\alpha} + 1 \right) \right] \quad (32)$$

식 (32)에서 확률변수는 차체에 작용하는 특성 압력값 p_0 와 변동 압력의 누적 회수 N_p 와 재료의 피로강도 상수 C 가 된다. 차체의 피로평가를 위한 신뢰성 지수(reliability index) β 는 먼저 식 (28)의 각 항을 구하여야 한다.

$$\mu_{\log \sigma_R} = E [\log \sigma_R]$$

$$= \frac{1}{m} E [\log C] - \frac{1}{m} E [\log N_p] - \frac{1}{m} \log n_s \quad (33)$$

$$\mu_{\log \sigma_e} = E [\log \sigma_e]$$

$$= \log k_p(s) + E [\log p_0] - \frac{1}{\alpha} \log B + \frac{1}{m} \log \left[\Gamma \left(\frac{m}{\alpha} + 1 \right) \right] \quad (34)$$

$$s_{\log \sigma_R}^2 = Var [\log \sigma_R]$$

$$= \frac{1}{m^2} Var [\log C] + \frac{1}{m^2} Var [\log N_p] \quad (35)$$

$$s_{\log \sigma_e}^2 = Var [\log \sigma_e] = Var [\log p_0] \quad (36)$$

3. 입력변동에 의한 차체 피로신뢰성 평가법

고속열차가 터널을 통과하면서 받는 압력변동하중에 의한 알루미늄 차체의 피로 손상을 방지하기 위해 신뢰성 해석에 기초한 설계 방법은 앞절에서 제시한 식을 이용하여 실시할 수 있으며, 그 절차는 Fig. 2와 같다.

그림으로 제시된 평가절차를 설명하면, 고속열차가 터널을 통과하면서 받는 외부 압력변동하중에 의해 차체가 파괴될 수 있는 확률의 허용값에 기초하여 신뢰도 목표값을 설정하고 차체 피로 파괴의 한계상태방정식을 정식화한다. 터널을 통과하면서 차체가 받는 압축파에 의한 외부 압력변동은 유사차량 및 초기 제작차량으로부터 예측된 결과를 분석하여 와이블 분포함수를 구하고, 특성 압력변동값(p_0)의 분포를 대수분포로 가정하여 최대압력의 평균(mean)과 분산계수(coefficient of variance)를 계산한다.

차체 재료의 피로강도는 이음부의 형상에 따라 달라지는데, 이음부에 따른 피로강도 S-N곡선의 기울기는 ERAA의 결과를 참고로 활용한다. S-N곡선의 피로강도상수의 평균과 분산계수는 시험 결과에 대한 통계 분석을 통해 얻는다. 신뢰도 목표값(β)을 정하고 최대압력의 평균과 분산계수 및 피로강도상수의 평균과 분산계수를 알게 되면, 차체에서 요구되는 응력 전달 계수 $k_p(s)$ 를 결정할 수 있다. 응력 전달

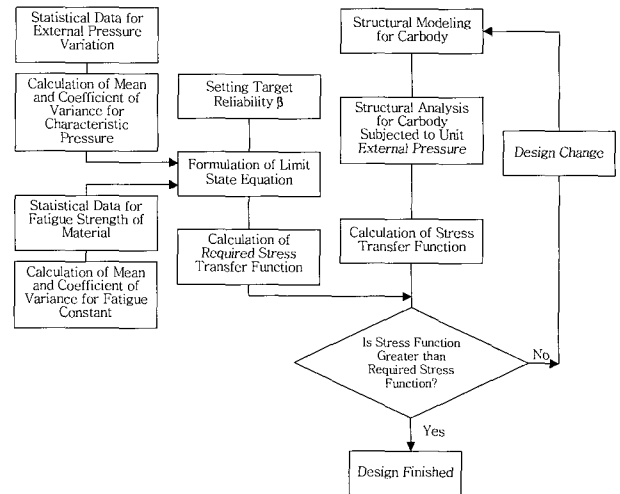


Fig. 2. Probabilistic design procedure for aluminum carbody under external fluctuating pressure

계수의 요구값 $k_p(s)$ 가 정해지면 차체의 초기 설계 결과에 기초하여 구조해석 모델링을 수행하고, 차체 외부에 단위 압력을 가하여서 응력집중 이음부의 응력을 계산함으로써 응력 전달 함수를 구한다. 응력 전달 계수가 구해지면 요구되는 응력 전달 함수와 비교하고 요구 응력 전달 계수에 비해 계산된 응력 전달 계수가 적게 되면 설계를 변경하여 다시 구조 해석을 수행하고 응력 전달 계수를 구하게 된다. 계산된 응력 전달 계수가 요구되는 응력 전달 계수보다 크거나 같아지도록 설계 변경을 반복하여 실시한다.

위와 같은 절차에 따라 설계하고자 하는 열차 차체의 피로신뢰성을 평가를 확정론에 근거한 구조해석과 병행하여 수행하면 보다 안전한 차체의 설계·제작이 가능할 것이다.

4. 확률론적인 설계의 특징

본 논문에서 제안된 확률론에 근거한 평가방법과 기존의 확정론적인 방법의 특성을 살펴보기 위해 재료의 피로강도 상수가 변화함에 따라 차체의 최적화 가능성을 살펴본다. 앞절에서 제시한 평가 방법과 같이 열차의 차체에 요구되는 신뢰성지수를 만족하기 위한 응력 전달계수(stress transfer function)를 재료의 피로강도상수와 상관관계를 살펴보면 Fig. 3과 같다. 그림은 신뢰성지수에 가장 큰 영향을 미치는 피로강도상수의 분산계수의 변화와 응력전달계수와 상관관계를 살펴보기 위해 식 (25)에서 다른 값은 고정시킨 후 두 값의 관계를 구하여 그린 것이다.

응력 전달 계수는 차체 외부에 압력하중이 작용할 때 차체가 받는 응력과 작용하는 압력하중의 비로서, 응력 전달 계수

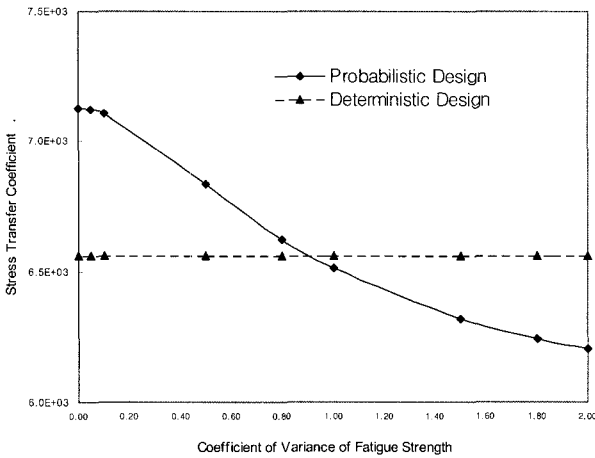


Fig. 3. Required stress transfer coefficient

를 작게 하려면 차체의 부재 치수를 크게 하여 강도를 보강해야 함을 뜻한다. 확정론적인 설계에서는 하중 및 강도의 평균값만이 고려 대상이므로 분산 계수의 변화에 따라 요구되는 응력 전달 계수의 변화가 있을 수 없으나, 확률론적인 설계에서는 분산 계수의 확률 분포가 피로평가에 영향을 주고 있으므로, 그림에서도 재료의 피로강도상수의 변화에 따라 응력 전달계수가 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 확률론적인 방법을 사용하여 차체에 작용하는 하중의 특성과 재료의 특성을 통계적인 방법에 의해 처리하면, 차체의 설계에서 확정론적인 방법보다 최적화를 이룰 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

철도차량의 차체 설계는 지금까지 안전계수에 기초한 확정론적인 설계 방법이 주류를 이루어 왔으나, 하중과 강도의 변동이 심하고 안전에 대한 요구가 중요한 구조물의 설계문제에서는 확률론적 설계방법의 적용이 필요하다. 또한, 터널을 통과하면서 발생하는 압력변동이 차체에 하중으로 작용하는 현상은 철도의 고속화에 따라 새롭게 등장하는 문제이고 기존에 사용 실적이 없는 새로운 재질인 알루미늄 차체에 대해서는 변동 압력하중에 의한 취약부의 피로파괴가 더욱 심각한 문제가 될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 고속열차가 터널을 통과할 때 터널내 압력변동하중에 의한 차체 피로강도 신뢰성평가식을 제시하였으며, 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 고속열차가 고속으로 터널을 통과할 때 압력변동 하중에 따른 차체의 피로신뢰성을 계산할 수 있는 피로신뢰성 지수 계산식을 압력변동 분포 특성, 알루미늄 차체의 피로강도 분포특성 및 압력 하중에 의한 응력전달계수 개념 등을 이용하여 정식화하였다.
- (2) 고속열차가 터널을 통과하는 동안 차체가 받는 압력변동하중에 의한 차체 내부의 응력을 파악할 수 있는 응력 전달 계수의 개념을 제시하여 새로운 차체의 설계시에 이를 사용할 수 있도록 하였다.
- (3) 제시된 차체 피로신뢰성 평가 방법에 기초하여 신뢰성 목표값을 만족시킬 수 있는 확률론적 차체 설계 방법을 제시하였고 확정론적 설계 방법과의 차이점을 명확히 하여, 확률론적인 피로평가방법이 확정론보다 설계최적화에 장점이 있음을 보였다.

후 기

본 논문은 고속철도기술개발사업 “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발” 과제 연구결과의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

1. ISO 2394 (1998). “General principles on reliability for structures”, International Organization for Standardization
2. Owen F. hugues (1983). *Ship Structural Design*, A Wiley-inter-science
3. Palle Thoft-Christensen and Michael J. Baker (1982). *Structural Reliability Theory and Its Applications*, Springer-Verlag, New York
4. Assakaf, I.A., Ayyub, B.M. (1999). “Reliability-based Design for Fatigue of Marine Structure”, Proceedings of Third International Workshop on Very Large Floating Structures
5. 박춘수, 서승일, 이억재 (2004). “터널주행시의 고속전철 차체피로신뢰성평가에 관한 연구”, 춘계학술대회논문집
6. Nihei Kanta, Hideo Ono, Shigki Koe and Fumihide Inamura (1998). “Fatigue Strength Assessment Method for Shinkansen Aluminium Car Body Structure”, Kawasaki Engineering Review, Vol.138