

피로 자료 분산을 고려한 자동차 부품의 신뢰도 해석

남기원[#], 이병채^{*}

Evaluation of Chassis Component Reliability Considering Variation of Fatigue Data

Gi Won Nam [#] and Byung Chai Lee^{*}

ABSTRACT

In this paper, probabilistic distribution of chassis component fatigue life is determined statistically by applying the design of experiments and the Pearson system. To construct p - ε - N curve, the case that fatigue data are random variables is attempted. Probabilistic density function (p.d.f) for fatigue life is obtained by the design of experiment and using this p.d.f fatigue reliability, any aimed fatigue life can be calculated. Lower control arm and rear torsion bar of chassis components are selected as examples for analysis. Component load histories which are obtained by multi-body dynamic simulation for Belsian load history are used. Finite element analysis is performed by using commercial software MSC Nastran and fatigue analysis is performed by using FE Fatigue. When strain-life curve itself is random variable, the probability density function of fatigue life has very little difference from log-normal distribution. And the cases of fatigue data are random variables, probability density functions are approximated to Beta distribution. Each p.d.f is verified by Monte-Carlo simulation.

Key Words: design of experiment(실험 계획법), fatigue reliability(피로 신뢰도), Monte Carlo simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Pearson system(피어슨 시스템)

기호설명

b = fatigue strength exponent
 c = fatigue durability
 E = elastic modulus
 ϵ_f = fatigue durability coefficient
 $\Delta\epsilon_e/2$ = elastic strain amplitude
 $\Delta\epsilon_f/2$ = total strain amplitude
 $\Delta\epsilon_p/2$ = plastic strain amplitude

N_f = fatigue life
 P_f = probability of failure
 p - ε - N = probability strain life curve
 σ_f = fatigue strength coefficient
 μ = average of system
 σ = standard deviation of system
 $\sqrt{\beta_1}$ = skewness of system
 β_2 = kurtosis of system

☞ 접수일: 2006년 5월 9일; 게재승인일: 2006년 12월 5일

교신저자: 한국항공우주연구원 구조팀

E-mail giwony@kari.re.kr Tel. (042) 860-2246

* 한국과학기술원

1. 서론

피로에 의한 파괴는 재료가 항복강도 이하의 반복하중을 받을 때 발생한다. 이는 제작과정이나 기계를 사용하는 과정에서 작은 결함이나 균열이 발생하기 때문이다. 이러한 피로에 의한 파괴는 기계적 파괴의 70-80%를 차지한다. 대부분의 피로 파괴는 예측하기 힘들고 심각한 손상을 초래하기 때문에 피로 파괴는 이런 반복하중을 받고 있는 자동차나 항공기 또는 발전소 등을 설계하는데 아주 중요한 관심사가 되어오고 있다.

피로 해석을 하는 데는 크게 응력-수명 접근 방법과 변형률-수명 접근 방법이 있다. 응력-수명 접근 방법에서 구조물의 피로 수명은 반복하중의 응력크기를 기초로 구한다. 이 방법의 가장 큰 단점은 재료가 탄성변형만을 한다는 가정으로 피로를 해석한다는 데 있다. 이러한 가정은 소성변형이 있는 경우에 피로 수명을 과대평가하게 된다. 그러므로 응력-수명 접근 방법은 고주기피로와 같이 소성변형을 무시할 수 있는 경우에만 적용 가능하다.

다른 방법으로 변형률-수명 접근 방법에서 피로 수명은 탄성과 소성 변형을 모두 고려한 전체 변형률의 크기를 사용하여 구한다. 그러므로 이 방법은 소성 변형이 현저한 저주기 피로에도 적용이 가능하다. 결과적으로 고주기 피로의 경우 변형률을 무시할 수 있기 때문에 응력-수명 접근법과 변형률-수명 접근법으로 구한 피로 수명이 동일하게 된다. 즉, 변형률-수명 접근법은 고주기 피로문제나 저주기 피로문제 모두에 적용 가능하다.

피로를 해석하는데 있어서 실험 데이터의 분산 정도는 매우 중요한 논점이다. 얼마나 신중하게 피로 실험을 수행하였는가에 관계없이 실험 데이터는 임의의 분산을 가진다.¹ 기계 구조물을 구성하는 요소에 대한 피로 수명의 변동에 영향을 미치는 인자는 재료의 특성, 열처리 및 제조 과정, 요소의 치수에서 나타나는 기하학적 변동, 작용 하중 이력, 수명 해석 기법의 불확실성 등을 들 수 있다. 대개 피로 수명 분포는 와이불(Weibull) 분포나 대수 정규 분포를 따른다고 가정하고 있으며, 이는 철에 대한 피로 수명 시험결과에서 검증되었다. 분산의 크기에 따라 정확한 구조물의 신뢰도 평가가 반드시 요구되기도 한다.

구조물의 거동을 해석하는 데 있어서 일반적으로 사용해 온 방법은 해석에 고려되는 변수들이

일정한 불변의 값을 갖고 있다는 가정에 입각한 확률론적 방법(deterministic approach)이었다. 그러나 실제 구조물에 작용하는 하중이나 물성치는 고정된 어떤 값을 가지는 것이 아니라 평균값을 중심으로 분산특성에 따라 분포되어 있다. 구조물의 물성치나 작용 하중의 임의성을 보다 합리적으로 고려하기 위해서는 확률론적 해석 방법이 필요하다. 이 방법은 기존의 해석방법의 연장선상에서 일차적으로는 평균을 중심으로 해석하고 이차적으로 확률변수의 변동량을 고려하는 방법과 개념적으로 유사하다.²

본 논문에서는 통계특성을 고려한 변형률-수명 피로 해석 방법을 이용하여 구조물의 신뢰도를 계산하였다. 확률변수는 재료의 피로 물성치인 피로 강도 지수(fatigue strength exponent) b , 피로 연성 지수(fatigue durability exponent) c , 피로 강도 계수(fatigue strength coefficient) σ_f , 피로 연성 계수(fatigue durability coefficient) ϵ_f 와 탄성계수 등으로 두었다. 확률 변형률 선도($p - \epsilon - N$)를 구성하여 피어슨 시스템을 이용한 실험계획법을 이용하여 시스템의 확률밀도함수를 예측하고 이를 이용하여 구조의 피로 신뢰도를 계산하였다.

2. 구조물의 피로 신뢰도 해석

2.1 변형률-수명 접근 방법

변형률-수명 방법에서는 탄성 변형률 효과가 두드러지는 영역에서 소성 변형률에 의한 효과가 두드러지는 영역으로 바뀌는 부분이 존재한다. 변형률-수명 관계식은 다음과 같다.³

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_f/2 &= \Delta\epsilon_e/2 + \Delta\epsilon_p/2 \\ &= \sigma_f/E(2N_f)^b + \epsilon_f(2N_f) \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에 의한 피로 수명과 전체 변형률 사이의 수명 관계는 Fig. 1에 나타나 있다. 일정한 진폭을 가지는 주기적 하중 하에서는 식 (1)에서 주어진 일정 변형률 진폭, $\Delta\epsilon_f/2$ 와 재료 상수만으로 피로 수명을 구할 수 있다. 식(1)은 좀 더 일반적인 하중에서도 사용할 수 있다. 재료 파라미터는 평활 시편의 단순 주기 시험으로 구할 수 있다. 변형률의 진폭은 직접적으로는 특정 위치에서 변형률을 측정해서 구할 수 있고 간접적으로는 해석적인 방법이나 유한요소법 같은 근사방법으로 구할 수 있다.

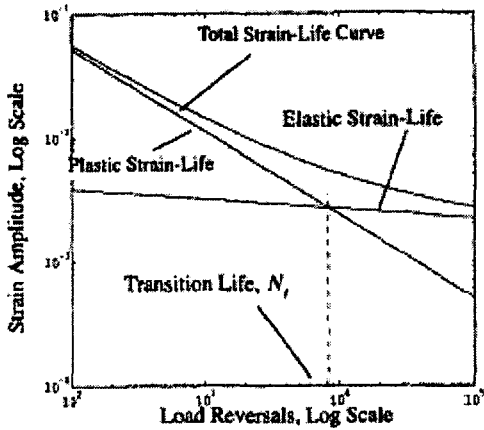


Fig. 1 Elastic strain, plastic strain, and total strain life curve³

위 그림에 나타난 변형률-수명 선도에서는 천이 피로 수명이라고 불리는 점이 있다. 이 점에서는 전체 변형률 진폭에 기여하는 탄성 효과와 소성 효과가 동일할 경우의 피로 수명을 나타낸다. 식 (1)의 탄성과 소성 관계식을 이용하면 천이 피로 수명 $2N_f$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$2N_f = \left(\frac{E \epsilon_f}{\sigma_f} \right)^{1/(b-c)} \quad (2)$$

본 논문에서는 재료의 탄성 변형과 소성 변형을 모두 고려하는 변형률-수명 접근방법을 기초로 확률-변형률-수명 선도를 구성하였다. 선도를 구성하는 파라미터나 물성치는 평균적인 양이므로 변형률-수명 관계식 또한 평균적인 의미에서 실험 데이터를 나타낸다. 파라미터의 불확실성과 시험 피로 데이터에서 나타나는 임의의 분산을 고려하기 위해, 본 논문에서는 식(1)에서 재료 파라미터 σ_f , ϵ_f , b , c 를 확률변수로 모델링 하였다. 그러므로 파괴가 일어나는 피로 수명 N_f 도 확률변수가 된다. 즉, $N_f = N_f(X)$ 이며 여기서 X 는 랜덤 벡터(random vector)이다.

2.2 피로 신뢰도 해석 방법

피로에 의한 파괴는 가해진 하중의 주기 n 이 확률 변수 N_f 를 넘을 때 일어난다고 할 수 있다. 즉, 수식으로 나타내면 다음과 같다.⁴

$$P_f = P\{N_f(X) \leq n\} = \int \dots \int_{N_f(X) \leq n} f_x(X) dX \quad (3)$$

여기서 f_x 는 모든 확률변수의 결합 확률 밀도 함수이다. 이 식은 확률변수가 셋 이상일 경우 직접 계산하기가 매우 어렵다.

2.3 몬테카를로 시뮬레이션

이에 대한 대안으로 파괴 확률을 계산하는 방법인 몬테카를로 시뮬레이션이 있다. 이 방법은 구조물의 파괴에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 결합 확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작을 확률을 상대적으로 정확하게 계산하는 방법이다. 몬테카를로 시뮬레이션은 충분한 횟수의 가상실험(simulation)을 반복하여 파괴 확률을 근사적으로 산정한다는 이유로 추출법이라고도 한다.

확률변수들의 결합 확률밀도함수를 이용하여 각 확률변수의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 추출하여 충분한 수의 확률변수의 표본집단(set)을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수의 값을 차례로 한계상태 식에 대입하여 그 값이 0보다 큰지 작은지, 즉 구조물이 안전한지 파괴되는지를 판단한다. 그 결과로 모두 N 개의 확률변수 표본집단을 추출하였을 때, 한계상태식이 0보다 작은 경우가 n_f 번 관측되었다면 파괴확률 P_f 는 다음과 같이 근사적으로 추정할 수 있다.²

$$P_f \approx \frac{n_f}{N} \quad (4)$$

몬테카를로 시뮬레이션은 분포특성이 알려진 확률변수들의 함수로 정의되는 새로운 확률변수의 통계적 특성과 분포함수도 추정할 수 있다. 본 논문에서는 실험계획법으로 구한 분포를 검증하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

2.4 실험계획법(Design of Experiment)과 피어슨(Pearson) 시스템

신뢰도 기반 최적 설계에서 확률 변수를 고려한 설계 변수와 제한 조건과의 관계는 $y = g(x_1, \dots, x_n)$ ($x_i, (i=1, \dots, n)$: 확률변수)로 나타낼 수 있다. 통계적 모멘트를 이용하여 일반적으로 타당한 확률 분포를 구할 수 있다.

임의의 확률분포를 가진 확률변수를 x 라고 할 때 한계함수 $g(x)$ 의 원점에 대한 k 차 모멘트는 다음과 같다.

$$M_k = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^k f(x) dx \quad (5)$$

1 에서 4 차까지의 통계적 모멘트를 정확하게 구하기 위해서는 최소한 3 절점 수치적분이 필요하다. 수치적분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^k f(x) dx \cong w_1 (\alpha_1 \sigma)^k + w_2 (\alpha_2 \sigma)^k + w_3 (\alpha_3 \sigma)^k \quad (6)$$

$(k = 0, 1, 2, 3, 4, 5)$

(6)의 식을 풀면 가중치와 수준 $\{w_1, w_2, w_3, l_1, l_2, l_3\}$ 을 구할 수 있다. 본 논문에서는 참고논문⁵에서 제안한 가중치와 수준을 사용하였다. 이 방법은 비정규 분포를 포함한 일반적인 확률분포를 가진 시스템의 통계적 모멘트를 매우 간단하고 정확하게 풀 수 있다.

신뢰도 기반 최적설계를 수행하기 위해서는 수집한 통계 자료로부터 확률변수가 가지고 있는 실험적인 분포(empirical distribution)를 신뢰도 해석에 사용할 수 있도록 수학적인 확률 분포 모델에 접합시킬 필요가 있다. 이러한 확률 분포 모델링에 관한 기법으로는 존슨 시스템(Johnson system), 피어슨 시스템(Pearson system), Cornish-Fisher 전개, Gram-Charlier 급수, Edgeworth 급수 등이 있는데 본 연구에서는 1 차에서 4 차까지의 통계적 모멘트만으로 적용이 가능하고 가장 정확성이 뛰어난 것으로 평가 받고 있는 피어슨 시스템을 이용하고 있다.

피어슨 시스템은 다음의 미분방정식을 만족시키는 확률 밀도 함수 $f(x)$ 로 구성된다.

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{(\bar{x} - a_0)f}{b_0 + b_1\bar{x} + b_2\bar{x}^2} \quad (7)$$

여기서, $\bar{x} = x - \mu$ 이고, $\mu, \sigma, \sqrt{\beta_1}, \beta_2$ 는 각각 x 의 평균, 표준편차, 왜도, 첨도이다. 그리고 각각의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_0 &= b_1 = -\sigma\sqrt{\beta_1}(\beta_2 + 3)/A, \\ b_0 &= -\sigma^2(4\beta_2 - 3\beta_1)/A, \\ b_2 &= -(2\beta_2 - 3\beta_1 - 6)/A \\ A &= 10\beta_2 - 18 - 12\beta_1 \end{aligned} \quad 5 (3.2.1) \quad (8)$$

a_0 는 분포의 모드(mode)로서 $\bar{x} = a_0$ 에서 $\partial f(x)/\partial x = 0$ 이 되는 점이며, 피어슨 시스템은 하나의 모드를 갖는 것으로 가정한다.

피어슨 시스템은 다음의 조건에 따라서 각각 다른 유형을 갖게 되며, β_1 과 β_2 의 값에 따른 각 유형은 Fig. 2 에 도시되어 있다.

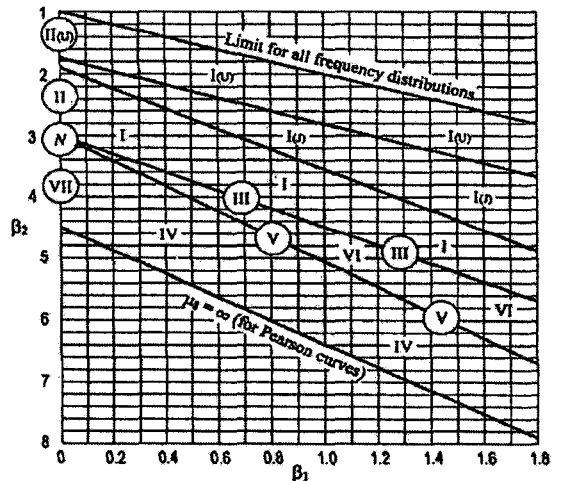


Fig. 2 The type of Pearson frequency curve to the values of β_1 and β_2 ⁵

3. 자동차 부품의 수치해석

3.1 해석의 적용

대개의 자동차는 여러 가혹 환경하에서 10 년 이상의 수명을 요구한다. 이는 단순한 항복응력 해석으로는 적절한 설계를 할 수 없다는 것을 의미한다. 그러므로 자동차를 설계하는 단계에서 내구 개념의 설계가 반드시 필요하다.

본 논문에서는 자동차 부품에 대한 피로 신뢰도 해석을 수행하였다. 해석 과정을 Fig 3 에 나타내었다.

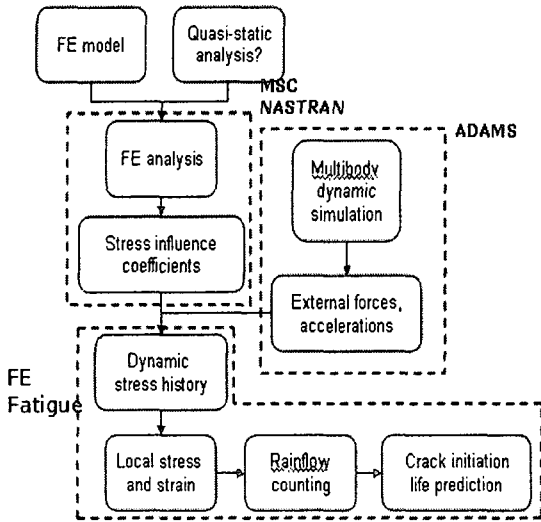


Fig. 3 Analysis flow chart

실제로 자동차 부품의 유한요소 모델로 피로 해석을 하기 위해서는 먼저 유한 요소 해석이 필요하다. 해석 방법은 크게 준정적 해석(정적해석 포함)과 동적 해석이 있다. 고유진동수가 높은 부품에 대해서는 이전 시간의 가진이 이후의 변형에 큰 영향을 주지 않으므로 동적 해석을 정적 해석으로 고려한 준정적 해석으로 풀 수 있다. 준정적 해석 시 중요하게 고려할 사항은 작용하는 하중과 모멘트가 정적 평형을 이루고 있는가를 평가하는 것이다. 만약 정적 평형을 이루지 못한다면 가속도가 생기게 되며 이 경우 반드시 inertia relief 를 고려한 준정적 해석을 해야한다. 본 논문에서는 고유진동수가 높은 자동차 부품인 lower control arm 에 대해 준정적 해석을 수행하였다. 이 해석은 상용프로그램인 MSC Nastran 의 101 해석(준정적 해석)을 사용하였다.

동적 효과를 무시할 수 없는 경우, 즉 외부에서 작용하는 하중 이력의 반복 주파수가 구조물의 가장 낮은 고유진동수와 비슷한 경우에는 동적 해석을 해야 한다. 일반적으로 구조물의 가장 낮은 고유진동수가 외력의 진동수에 비해 대략 10 배 정도 클 경우 준정적 해석 시 허용오차 범위 안이라 알려져 있다.

본 논문에서는 동적 반응을 고유 모드의 선형 결합으로 표현하는 모드 합성 방법으로 동적 해석을 수행하였다. 즉, 피로 해석을 위해 필요한 응력

이나 변형률에 대한 이력을 효과적으로 얻어내기 위해 고유 모드의 응력을 구하고 이를 선형 결합하여 구조물의 응력에 대한 이력을 구하였다. 이 해석은 상용프로그램인 MSC Nastran 의 112 해석(모드합성법)과 103 해석(고유진동수 해석)을 사용하였다. 여기서 112 해석은 하중 이력을 구하기 위한 해석이다.

위에서 언급한 방법에 따라 유한요소 해석을 하여 응력 영향 계수(stress influence coefficient)를 구할 수 있다.

하중 이력은 Belgian 하중 이력을 사용하였다. 자동차 바퀴에 작용하는 하중 이력을 다물체 동역학 시뮬레이션(multi-body dynamics simulation)을 이용하여 해석하고자 하는 부품의 하중이력으로 바꾸었다. 다물체 동역학 시뮬레이션은 상용프로그램인 ADAMS 로 수행하였다.

그런 다음 앞서 구한 응력 영향 계수와 부품의 하중이력을 이용하여 국부 응력과 변형률을 계산하고 Rain flow counting 기법을 이용하여 피로 해석을 수행하였다. 이때 구하는 피로 수명은 균열(crack)이 시작되는 수명이다. 피로 해석은 상용프로그램인 n-Soft FE Fatigue 를 사용하였다.

3.2 재료 데이터의 입력

2.4 절에서 설명한 실험계획법을 적용하기 위해서는 하나의 설계변수 당 3 개의 수준과 가중치를 각각 구해야 한다. 이를 구하기 위해서는 설계변수에 대한 1 차에서 4 차까지의 중심모멘트를 구해야 한다. 중심모멘트는 설계변수의 분포 특성에 따라 다른데, 본 연구에서 사용한 설계변수의 분포는 정규분포와 대수정규분포이다. 정규 분포와 대수 정규 분포에 대한 확률 밀도 함수 및 1 차에서 4 차까지의 중심모멘트는 다음과 같다.⁶

정규 분포의 확률밀도 함수는 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (9)$$

정규 분포의 1 차에서 4 차까지 중심 모멘트는 식(10)로 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \mu &= \mu \\
 \sigma^2 &= \sigma^2 \\
 \sqrt{\beta_1} &= 0 \\
 \beta_2 &= 3
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

대수 정규분포의 확률밀도 함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\hat{\sigma}x\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\hat{\sigma}^2}(\log x - \hat{\mu})^2\right], \quad x \geq 0
 \tag{11}$$

대수 정규분포의 1 차에서 4 차까지의 중심모멘트는 식(12)로 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \mu &= e^{\hat{\mu}} w^{1/2} \\
 \sigma^2 &= e^{2\hat{\mu}} w(w-1) \\
 \sqrt{\beta_1} &= (w-1)^{1/2}(w+2) \\
 \beta_2 &= w^4 + 2w^3 + 3w^2 - 3 \\
 w &= e^{\hat{\sigma}^2}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

이렇게 구한 확률변수 1 차에서 4 차까지의 중심모멘트를 이용하여 3 개의 수준과 가중치를 계산하고 2.4 절에서 설명한 대로 3 절점 구적법을 이용하여 한계함수의 1 차에서 4 차까지의 모멘트를 구한다. 그런 다음 피어슨 시스템의 Type 을 결정하고 전체 시스템(또는 한계함수)의 확률밀도 함수 및 분포 함수를 구한다.

자동차에 주로 쓰이는 기본적인 재료와 물성치들은 참고문헌⁷을 참조하였다. 본 논문의 해석 대상이 되는 자동차의 Lower Control Arm 과 Rear Torsion Bar 등에는 SPCC, SPCD 등의 냉간 압연 강판 재료가 주로 사용된다.

3.3 Lower Control Arm (LCA)

자동차의 lower control arm 은 차의 전방 하단부에 장착되어 있다. Cross member 및 knuckle 등과 조립되어 주행 중 발생하는 진동을 흡수하고, wheel alignment 에 영향을 주는 부품이다. LCA 의 유한요소 모델은 Fig. 4 에 나타나 있다.

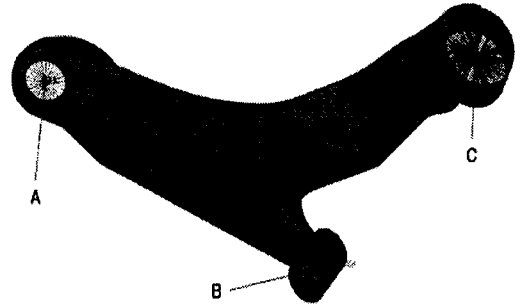


Fig. 4 FE model of LCA

이 모델에서 피로 해석을 수행하기 위한 하중 이력은 A 부분에 가해지는 3 개의 볼 조인트 하중과 부쉬 부분인 B 와 C 부분에 가해지는 각각 3 개의 하중과 3 개의 모멘트로 총 15 개의 하중 이력이 작용된다. 이때 B 와 C 부분에서의 반력과 모멘트에 대한 이력은 다물체 동역학 해석을 통해 얻어낸다.

LCA 는 가장 낮은 고유진동수가 700Hz 이상으로 외력의 반복 주파수에 비해 상당히 높기 때문에 준정적 해석으로도 충분히 정확한 피로 해석 결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 이 모델에 대해 inertia relief 해석을 수행하여 피로 해석 결과를 얻었다.

이 때 피로 강도 계수 σ_f , 피로강도 지수 b, 피로 연성 계수 ϵ_f , 피로 연성 지수 c 를 모두 확률 변수라고 두고 피로 수명의 분포를 계산하였다. 각 변수에 대한 분포 특성과 1 차에서 4 차까지의 중심 모멘트 값은 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

Table 1 Distribution of Provability variables

| | 분포 | 평균 | 변동계수 |
|--------------|--------|---------|------|
| σ_f | 대수정규분포 | 683 MPa | 0.05 |
| b | 정규분포 | -0.127 | 0.01 |
| ϵ_f | 대수정규분포 | 0.799 | 0.05 |
| c | 정규분포 | -0.597 | 0.01 |

Table 2 1st to 4th moment of fatigue material variables of LCA

| μ_g | σ_g | $\sqrt{\beta_{g1}}$ | β_{g2} |
|-----------|------------|---------------------|--------------|
| 5503.3248 | 96783.09 | 1.864958 | 4.630423 |

위 값들을 이용하여 Fig. 2 에서의 피어슨 타입을 결정하면 Type I 이 된다. 피어슨 시스템을 이용하여 구한 확률밀도함수와 추출법으로 구한 값을 비교하여 그래프로 나타낸 것은 Fig. 5 와 같다.

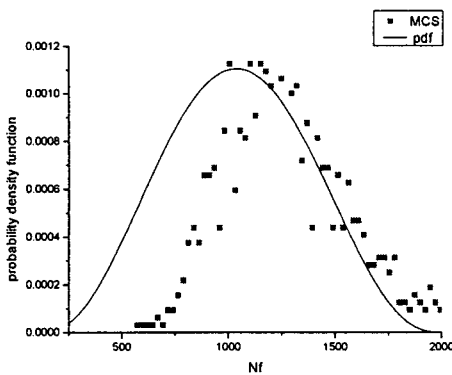


Fig. 5 Probability function of LCA

위 결과는 가로축이 수명이고 세로축이 확률밀도 함수를 나타낸다. 즉, 이 결과 하나로 반복계산이 필요 없이 임의의 원하는 수명에서의 신뢰도(확률밀도)가 얼마 인지를 알 수 있다. 선으로 나타난 부분이 피어슨 시스템으로 구한 확률밀도 함수이고, 점으로 나타난 부분은 몬테카를로 시뮬레이션의 결과이다. 실험계획법으로 구한 확률밀도 함수와 몬테카를로 시뮬레이션의 결과가 수명이 낮은 부분에서 약간 차이가 나지만 실제로 관심을 가지고 있는 고주기 수명에서는 오차 10%범위내의 분포를 가진다.

3.4 Rear Torsion Bar (RTB)

Rear Torsion Bar(RTB)는 차량 후단 부에 장착되어 타이어에서 받는 제동력과 횡력을 지지하고, 자체의 비틀림 강성으로 코너링시 차량의 롤각을

조정하는 부품이다. RTB 의 유한요소 모델은 Fig. 6 에 나타내었다.

이 모델의 좌우에 각각 4 곳씩 대칭으로 총 8 곳에 하중이 작용된다. A 는 차체와 연결되는 부분이고, B 는 스프링에 의해 힘을 받는 부분, C 는 댐퍼에 의해 힘을 받는 부분, 그리고 D 는 휠에 의해 힘이 가해지는 부분으로 각각 3 개의 힘과 3 개의 모멘트가 가해지므로 총 48 개의 하중이력이 가해지게 된다.

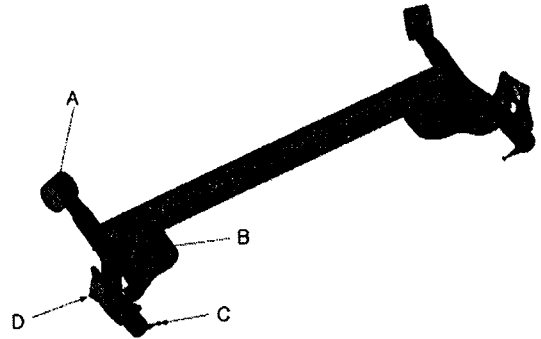


Fig. 6 FE model of RTB

RTB 모델은 가장 낮은 고유진동수가 27Hz 정도로 낮기 때문에 하중의 반복주파수와 비슷한 크기가 된다. 그러므로 공진에 의해 동적 효과를 무시할 수 없게 되기 때문에, RTB 에 대한 적절한 피로 해석을 수행하기 위해서는 반드시 동적 해석에 기반을 두어야 한다. 동적 해석을 수행하기 위해 본 논문에서는 모드 합성법(modal superposition)을 사용하였다.

RTB 모델도 LCA 와 같은 피로재료 물성치를 확률변수로 하였다. 이 경우의 1 차에서 4 차까지의 모멘트는 Table 3 과 같다.

Table 3 1st to 4th moment of fatigue material variables of RTB

| μ_g | σ_g | $\sqrt{\beta_{g1}}$ | β_{g2} |
|---------|------------|---------------------|--------------|
| 3.68359 | 0.100229 | 0.000456159 | 3.0000 |

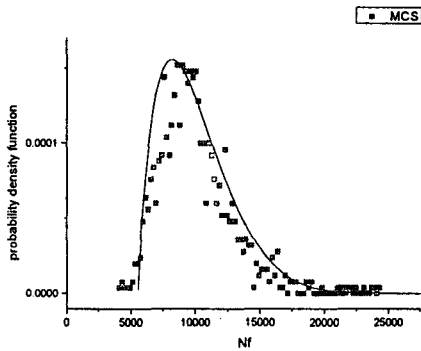


Fig. 7 Probability function of RTB

이 경우도 마찬가지로 피어슨 Type I 분포이며, 실험계획법으로 구한 확률밀도 함수와 몬테카를로 시뮬레이션을 비교한 결과는 Fig. 7 과 같다.

피어슨 시스템으로 구한 확률밀도 함수가 몬테카를로 시뮬레이션과 전 구간에서 오차범위 10%내로 거의 일치함을 확인 할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

기존의 피로 신뢰도 해석 연구는 주로 응력 변형률 수명 접근법을 위주로 진행되었다. 그러나 이 접근법은 소성 변형을 무시할 수 있는 경우에만 적용 가능하다. 본 논문에서는 소성 변형과 탄성 변형을 모두 고려하는 변형률 수명 접근법은 기반으로 확률 변형률 수명 선도를 구성하고, 신뢰도를 구하는 방법을 연구하였다.

피로 재료 물성치인 피로 강도 계수 σ_f , 피로 강도 지수 b , 피로 연성 계수 ϵ_f , 피로 연성 지수 c 의 4 개를 확률변수로 한 경우 모두 피어슨 시스템을 이용한 실험계획법의 결과와 몬테카를로 시뮬레이션의 결과가 오차범위 10% 내로 유사한 결과를 보였다. 그리고 모든 경우 분포는 피어슨 Type I 분포를 가졌다.

이를 근거로 하여 수명 접근법에 기초하여 피로 신뢰도를 구할 때 본 논문에서 제안한 방법인 피어슨 시스템을 이용한 실험계획법으로 자동차 부품의 신뢰도를 계산하는데 매우 유리하다는 결론을 내릴 수 있다. 이 방법은 기존의 신뢰도를 계산하는 방법에 비해 매우 간단하며, 목표 수명이

바뀔 때마다 새로 계산할 필요가 없다. 또한 일계 신뢰도 방법이 모든 분포를 정규분포로 근사 하는데 이 방법은 가중치와 수준을 조정함으로써 비정규분포도 고려할 수 있다. 앞으로는 신뢰도를 구하는 데서 더 확장하여 두께나 길이 등의 부품 모델링 과정에서의 공차를 고려하여 피로 신뢰도의 민감도를 구하여 피로 신뢰도 최적화 연구를 할 필요가 있다.

참고문헌

1. Sobczyk, K. and Spencer Jr, B. F., "Random Fatigue: From Data to Theory," Academic Press, 1992.
2. Yang, Y. S., Suh, Y. S. and Lee, J. O., "구조 신뢰성 공학," 서울대학교출판부, 1999.
3. Nakazawa, H. and Kodama, S., "Statistical S-N testing method with 14 specimens: JSME standard method for determination of S-N curves," Statistical Research on Fatigue and Fracture, Elsevier applied science publishers LTD., pp.59~69, 1987.
4. Yu, X., Choi, K. K. and Chang, K. H., "Reliability and Durability Based Sensitivity Analysis and Optimization," Technical Report R97-01, College of engineering the University of Iowa City, 1997.
5. Seo, H. S., "A study on development of improved tolerance analysis and synthesis system using design of experiment," Dept. of Mech. Eng., KAIST(Korea Advanced Institute of Science & Technology), Ph.D dissertation, 2002.
6. Choi, H. S. and Kwak, B. M., "Moment based reliability analysis for general distributions using multi-level," Dept. of Mech. Eng., KAIST(Korea Advanced Institute of Science & Technology), master dissertation, 2005.
7. Lee, J. G., "MSC. Fatigue V.8.0 의 보유 재질명과 KS, JIS 재질명과의 대체 비교," 한국엠에스씨, 1999.