

피로 자료 분산을 고려한 자동차 부품의 신뢰도 해석

남기원*(한국항공우주연구원 구조그룹), 이병채(한국항공우주연구원 기계공학과)

Evaluation of chassis component reliability considering variation of fatigue data

G. W. Nam(Structure & Materials Dept., KARI), B. C. Lee(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

In this paper, probabilistic distribution of fatigue life of chassis component is determined statistically by applying the design of experiments and the Pearson system. To construct $p-\varepsilon-N$ curve, the case that fatigue data are random variables is attempted. Probabilistic density function(p.d.f) for fatigue life is obtained by design of experiment and using this p.d.f fatigue reliability about any aimed fatigue life can be calculated. Lower control arm and rear torsion bar of chassis component 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 are performed using commercial software MSC Nastran and fatigue analysis are performed using FE Fatigue. When strain-life curve itself is random variable, probability density function of fatigue life has very little difference from log-normal distribution. And the case 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 : fatigue reliability(피로 신뢰도), design of experiment(실험 계획법), Pearson system(피어슨 시스템), Monte Carlo simulation(몬테카를로 시뮬레이션)

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 등에서 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 소성

변형을 무시할 수 있는 경우에만 적용 가능하다.

다른 방법으로 변형률-수명 접근 방법에서 피로 수명은 탄성과 소성 변형을 모두 고려한 전체 변형율의 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 정

규 분포를 따른다고 가정하고 있으며, 이는 철에 대한 피로 수명 시험결과에서 검증되었다. 분산의 크기에 따라 정확한 구조물의 신뢰도 평가가 반드시 요구되기도 한다.

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) ϕ , 피로 강도 계수(fatigue strength coefficient) σ_f , 피로 연성 계수(fatigue durability coefficient) ε_f 와 탄성계수 등으로 두었다. 확률 변형률 선도($p-\varepsilon-N$)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.

$$\Delta\varepsilon_f/2 = \Delta\varepsilon_e/2 + \Delta\varepsilon_p/2 = \sigma_f/E(2N_f)^{1/b} + \varepsilon_f'(2N_f) \quad (2.1.1)$$

위 식에 의한 피로 수명과 전체 변형률 사이의 수명 관계는 Fig. 1에 나타나 있다. 일정한 진폭을 가지는 주기적 하중 하에서는 식(2.1.1)에서 주어진 일정 변형률 진폭, $\Delta\varepsilon_f/2$ 와 재료 상수만으로 피로수명을 구할 수 있다. 식(2.1.1)는 좀 더 일반적인 하중에서도 사용할 수 있다. 재료 파라미터는 평활시편의 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

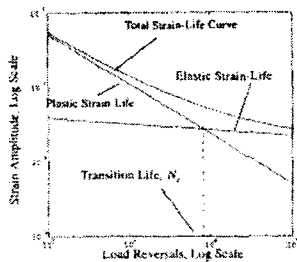


Fig. 1 Elastic strain, plastic strain, and total strain life curve

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.

$$P_f = P\{N_f(X) \leq n\} = \int \dots \int_{N_f(X) \leq n} f_X(X) dX \quad (2.2.1)$$

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

2.2.1 몬테카를로 시뮬레이션

이 방법은 구조물의 파괴에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 결합 확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작은 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 표본 집단(set)을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수의 값을 차례로 한계상태식에 대입하여 그 값이 0보다 큰지 작은지, 즉 구조물이 안전한지 파괴되는지를 판단한다. 그 결과로 모두 N 개의 확률변수 표본 집단을 추출하였을 때, 한계상태식이 0보다 작은 경우가 n_f 번 관측되었다면 파괴확률 P_f 는 다음과 같이 근사적으로 추정할 수 있다[2].

$$P_f \cong n_f/N \quad (2.2.2)$$

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.

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

현재 가지고 있는 자료의 정보를 이용하여 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 1차에서 4차까지의 통계적 모멘트만으로 적용이 가능하고 가장 정확성이 뛰어난 것으로 평가받고 있는 피어슨 시스템을 이용하고 있다[9].

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

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{(\bar{x} - a_0)f}{b_0 + b_1\bar{x} + b_2\bar{x}^2} \quad (2.2.3)$$

여기서, $\bar{x} = x - \mu$ 이고, $\mu, \sigma, \sqrt{\beta_1}, \beta_2$ 는 각각 x 의 평균, 표준편차, 왜도, 첨도이며, $a_0 = b_1 = -\sigma\sqrt{\beta_1}(\beta_2 + 3)/A$, $b_0 = -\sigma^2(4\beta_2 - 3\beta_1)/A$, $b_2 = -(2\beta_2 - 3\beta_1 - 6)/A$, $A = 10\beta_2 - 18 - 12\beta_1$ 이다. 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. 3에 도시되어 있다.

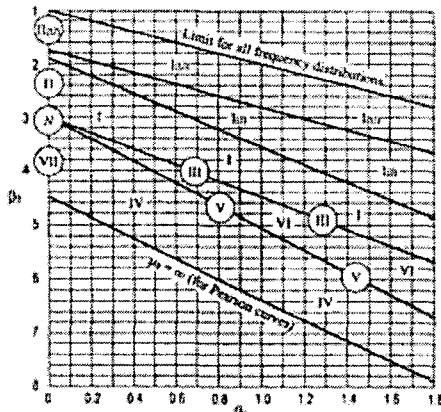


Fig. 2 A chart relating the type of Pearson frequency curve to the values of β_1 and β_2

3. 자동차 부품의 수치해석

2.1 Lower Control Arm (LCA)

자동차의 Lower Control Arm은 차의 FRONT 하단부에 장착되어 있다. CROSS MEMBER 및 KNUCKLE

등과 조립되어 주행중 발생하는 진동을 흡수하고, WHEEL ALIGNMENT에 영향을 주는 부품이다.

LCA는 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.

피어슨 시스템을 이용하여 구한 확률밀도함수와 추출법으로 구한 값을 그래프로 나타낸 것은 다음과 같다.

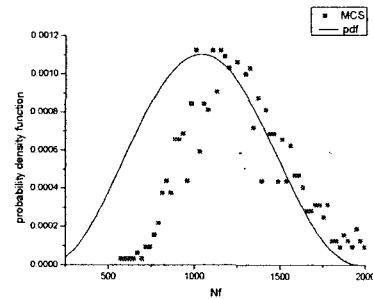


Fig. 3 Probability function of LCA

실험계획법으로 구한 확률밀도 함수와 몬테카를로 시뮬레이션의 결과가 수명이 낮은 부분에서 약간 차이가 나지만 실제로 관심을 가지고 있는 고주기 수명에서는 비슷한 분포를 가진다.

2.1 Rear Torsion Bar (RTB)

Rear Torsion Bar(RTB)는 차량 후단부에 장착되어 타이어에서 받는 제동력과 횡력을 지지하고, 자체의 비틀림강성으로 코너링시 차량의 롤각을 조정하는 부품이다.

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

LCA와 마찬가지로 방법으로 구한 확률밀도 함수와 추출법으로 구한 값을 그래프로 나타낸 것은 다음과 같다.

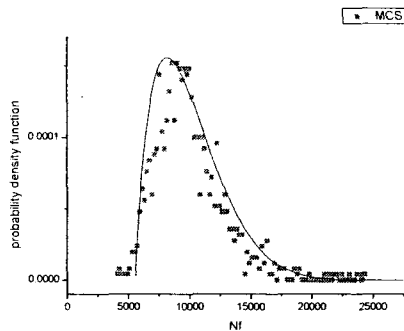


Fig. 4 Probability function of RTB

실험계획법으로 구한 확률밀도 함수와 몬테카를로 시뮬레이션의 분포가 유사함을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

피로 재료 물성치 4 개를 확률변수로 한 경우 모두 피어슨 시스템을 이용한 실험계획법의 결과와 몬테카를로 시뮬레이션의 결과가 잘 맞았다. 그리고 모든 경우 분포는 베타 분포를 가졌다.

이로 미루어 보아 변형률 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 일계신뢰도 방법이 모든 분포를 정규분포로 근사하는데 반해 이 방법은 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. K. Sobczyk and B.F. Spencer, Jr, *Random Fatigue: From Data to Theory*. Academic Press, San Diego, California(1992).
2. 양영순, 서용석, 이재옥, *구조 신뢰성 공학*. 서울대학교출판부(1999).
3. H. Nakazawa and S. Kodama, 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. X. Yu, K. K. Choi, K. H. Chang. "Reliability and Durability Based Sensitivity Analysis and Optimization", Technical Report R97-01, College of engineering the University of Iwoa City.(1997).
5. 서현석, 실험계획법을 이용한 공차 해석 방법 개선과 합성 시스템 개발에 관한 연구? 한국과학기술원 기계공학과 박사학위 논문(2002).