

스프링 최적설계를 위한 피로수명 파라미터의 역 추정

Inverse Estimation of Fatigue Life Parameters for Spring Design Optimization

김 완 범* · 안 다 운** · 최 주 호***

Kim, Wan-Beom · An, Dawn · Choi, Joo-Ho

요 약

구조요소의 설계에서 유한요소해석은 매우 효과적인 방법이다. 이 방법은 시험 수행에 드는 시간과 비용을 줄여준다. 그러나 공정 과정과 환경에 의하여 생기는 입력 물성치들의 변화 때문에 우리는 유한요소해석의 결과를 전적으로 믿어서는 안 된다. 따라서 유한요소해석의 신뢰성을 증명하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 현장에 축적된 피로 수명 시험 데이터를 바탕으로 유한요소해석을 이용하여 피로수명 파라미터를 역 추정 하는 연구를 수행하였다. 베이지안 접근법을 이용하여 불확실성 피로 수명 파라미터의 사후분포를 구하였고, 마코프체인몬테카를로(Markov Chain Monte Carlo) 기법을 이용하여 역 추정된 파라미터의 샘플 데이터를 생성하였다. 얻어진 샘플 데이터를 기반으로 새로운 형상의 스프링에 대한 피로 수명을 예측한다. 신뢰성 기반 형상 최적화(RBDO)는 서스펜션 코일 스프링의 요구수명을 만족시키기 위하여 수행된다. 또한 크리킹 근사 모델은 유한요소해석의 연산 량 감소를 위해 이용한다.

keywords : 피로 수명 파라미터, 역 추정, 베이지안 접근법, Markov Chain Monte Carlo, 최적화, 크리킹

1. 서 론

반복적인 하중에 의한 피로 파괴 현상은 기계 분야에서 오랫동안 관측되어 왔다. 이를 방지하기 위해 현재 산업 현장에서는 시제품의 피로수명 시험을 필수적으로 진행하고 있다. 하지만 이러한 시험에는 많은 시간과 비용이 발생할 뿐만 아니라 목표했던 수명을 만족하지 못할 경우 설계 변경을 통해 재시험을 해야 하는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해 유한요소해석을 이용하여 피로 수명을 예측하는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 피로수명 파라미터가 불확실 하여 수명 예측 결과의 신뢰성이 낮다는 문제점이 있다. 따라서 신뢰할 수 있는 유한요소해석 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 축적되어있는 현장 제품의 피로 시험 데이터를 바탕으로 유한요소해석을 이용하여 피로수명 파라미터를 역 추정하였다. 피로수명 파라미터는 확정 값이 아닌 확률적 특성을 가지므로 이를 고려하기 위해 최근 많은 연구가 진행되고 있는 베이지안 접근법을 이용하여 분포로써 나타내었고, 이를 이용하여 피로 수명 또한 확률적인 분포로 예측하였다. 앞서 구한 피로수명 파라미터를 바탕으로 요구조건에 부합하는

* 학생회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 석사과정 kwbl80@naver.com

** 학생회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 박사과정 skal@nate.com

*** 정회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수 jhchoi@kau.ac.kr

스프링 형상 최적설계를 진행한다. 유한요소 해석의 연산 량 감소를 위해 크리깅 근사 모델을 이용한다.

2. 유한요소해석의 검증

본 연구에서는 스프링의 피로시험을 유한요소 해석하기 위해 상용 프로그램인 ANSYS 를 사용하였다. 유한요소해석 결과의 정확성 검증을 위해 실제 스프링의 압축 변위에 따른 하중을 측정하였고, 이를 해석결과와 비교하였다. 유한요소해석에서 압축변위에 따른 하중은 탄성계수에 영향을 받기 때문에 임의로 선정한 스프링에 대하여 탄성계수 변화에 따른 결과를 그림1 에 나타내었다. 비교 결과 탄성계수가 207GPa 일 때 시험 결과와 가장 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 이 때의 시험 결과는 반복 시험의 평균값을 이용하였다.

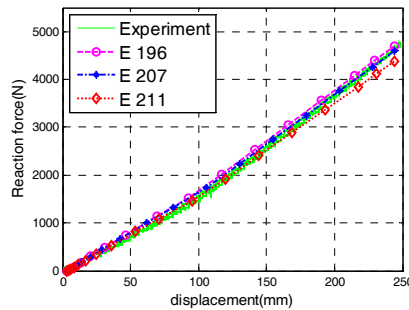


그림 1 여러 가지 탄성계수 조건에서 압축변위에 따른 반력

3. 피로 물성 파라미터 역 추정을 위한 베이지안 접근법

3.1. 응력-수명 관계

고 주기 피로에서 재료의 대표적 피로-수명 관계식은 다음과 같다.

$$S_f = aN^b \quad (1)$$

여기서 N 은 피로 수명(cycles), S_f 는 피로강도(MPa), a 와 b 는 피로 수명 파라미터이다.

그리고 위의 식은 Goodman 피로 식을 활용하기 위해 다음과 같이 수정된다.

$$S_f = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (2)$$

유한요소 해석을 통해 구할 수 있는 σ_a 및 σ_m 은 각각 교번 및 평균응력(MPa)이고, S_{ut} 는 재료의 극한강도(MPa)를 의미한다. 본 연구에서는 식(1)의 두 피로 수명 파라미터와 함께 극한강도를 재료 물성을 나타내는 불확실성 파라미터로 다루고 이들의 확률분포를 역 추정하는 방법을 제시한다.

3.2. 베이지안 접근법

피로 물성의 불확실성 파라미터를 역 추정하기 위한 방법으로 베이지안 접근법을 이용할 수 있고, 이는 다음과 같은 베이지 정리를 기본 이론으로 한다.

$$f(\theta|y) \propto f(y|\theta)f(\theta) \quad (3)$$

θ 는 추정하고자 하는 불확실성 파라미터, y 는 측정된 데이터로 스프링 피로 시험 결과 구해진 수명이며, $f(\theta|y)$ 는 y 의 사후분포이다.

4. 피로 수명 파라미터의 역 추정

불확실성 피로 수명 파라미터를 역 추정하기 위해 실제 현장에서 수행된 피로 수명 시험 데이터를 이용하였다. 실제 데이터는 베이지안 접근법을 이용하여 불확실성을 갖는 피로 수명 예측에 유용하게 사용될 수 있고, 만약 향후 더 많은 데이터가 얻어 진다면 신뢰성 높은 피로수명의 예측이 가능하다. 불확실성 피로 수명 파라미터 a, b 와 극한강도 S_{ut} 및 표준편차 σ , 총 4개의 파라미터에 대해 MCMC 시뮬레이션을 이용하여 그림2 에 나타내었다. 6 개의 피로수명 데이터를 이용한 Case 1 의 결과보다 9 개의 피로 수명 데이터를 이용한 Case 2 의 결과에서 사후분포의 산포가 더 작게 나타났다. 이것을 통해서 더 많은 데이터를 이용함에 따라 불확실성이 줄어들어 신뢰도가 증가한다는 것을 확인 할 수 있다.

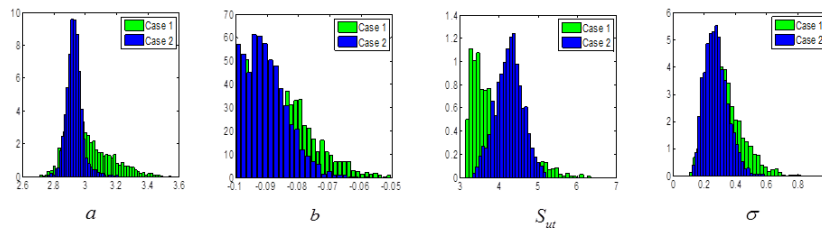


그림 2 피로 수명 계수의 사후 분포

이 값을 이용하여 피로 수명을 계산하여 히스토그램으로 나타낸 결과를 그림3 에 나타내었다. 또한 실제 수명 데이터를 점으로 표시하여 예측된 수명 분포가 실제 수명 시험 데이터를 포함하고 있는지를 확인하여 피로수명 파라미터의 신뢰성을 입증하였다.

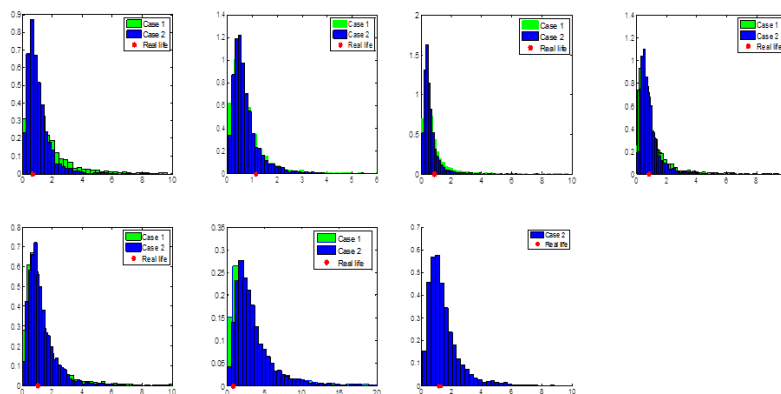


그림 3 피로 수명의 사후 분포 예측

5. 형상 최적 설계

최적화의 설계 변수는 d (와이어 직경), D (코일 직경) 로 두고, k (스프링 상수)와 N (수명)을 제한 조건으로 두었으며 V (부피)를 최소화 하는 것을 목적으로 하였다. 스프링 형상의 최적설계 연산량의 감소를 위해 크리깅 근사 모델을 사용하였다. 피로수명 데이터는 제작업체의 보안상의 문제로 정확한 정보가 공개될 수 없기에 임의의 값으로 나타내었다. 최적화 결과 목표로 했던 수명과 스프링 상수 값의 하한 값을 만족시켰으며, 부피는 초기모델보다 5.81% 감소하였다. 부피의 감소는 무게의 감소라고 볼 수 있으며, 이것은 생산 비용의 절감을 가져 올 수 있다.

표1 최적화 결과

	Initial Model	Optimum Model
$d(mm)$	11.6	10.9362
$D(mm)$	140	139.876
$N(cycles)$	6.78	6.33
$k(N/mm)$	1.19	0.95
$V(mml)$	1.8362e4	1.7296e4

6. 결론

본 연구에서는 스프링을 대상으로 해당 제조업체에서 축적한 제품 피로시험 데이터를 바탕으로 유한요소해석을 이용하여 파라미터를 역 추정하였다. 피로수명 파라미터는 확정 값이 아니므로 베이저안 접근법을 이용하여 분포로 나타내었고, 역 추정된 파라미터를 이용하여 피로 수명 또한 확률적인 분포로 예측하였다. 이 분포 내에 실제 피로 시험 수명 데이터가 포함됨을 확인하여 신뢰성을 입증하였다. 또한 앞서 추정한 파라미터를 이용하여 최적화를 수행하였다. 최적화 결과 목표로 했던 수명과 스프링 상수를 만족시키면서 부피가 5.81% 감소하는 형상을 찾을 수 있었다. 스프링의 부피 감소라는 결과는 생산 비용의 감소를 가져올 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. 2009-0081438)

참고문헌

- Gunawan, S. Papalambros, P.Y. (2006) A Bayesian Approach to Riliability-Based Optimization With Incomplete Information. *Journal of Mechanical Design*, 128, pp.909~918.
- 안다운 (2009) 베이저안 접근법을 이용한 입력변수 및 근사모델 불확실성 하에서의 신뢰성 분석, 대한기계학회 논문집, 33(A), pp.1163~1170.
- Andrieu, C. (2003) An Introduction to MCMC for Machine Learning, *Machine Learning*, 50, pp.5~43.
- Gelman, A. (2004) *Bayesian Data Analysis*, CHAPMAN & HALL/CRC Inc, New York.