

변동하중 하에서의 불확실성 기반 균열성장 예측

Uncertainty based crack growth prediction under variable amplitude loads

임 상 혁* · 안 다 운** · 최 주 호***

Leem, Sang Hyuck · An, Dawn · Choi, Joo-Ho

요 약

본 논문에서는 변동하중 하에서의 균열 성장 예측을 위하여 손상 모델과 주어진 데이터에 기반하여 균열 성장 모델의 변수를 확률분포로 추정한다. 이를 위해 베이지안 접근법을 활용하여 불확실 변수 결합 확률 분포식을 구축하고, Markov Chain Monte Carlo(MCMC)을 통해서 균열 성장 모델의 변수 샘플을 추출하였다. 여기서 추출된 샘플들을 균열 성장 모델에 적용, 균열 성장의 결과를 확률적인 분포로 예측하였다. 위와 같은 추정은 재료의 물성과 같은 변동성이 있는 변수를 모델에 적용하여, 결과값을 확률적인 분포로 예측하였다. 이것은 기존의 안전계수 개념보다 더욱 적절한 안전 기준을 제시 할 수 있다.

keywords : 변동하중, 균열 성장 예측, 베이지안,

1. 서 론

항공기는 운용 특성상 동체의 무게가 가벼워야 한다. 따라서 설계 단계에서 이미 항공기는 항상 동체 구조물에 결함을 가지는 설계를 하여야 한다. 따라서 항공기 운용을 위해서는 정기적인 검사 및 정비가 필요하다. 특히 균열 크기에 대한 안전 기준이 매우 높아서 실제로는 상당한 수명이 남아 있는 부품도 작은 균열의 발생으로도 교체하여야 하는 경우가 발생한다. 이 과정에서 많은 비용이 발생한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 균열성장예측을 통해서 현재 적용되는 균열 기준을 보다 현실적인 균열 기준으로 변경하여, 불필요한 부품교체를 감소시키므로 항공기 유지비용을 절감 할 수 있다.

본 논문에서는 실제 항공기의 부품이 받는 하중의 기본이 되는 변동 진폭 하중에서의 균열 모델의 확률적인 수명예측을 얻어, 보다 경제적인 균열 기준을 제시하는데 도움을 주고자 한다.

확률적인 수명예측을 위해서는 MCMC을 이용하여, 실험데이터로 균열모델의 각 변수에 대한 샘플을 추출한다. 이 추출된 샘플은 각 변수들의 각 시편에 대한 변동성을 나타내는데, 이를 이용하여 균열 성장 모델의 확률적인 수명 분포를 예측하였다. 이 확률적인 수명 분포를 분석하여 기존 안전계수 개념보다 경제적인 안전 기준을 제시 하여, 항공기 운용상 비용 절감효과를 기대 할 수 있다.

* 정회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 석사과정 sanghuyck@naver.com

** 정회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 박사과정 skal34@nate.com

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

2. 균열 성장 모델

대부분의 균열 성장 모델은 일정 진폭 하중 실험으로 얻어진 균열 성장 속도(da/dN)와 피로 확대 계수 범위(ΔK)의 관계식을 이용한다. 더욱 나아가 많은 모델들이 변동 진폭 하중하의 균열 성장을 예측하기 위해서 연구되어왔다. Elber가 균열의 닫힘 현상을 고려한 모델을 제안하였고, 이어서 Wheeler가 균열 선단 부분의 plastic zone을 고려한 모델을 제안하였다. 본 논문에서는 Huang Xiaoping이 제안한 균열 성장 모델을 이용하고자 한다.

Huang Xiaoping이 제안한 모델의 변수들은 다음과 같이 구성되어 있다. 일정 진폭 하중의 중요한 특성 변수 중 하나인 R (stress ratio)의 영향을 고려한 M_R (correction factor for the loading ratio), 변동 진폭 하중의 중요한 특성인 과도하중에 의한 균열 성장 지연을 고려한 M_P (correction factor for the loading sequence interaction)을 균열 성장 모델에 추가적으로 적용하여 변동 진폭 하중하의 균열 성장을 예측하였다. Huang Xiaoping이 제안한 모델은 다음의 식(1),식(2)으로 정의 된다.(Xiaoping 등 2007)

$$\frac{da}{dN} = C[(\Delta K_{eq0})^m - (\Delta K_{th0})^m] \quad (1)$$

$$\Delta K_{eq0} = M_R M_P \Delta K \quad (2)$$

여기서 C, m 은 균열 성장 속도(da/dN)와 피로 확대 계수 범위(ΔK)의 관계에서 나오는 피팅 계수이고, ΔK_{th0} 는 threshold 구간을 나타내는 변수이다. 다음의 식은 R 의 영향을 고려한 M_R 의 관계식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} M_R &= (1-R)^{-\beta_1} \quad (-5 \leq R < 0) \\ &= (1-R)^\beta \quad (0 \leq R < 0.5) \\ &= (1.05 - 1.4R + 0.6R^2)^{-\beta} \quad (0.5 \leq R < 1) \end{aligned} \quad (3)$$

R 에 따라서 균열 성장의 형태는 그림1에서처럼 균열 성장 속도와 피로 확대 계수 범위의 관계가 한 곡선으로 표현이 되지 않는 것을 알 수 있다. M_R 의 x축 scale조정을 통해서 그림2에서처럼 한 곡선으로 관계식이 하나의 곡선으로 나타내어진다.

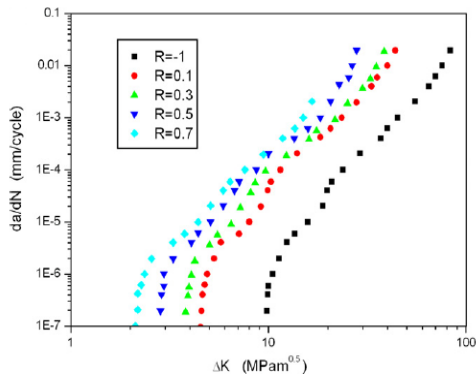


그림 1 균열 성장 속도와 피로 확대 계수 범위의 관계 그래프

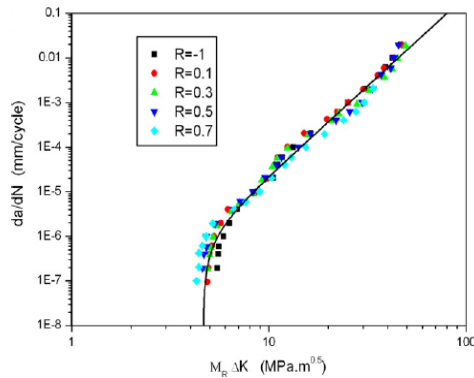


그림 2 M_R 의 x축 scale조정 후 그래프

다음의 식은 M_P 의 관계식을 정의한다.

$$\begin{aligned} M_P &= \left(\frac{r_y}{aOL + rOL - a} \right)^n \quad (a + r_y < aOL + rOL) \\ &= 1 \quad (a + r_y \geq aOL + rOL) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 표현된 변수 a, r_y 는 현재 하중에 의한 균열 크기와 plastic zone size이다. a_{OL}, r_{OL} 는 overload에 의한 균열 크기와 plastic zone size이다. n 은 실험데이터 피팅 계수로서, 7075-T6에 대한 값은 $n=0.3$ 이다.(Xiaoping 등 2007)

3. 변수 추정

변수 추정의 과정은 다음과 같다. 변수 추정에 기본이 되는 베이지 정리식인 식(5)을 바탕으로 사후분포 (Posterior)를 얻는다. 여기에서 사후분포는 결합분포함수로서 MCMC기법에 이용되어 균열 성장모델에 사용되어 각 변수의 확률적 분포를 추출한다. 그림3이 각 변수의 확률적인 분포를 추출한 결과를 나타내는 히스토그램이다.

베이지 정리식과 우도 함수식은 다음 식(5),식(6)으로 정의 된다.

$$Posterior(C, m, \beta_1, \beta, \Delta K_{th0}, \sigma | data) \propto Likelihood \cdot Prior(C, m, \beta_1, \beta, \Delta K_{th0}) \quad (5)$$

$$Likelihood = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^k \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^k (da/dN_{시행} - da/dN_{예측})^2 \right] \quad (6) \text{여기에서 사전분포}$$

(Prior)는 그 변수에 대한 사전 정보가 있을 때 반영하는 분포로서, 변수에 대한 사전 정보가 없는 경우에는 균일 분포로 가정한다. 우도 함수(Likelihood)는 정규분포의 우도 함수(Likelihood)이고, K 는 시험데이터의 개수이고, σ 는 정규분포의 표준 편차 변수이다. 그리고 $da/dN_{시행}, da/dN_{예측}$ 는 각각 시험, 균열 성장 모델에서 얻어진 균열 성장 속도이다.

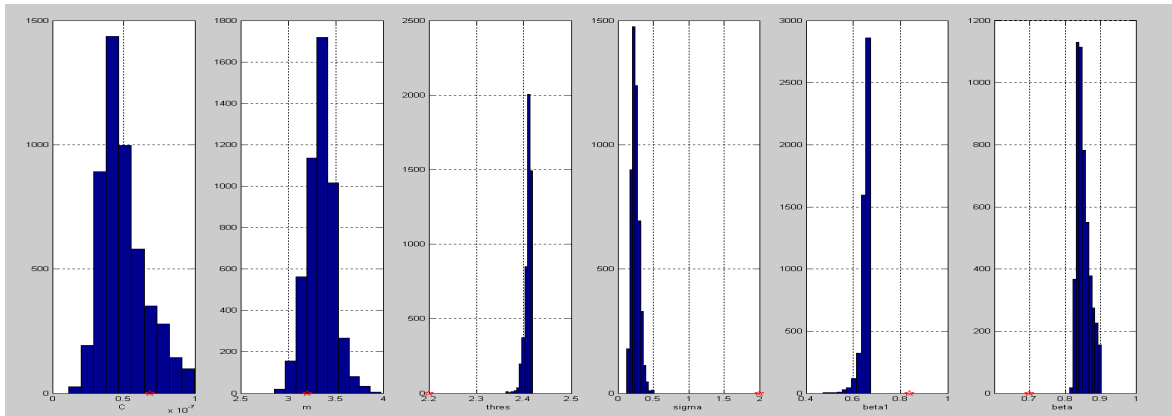


그림 3 각 변수의 확률적 분포 히스토그램-왼쪽으로부터 $C, m, \Delta K_{th0}, \sigma, \beta_1, \beta$ 순임.

4. 잔존유효수명예측

잔존 유효 수명은 균열 성장 모델에서의 균열 크기가 파괴역학의 critical 균열 사이즈까지 성장하는데 걸리는 반복 하중의 횟수로 정의하였다.

아래의 그림(4)는 추출된 변수 샘플을 바탕으로 초기 균열 크기에 대한 잔존유효수명의 B10수명을 계산한 결과이다. 예측된 B10수명은 시험결과보다 짧은 수명을 예측하고 있다. 이것은 신뢰성 예측에서 중요한 점인데, 안전한 수명 예측은 항상 여러 변동성에 의해서 발생한 가장 최악

의 수명을 예측하는 것이다. 따라서 예측된 수명은 시험결과의 수명들보다 짧은 수명을 나타내야 안정적인 예측이라고 할 수 있다.

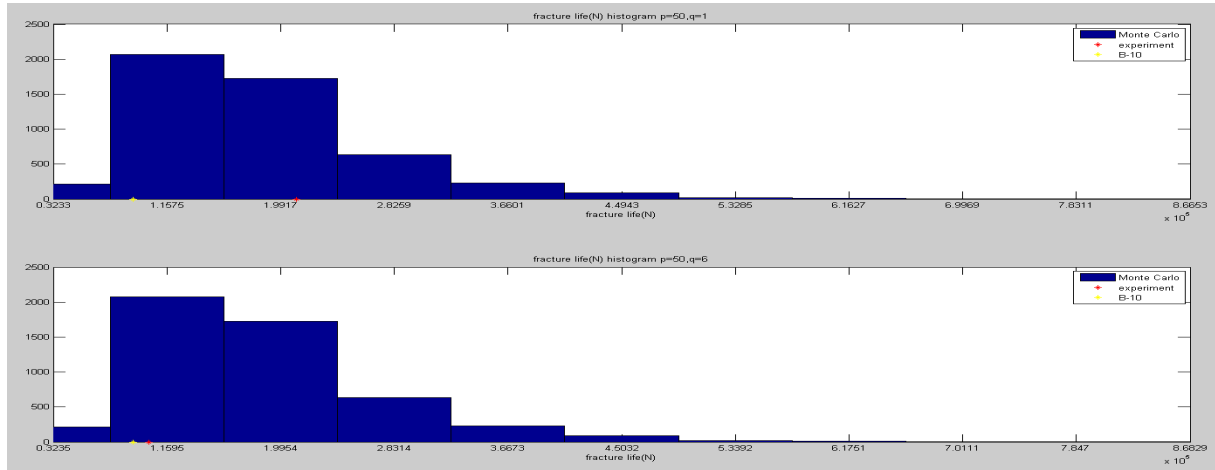


그림 4 B10수명 예측 결과-(파란색 막대:예측수명 히스토그램,붉은색:시험결과,노란색:B10수명)

5. 결론

균열 성장 예측은 경제적인 안전 기준을 제시하여 항공기 유지비용을 절감 할 것이다. 항공기뿐만 아니라 원자력발전소, 교량과 같은 여러 주요 시설물에 대해서도 적용이 가능 할 것이다.

변수 분포 추정에서 시험데이터 수가 1세트로 한정 되어 있어서, 재료에 대한 변동성을 많이 반영하지 못한 것으로 보인다. 보다 정확한 변동성 추정을 위해서는 보다 많은 시험데이터를 사용하여 각 변수들의 변동성을 보다 잘 반영하여야 할 것이다.

현재 균열성장모델의 대부분은 균열 성장 속도와 피로 확대 계수 범위의 관계식이다. 이 모델들은 복잡한 하중 형태에서 균열 성장 지연, 균열 성장 가속과 같은 여러 현상들을 표현하기에는 아직 부족하다. 따라서 균열 성장의 핵심 부분인 균열 팁 부분의 응력 분포와 균열의 성장 원리에 대해서 보다 근본적인 연구가 필요 할 것으로 보인다.

감사의 글

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

참고문헌

Huang Xiaoping,(2007) An engineering model of fatigue crack growth under variable amplitude loading, *International Journal of Fatigue*, 30, 2-10