

파괴확률 산정을 위한 검측 데이터의 확률적 업데이트

Updating Inspection Data to Estimate Probability of Failure

정태영* · 박흥민** · 이학*** · 공정식****

Chung, Tae-Young · Park, Heung-Min · Lee, Hak · Kong, Jung-Sik

ABSTRACT

According to most studies, assessment of aging structure is trend to detect flaw size by sensor than using existing subjective evaluation by expert for objective evaluation. But Uncertainties existing in the sensor make difference between measured flaw size and actual flaw size. In this paper, Probability of Detection(POD) have been used to quantify the uncertainties and POD is updated by relationship measured flaw size and actual flaw size (Heasler, 1990). also we proposed probabilistic updating approach method to improve measurement accuracy(the difference of measured PDF and actual PDF) by using updated POD.

Keywords:POD, NDI, Inspection, Update PDF, Update Reliability, Bayesian, Probability of failure

1. 서론

최근 들어 구조물의 상태등급 평가시 객관적인 평가를 위해 전문가의 주관적 평가에 의존하기 보다는 구조물에 센서를 설치하고 결함 정도를 측정하여 평가하는 것이 추세이다. 하지만 아직 국내에는 검측 장치로부터 얻어진 구조물의 결함에 대한 데이터를 이용하여 구조물의 정확한 상태등급 산정과 유지보수 시나리오의 구상 대한 연구가 미흡하다. 이러한 센서를 장치한 구조물은 결함 데이터를 바탕으로 신뢰성 지수를 정확하게 산정하고, 이로부터 얻어지는 성능저하곡선을 이용하여 향후 발생할 검측 및 유지보수시기의 정확한 예측 모델의 개발과 적용이 필요하다.

결함을 측정하는 센서에는 불확실성이 존재하기 때문에 측정된 결함 데이터는 실제 결함 데이터와 다른 값을 가진다. 또한 해석적인 방법이나 검측 과정에서도 불확실성이 존재하기 때문에 해석적인 방법에 의한 예측과 검측 데이터들이 가지는 불확실성의 정량화를 통하여 구조물의 신뢰성을 산정하고 다음번의 검측 및 유지보수 시기를 정하는 것은 이전의 많은 연구들을 통해서 논의되어 왔다.

본 연구에서는 검측장치로부터 얻어진 측정 데이터의 불확실성을 배제하기 위하여 NDI(Nondestructive Inspection, 비파괴검사) technique 중 구조물에 발생하는 결함사이즈의 Detectability 정도를 알 수 있는 POD(Probability of Detection)을 활용하였고, 실제 결함 사이즈와 측정 결함 사이즈 사이의 관계식(Heasler, 1990)을 이용하여 POD를 업데이트 하는 방법을 제안하였다. 또한 업데이트 된 POD를 이용하여 측정된 데

* 학생회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 Email: zook@korea.ac.kr

** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 Email: whcool@korea.ac.kr

*** 학생회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 Email: dlgr@korea.ac.kr

**** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 Email: jskong@korea.ac.kr

이터의 PDF(Probability Density Function)를 실제 데이터 PDF에 근사하도록 업데이트 하는 확률적인 접근 방법을 제안하였다.

2. 제안식을 이용한 POD(Probability of Detection) Updating

비파괴검사는 구조물의 노후도 검사 시에 필수적인 검사방법이다. 그러나 측정장치 자체에 불확정성이 존재하기 때문에 비파괴검사 시 신뢰성 평가가 반드시 필요하다. 불확정성의 정량화에 쓰이는 기술로는 다음과 같은 방법들이 있다 ; POD(Probability of Detection), 결함규모측정의 정확성, FCP(False Call Probability)

POD는 구조물에 발생한 실제 결함규모를 찾아낼 수 있는 확률로써 NDI에서 POD 곡선은 다수의 시편에 실제 존재하는 다양한 결함 사이즈를 찾아내는 실험을 통하여 얻어질 수 있다. 일반적으로 POD는 결함 사이즈가 증가함에 따라 증가하는 그림 1과 같은 양상을 보인다.

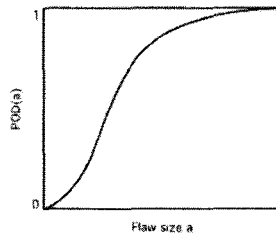


그림 1. POD 곡선의 일반적인 형태

POD는 결함 검출 장치를 이용하여 얻어진 데이터를 바탕으로 산정된다. 하지만 측정된 데이터가 그 자체로서 불확실성을 내포하고 있기 때문에 POD를 실제 결함 데이터에 근사하도록 업데이트 해줘야 정확한 데이터로서 역할을 수행할 수 있게 된다.

결함규모측정의 정확성은 실제와 측정된 결함규모의 차이에 따라 결정된다. 측정된 결함규모를 실제 결함규모에 근사하도록 보정해주는 제안식(Healser, 1990)을 이용하여 측정된 결함 데이터의 결과로부터 얻어진 POD를 update 해준다. 비파괴검사서 센서 의해서 측정된 결함 규모는 실제의 결함 규모와 차이가 발생하고 측정값의 오차의 발생 양상은 systematic하거나 random하고, systematic과 random의 조합으로 나타난다. 측정 규모와 실제 규모 사이에는 식 (1)과 같은 관계식이 있다.(Jiao, 1989)

$$A = b_0 + b_1 A_m + \epsilon' \quad (1)$$

A 는 실제 결함규모, A_m 는 측정된 결함규모, b_0 와 b_1 은 regression(회귀)상수이고 ϵ' 은 평균 0인 값을 가지는 잔여오차이다. Healser(1990)는 실제 결함규모 데이터를 가지고 여러 차례의 실험을 통하여 회귀분석으로 측정된 결함규모 데이터를 얻어냈고, 실제 결함규모와 측정된 결함규모 사이에 식 (2)과 같은 관계식을 제안했다.

$$A_m = \beta_0 + \beta_1 A + \epsilon \quad (2)$$

ϵ 은 일반적으로 표준편차 σ_m 을 가지는 정규분포로 가정한다. 표준편차 σ_m 는 비파괴검사 기계에 따라서

결정되고, σ_m 가 작을수록 정확하게 결함사이즈를 측정하는 기계이다. 가장 이상적인 상태는 비파괴검사 시스템이 $\beta_0=0, \beta_1=1, \sigma_m=0$ 인 값을 가질 때이다. 식 (2)을 이용한 NDI의 POD 모델은 식 (4)와 같고, 식 (4)를 이용하여 POD를 업데이트 해줄 수 있다. 업데이트 된 POD 곡선은 그림 2와 같다.

$$POD(a) = P(A_m > 0 | A = a) \quad (3)$$

$$POD(a) = \Phi\left(\frac{\beta_0 + \beta_1 a}{\sigma_c}\right) \quad (4)$$

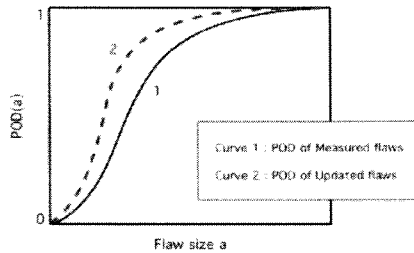


그림 2. update 된 POD 곡선

3. 결함빈도 PDF(Probability Density Function) Updating

구조물에 설치한 센서로부터 얻은 결함 데이터들은 불확실성을 가지고 있기 때문에 실제 결함 데이터와 근사한 값을 구하기 위해서는 이를 보정해 줄 필요가 있다. 센서 데이터의 불확실성 때문에 구조물의 결함 사이즈에 대한 PDF(Probability Density Function, 확률밀도함수)는 실제로 존재하는 결함 사이즈의 PDF와 다른 양상을 보이게 되는데, 비파괴검사로부터 측정된 결함 사이즈의 POD를 이용하여 측정된 구조물의 PDF를 업데이트해 줌으로써 실제 결함 데이터에 근사하고 신뢰도 높은 데이터를 얻어낼 수 있다.

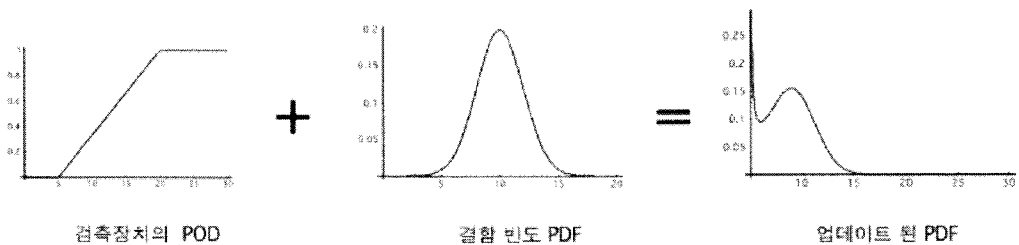


그림3. POD를 이용한 PDF update

앞에서 언급했듯이, POD 곡선은 결함 사이즈가 작으면 POD는 작은 값을 갖게 되고 결함 사이즈가 커질수록 POD는 큰 값을 갖게 된다. 즉 사이즈가 작은 결함들에 대해서는 비파괴검사의 센서가 결함들을 검출하지 못할 확률이 높다는 것을 나타내고, 이것은 측정된 결함 사이즈들의 PDF가 실제의 결함 사이즈들에 대한 PDF와 다르다는 것을 나타낸다. 사이즈가 큰 결함들에 대해서는 POD값이 1에 가까기 때문에 실제 결함 빈도와 거의 일치하는 값을 나타내지만 사이즈가 작은 결함들의 경우는 검출을 못하는 구간도 존재할 수

있기 때문에 실제 결함 빈도와는 많은 차이가 있다.

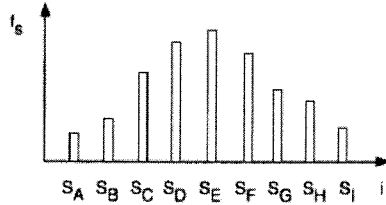


그림 4. 측정된 사이즈에 대한 PMF(Probability Mass Function)

측정된 결함 사이즈에 대한 PDF의 특정 사이즈 S_i 에서 결함 빈도는 센서의 POD를 이용하여 PDF를 업데이트 해줄 수 있다. 본 연구에서 특정사이즈 S_i 에서 결함의 빈도를 업데이트 해주기 위해서 연속함수인 PDF 대신 불연속함수인 PMF를 적용하여 정식화하였다. 업데이트 된 결함 빈도 N'_i 와 전체 결함 빈도 $\Sigma N'$ 은 식 (5)과 같이 표현된다.

$$N'_1 = F_{S_1} \cdot \frac{1}{\text{PoD}(S_1)}, N'_2 = F_{S_2} \cdot \frac{1}{\text{PoD}(S_2)}, \dots, \sum N' = \sum \frac{N_i}{N_T} \frac{1}{\text{PoD}(S_i)}, F_{S_i} = \frac{N_i}{N_T} \quad (5)$$

식 (5)에서 N'_i 는 측정된 결함 빈도, N_T 는 측정된 결함 전체 빈도를 나타낸다. 따라서 POD를 이용하여 새롭게 얻어지는 P'_{S_i} 는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$P'_{S_i} = \frac{N'_i}{N_T} = \left(\frac{N_i}{\text{PoD}(S_i)} \right) \left/ \left(\frac{\sum_{j=1}^{\infty} N_j \prod_{j=1}^{\infty} \text{PoD}(S_j)}{\prod_{j=1}^{\infty} \text{PoD}(S_j)} \right) \right. \quad (6)$$

따라서 업데이트 된 데이터에서 결함 사이즈가 S_i 일 확률 P'_{S_i} 는 업데이트 된 결함 규모에 대한 CDF(Cumulative Distributive Function) F'_{S_i} 와 같으므로, F'_{S_i} 는 식 (7)과 같이 표현된다. 그리고 불연속함수 F'_{S_i} 를 미분하여 연속함수 f'_{S_i} 로 나타내면 식 (8)와 같다. 식 (8)에서 알 수 있듯이 센서로 측정된 결함 규모의 PDF를 업데이트 된 결함 규모에 대한 POD로 나눠주면 업데이트 된 결함 규모 빈도에 대한 PDF를 얻을 수 있다.

$$F'_{S_i} = \frac{N'_{S_i}}{N_T} = \frac{\frac{N_{S_i}}{\text{PoD}(S_i)}}{\sum_{j=1}^1 N'_{S_j}} = \frac{\frac{N_{S_i}}{\text{PoD}(S_i)}}{\sum_{j=1}^1 \frac{N_{S_j}}{\text{PoD}(S_j)}} \quad (7)$$

$$f'_{S_i} = \frac{\frac{f_{S_i}}{\text{PoD}(S_i)}}{\int \frac{f_S}{\text{PoD}(S)} ds} \quad (8)$$

4. 파괴확률 산정

NDI 장치의 불확실성 때문에 NDI 장치의 검측 데이터는 결함이 검측되지 않은 경우, 결함이 검측되고 결함 규모에 대한 정보가 있는 경우의 두가지 가능성이 존재한다. 일반적으로 파괴확률을 고려할 때는 검측 결함 규모와 구조물의 critical 결함 규모로 식 (9)과 같은 한계상태함수를 구성하게 된다.

$$g(Z) = a_c - a_n \leq 0 \quad (9)$$

식 (9)에서 a_c 는 critical 결함 사이즈이고, a_n 는 n번째 검측에서 얻어진 결함 사이즈이다.

하지만 위와 같은 장치가 가지고 있는 불확실성 때문에 생기는 세가지 가능성을 모두 고려하기 위해선 식 (10)과 같은 조건을 한계상태함수에 적용시켜야 한다.

$$\bar{D}: \text{결함이 검측되지 않은 경우} \quad a_n - a_d < 0 \quad (10a)$$

$$D: \text{결함이 검측된 경우} \quad a_n - a_d > 0 \quad (10b)$$

식 (10)에서 a_d 는 NDI 장치가 검측 가능한 최소의 결함 사이즈이다. 식 (10)를 적용한 파괴확률은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다. 결함을 검측하지 못한 경우에 대한 파괴확률 $P(a_c - a_n \leq 0 | \bar{D})$ 는 NDI 장치의 정밀도가 낮은 경우 문제가 되지만 정밀도가 어느 수준 이상이 되면 결함 검측에 대한 신뢰도가 높아지고 이에 따른 파괴확률의 저감으로 무시될 수 있다.

$$P_f = P(a_c - a_n \leq 0 | \bar{D}) + P(a_c - a_n \leq 0 | D) \quad (11)$$

본 연구에서는 개발된 방법의 적용을 위해 구조물의 여러 모델 중 가장 간단한 적용 예로 파이프라인을 사용하였다. 파이프라인의 전체에 대한 파괴확률을 구하기 위해선 파이프라인을 그림 5와 같이 단위 요소로 나누어 주고 Series 시스템에 대한 파괴모드를 가정하여 파괴확률을 구하는 방법을 사용하였다.

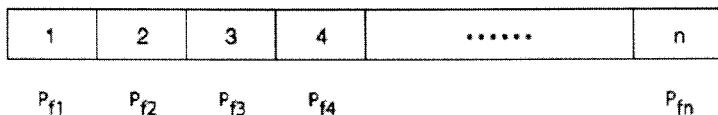


그림 5. 파이프라인 단위 요소의 파괴확률

균일한 하중특성을 갖는 series 시스템의 파괴모드는 각 단위 요소의 파괴 이벤트를 E_i 라 정하고 각 단위

$$E_{system} = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cdots \cup E_n \quad (12)$$

$$P_f(E_{system}) = 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - P_f(E_i)\} \quad (13)$$

요소의 파괴가 독립적이라 가정할 수 있다면 식 (12)과 같이 정의 될 수 있고, 파괴확률은 식 (13)와 같다.

5. 결론

본 연구에서는 NDI 장치가 가지고 있는 불확실성을 배제하기 위하여 실제 결함 사이즈와 측정된 결함 사이즈 사이의 관계식을 이용하여 POD를 업데이트 해주고, 업데이트 된 POD를 이용하여 결함 빈도에 대한 PDF를 업데이트 해주는 방법을 제안하였다. 그리고 실제 구조물이 가지는 결함에 대한 업데이트 된 정보를 바탕으로 구조물의 파괴확률을 구하는 방법론을 제안하였다.

본 연구에서 제안된 방법은 더 정확한 구조물의 신뢰도 지수를 산정할 수 있고 업데이트 된 데이터들로부터 얻어지는 구조물의 열화곡선을 이용하여 향후 발생 할 검측 및 유지보수의 시기를 정확히 예측할 수 있는 모델링 개발의 기초가 된다. 이런 모델링 개발에는 제안식을 이용한 해석적 방법과 검측 과정에서의 불확실성을 고려하여 Bayesian 이론을 이용하는 두 방법으로부터 구해진 구조물의 성능열화곡선의 업데이트도 포함되어야 할 것이다. 본 연구에서 제안된 방법을 이용하면 Bayesian 이론을 이용한 업데이트 된 성능열화곡선의 신뢰도를 향상시켜 줄 것으로 예상된다.

하지만 본 연구에서 제안된 이론을 실제 구조물에 적용하기 위해서는 실제로 사용되는 센서들의 특징과 각 구조물의 안전성에 직접적인 영향을 미치는 인자들을 고려하여야 하므로 적용하려는 구조물에 대한 세부적인 모델 개발의 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2006년 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터 및 2006년 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구”(KRF-2006-331-D00564) 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- Ruoxue Zhang** (2001) Fatigue Reliability Analysis Using Nondestructive Inspection, *Journal of Structural Engineering*, August 2001, pp.957~965.
- George Deodatis** (1996) Reliability of Aircraft Structures Under Non-Period Inspection : A Bayesian Approach, *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 53 No.5, pp.789~805.
- Daniel Straub** (2006) Computational Aspects of Risk-Based Inspection Planning, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 21, pp.179~192
- Ruohua Zheng** (1998) Role of non-destructive evaluation in time-dependent reliability analysis, *Structural Safety* 20, pp.325~339.
- M.Toyoda-Makino** (1999) Cost-Based optimal history-dependent inspection strategy for random fatigue crack growth, *Probabilistic Engineering Mechanics* 14, pp.339~347.