

유지관리 정보 기반 다단계 최적화 기법을 적용한 피로균열 관리

갈백설¹ · 김선용^{2*}

¹박사과정, 원광대학교, 토목환경공학과, ²조교수, 원광대학교, 토목환경공학과

Fatigue Crack Optimum Management Using Multi-Step Optimization Integrating Inspection Information

Ge, Baixue¹, Kim, Sunyong^{2*}

¹Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Wonkwon University, Iksan, 54538, Korea

²Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Wonkwon University, Iksan, 54538, Korea

Abstract - This paper proposes a multi-step probabilistic optimum inspection scheduling based on Bayesian model updating. The first-step optimization based on maximizing the probability of detection a crack before failure is performed to obtain the first inspection time. The information from the first optimum inspection is used to update the initial information for the crack propagation parameters. The updating process is based on Bayesian theorem with Markov chain Monte Carlo simulation. The updated posterior distribution is used to determine the next optimum inspection time through the second-step optimization. The proposed approach is illustrated on a steel ship side shell detail subjected to fatigue.

Keywords - Multi-step optimization, inspection, Bayesian, Markov chain Monte Carlo simulation, fatigue, maintenance

1. 서론

최근 노후시설물의 증가와 안전진단의 수요증대로 보다 효율적인 구조물 관리가 필요한 실정이다. 강재의 연결부에 주로 발생하는 피로균열은 발생 시점과 성장의 예측에 있어서 불확실성이 크며, 발생한 균열은 구조물의 갑작스러운 붕괴를 유발할 수 있어, 유지관리에 더욱 많은 관심과 노력을 기울일 필요가 있다^{[1],[2],[3]}. 피로균열을 지속적이고 안정적으로 관리하기 위해서는 많은 시간과 경비가 소요되므로 보다 효율적인 피로균열 유지관리 계획 수립이 필요하다. 지금까지 강구조물의 피로균열을 기반으로 하는 잔존 수명예측 기법^[4], 확률론적 위험도기반의 유지관리 기법^[5] 및 생애주기비용에 근거한 유지관리 기법^[6] 등이 개발

되었으나, 이는 주로 최초 유지관리계획 수립을 목적으로 한다. 하지만, 유지관리를 위한 점검 수행으로 생성되는 정보를 바탕으로 지속적인 업데이트 및 최적화 기법의 효율적 적용을 고려한 피로균열 유지관리를 위한 연구는 현재로서 제한적이라 볼 수 있다.

본 논문에서는 피로균열 유지관리의 효율성과 신뢰성 향상을 위해 최적화 기법을 단계별로 적용한다. 최적화과정은 두 가지로 나뉘는데, 첫 번째 최적화 과정에서는 기존의 가용한 데이터를 활용하여 피로균열의 성장을 예측하며, 구조물의 파괴에 이르기 전 피로균열이 감지될 확률이 최대가 되는 시점에 균열의 상태를 점검하게 된다. 여기서, 측정된 피로균열의 크기는 기존의 균열크기 예측에 필요한 확률변수 업데이트에 사용되는데, 이를 위해 Markov chain Monte Carlo 시뮬레이션 기반 Bayesian 업데이트 기법을 적용한다. 업데이트된 피로균열 모델의 확률변수를 기반으로 균열의 성장을 예측하고, 두 번째 점검시기를 결정하는 최적화 과정에 적용된다. 이때 최적화 과정의 목적함수는 피로균열의 크기가 유지보수를 위한 크기에 도달할 때 점검을 수행하는데 있어서 시간적 지연을 최소화하는 데 있다. 결과적으로, 점검 과정에서 생성되는 정보를 이용하여 균열성장 예측을 업데이트하여 보다 실용적이고 신뢰성 있는 피로균열 관리를 기대할 수 있

Note.-Discussion open until April 30, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 06, 2018; revised August 27, 2018; approved on August 31, 2018.
Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-63-850-6716 Fax. +82-63-850-6666

E-mail. sunyongkim@wku.ac.kr

다. 본 연구에서 제시된 방법은 선박구조물의 측면부재의 피로현상에 적용한다.

2. 다단계 최적화 기법을 적용한 유지관리

본 연구에서 적용하는 다단계 최적화 기법은 단계별로 목적함수를 다르게 적용한 최적화 과정을 의미하며, 관련된 상세 과정을 Fig. 1.에 도식화 하였다. 확률론적 피로균열성장예측에 대한 예측을 기반으로 첫 번째 최적화 과정을 수행한다. 여기서 적용되는 목적함수는 피로균열 발견 확률의 최대화이며, 이를 통해 첫 번째 균열 점검 시기를 결정하게 된다. 이때 피로균열이 발견되지 않거나, 발견되었더라도 피로균열의 크기가 유지보수를 위한 크기만큼 성장되지 않을 경우, 다음 점검시기를 결정해야 한다. 첫 번째 점검결과에서 얻을 수 있는 정보를 활용하여 피로균열성장예측에 대한 업데이트를 수행하며, 이를 통해 두 번째 최적화과정을 거치게 된다. 두 번째 최적화과정의 목적함수는 균열의 크기가 유지보수

를 위한 크기에 도달할 시기에 점검을 수행하는데 있어서 시간적 지연을 최소화하는데 있다.

2.1 피로균열의 성장 예측

피로균열의 성장을 평가하기 위해 하중조건, 최초균열의 크기, 재료적, 기하학적 특성을 고려한 Paris-Erdogan 법칙을 적용한다. 따라서, 특정 균열의 크기에 해당하는 하중의 누적반복횟수 N_a 를 다음과 같이 표현할 수 있다^{[7],[8]}.

$$N_a = \frac{1}{C S_r^m} \int_{a_i}^{a_N} \frac{1}{(Y(a) \sqrt{\pi a})^m} da \quad (1)$$

여기서, C 와 m 은 재료상수, S_r 은 응력범위, $Y(a)$ 는 형상함수, a_i 는 최초균열크기, 그리고 a_N 는 하중의 누적반복횟수 N_a 에 해당하는 균열크기를 의미한다. 또한, 연간 하중반복횟수를 N_{an} 로 가정할 경우, 피로균열 크기 a_N 에 도달할 시간(years)을 다음과 같이 계산할 수 있다^[9].

$$t = \frac{1}{N_{an} C S_r^m} \int_{a_i}^{a_N} \frac{1}{(Y(a) \sqrt{\pi a})^m} da \quad (2)$$

2.2 피로균열의 크기와 발견확률

피로균열의 점검에 따른 발견확률은 균열의 크기와 점검방법에 따라 로그-로지스틱(log-logistic), 변형된 지수(shifted exponential)와 누적로그(cumulative log) 분포함수들로 표현할 수 있으며, 본 연구에서는 다음의 누적로그 분포함수를 적용한다^{[10],[11]}.

$$P_{\in sp} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(a) - \alpha}{\beta}\right) \quad (3)$$

여기서, Φ 는 표준정규분포의 누적분포함수이며, α 와 β 는 각각 위치와 크기를 나타내는 계수이다. $N_{\in sp}$ 번의 점검에 따른 구조물의 사용수명 내 균열발견확률 P_{life} 은 다음과 같이 계산할 수 있다^[11].

$$P_{life} = \sum_{i=1}^{N_{\in sp}} \left[\prod_{j=1}^i \left\{ P(t_{\in sp,j} \leq t_{life}) \right\} P_{\in sp,i} \right] \quad (4)$$

여기서, $P(t_{\in sp,j} \leq t_{life})$ 는 j 번째 점검시기 $t_{\in sp,j}$ 가 구조물의 사용수명 t_{life} 이내 일 확률을 의미한다. t_{life} 는 식 (1)과 (2)를 사용하여 계산하게 되는데 두 식에 사용된 변수를 확률변수로

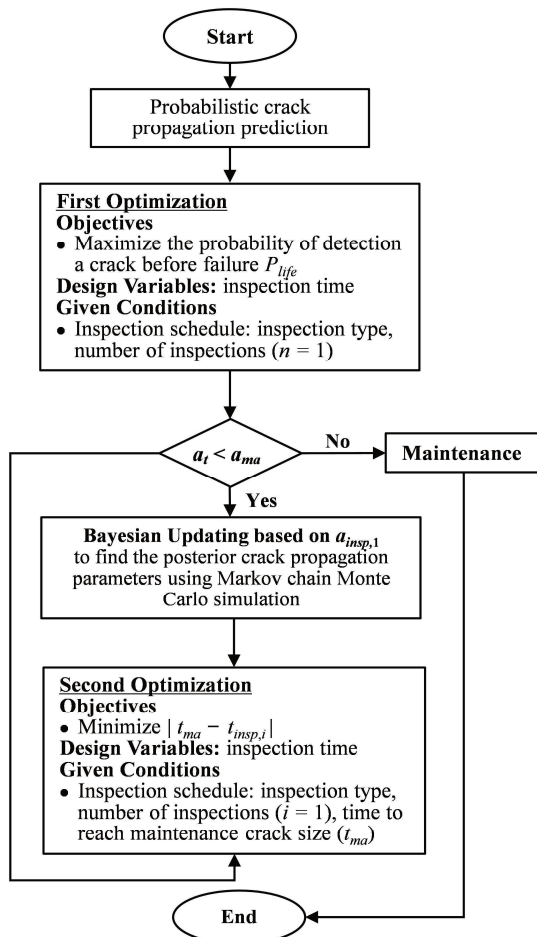


Fig. 1. Flowchart of multi-step optimization for inspection planning

가정하게 되면, t_{life} 의 확률분포를 구할 수 있으며 이를 통해 $P(t_{\in sp,j} \leq t_{life})$ 를 계산한다.

2.3 Bayesian 이론을 이용한 업데이트

Bayesian 이론은 최초의 확률론적 정보를 추가적인 정보에 의해 업데이트 하는데 적용할 수 있다. 본 연구에서는 피로균열

점검에 의해 측정된 균열의 크기를 이용하여 균열성장 예측에 필요한 확률 변수(즉, 식 (1)과 (2)의 S_r , a_i , a_N , N_a 등)를 업데이트 하는데, 여기서 다음과 같이 Bayesian 이론을 적용하게 된다.

$$f_X(x|a_{\in sp}) = c P_X(x) L(a_{\in sp}|x) \quad (5)$$

여기서, $f_X(x|a_{\in sp})$ 는 피로균열 점검에 의해 측정된 균열 크기가 $a_{\in sp}$ 일 경우 업데이트된 변수 X의 사후 분포함수이며, c는 정규화 상수, $P_X(x)$ 는 변수 X의 사전 확률분포함수이다. $L(a_{\in sp}|x)$ 는 정규분포함수의 형태로 다음과 같이 가정한다^[11].

$$L(a_{\in sp}|x) = \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\{a_{\in sp} - a(x)\}^2}{\sigma_e^2} \right] \quad (6)$$

식 (6)에서 σ_e 는 실제값과의 오차에 대한 표준편차를 나타내며, 본 연구에서는 0.1로 가정한다. 또한, $a(x)$ 는 피로균열에 대한 모델식으로 확률변수 X에 대한 특정시간에서의 균열크기를 나타낸다.

2.4 Markov chain Monte Carlo 샘플링

측정된 균열크기를 이용하여 균열성장 예측에 필요한 확률변수의 업데이트된 분포함수 $f_X(x|a_{\in sp})$ 를 계산하기 위해서는 식 (6)의 $L(a_{\in sp}|x)$ 함수에서 $a(x)$ 를 구해야하는데 이때, Markov Chain Monte Carlo (MCMC)을 적용한다. 본 연구에서는 MCMC의 대표적인 형태인 Metropolis-Hasting 알고리즘을 적용하는데 이는 Fig. 2.에서 제시된 과정을 따르며, 여기서 제안함수(proposal function) $q(x^*|x_i)$ 는 평균값 0을 갖는 정규 분포함수이며, 사전 승인 확률(prior acceptance probability) $\alpha_p(x_i, x^*)$, 가능 승인 확률(likelihood acceptance probability) $\alpha_L(x_i, x^*)$ 은 다음과 같이 정의한다^{[12],[13],[14],[15]}.

$$\alpha_p(x_i, x^*) = \min \left\{ 1, \frac{P_X(x^*)}{P_X(x_i)} \right\} \quad (7a)$$

$$\alpha_L(x_i, x^*) = \min \left\{ 1, \frac{L_X(a_{\in sp}|x^*)}{L_X(a_{\in sp}|x_i)} \right\} \quad (7b)$$

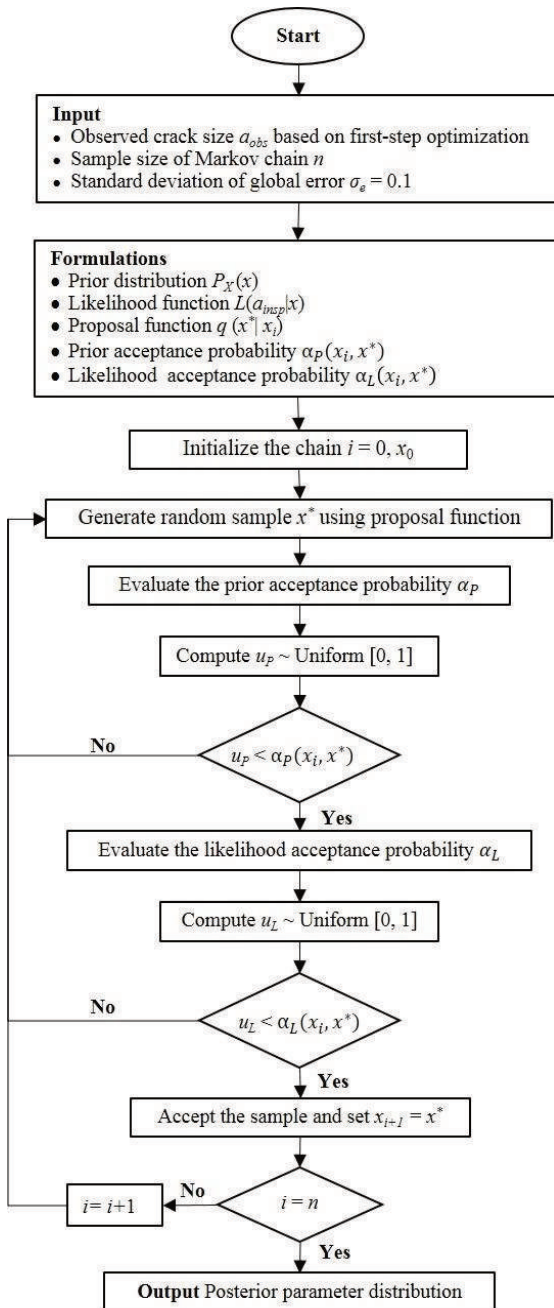


Fig. 2. Flowchart of Markov chain Monte Carlo simulation using Cascaded Metropolis Algorithm

3. 피로균열 최적관리 적용

제시된 균열점검 결과인 균열 크기를 이용한 피로균열 다단계 최적관리 기법은 피로현상을 가지는 강구조물을 대상으로 하며, 본 논문에서는 선박구조물의 피로현상에 적용한다. Fig. 3.에서는 일반적인 선박구조물 중앙단면 측면 외판플레이트의 횡방향 프레임과 축방향 보강재 연결부를 보여주고 있으며, 해당 부분의 피로균열을 본 논문의 예시로서 적용한다. 여기서의 피로균열 예측을 위해 Table 1에 제시된 확률변수를 사용하여 식 (1)과 (2)에 적용하였다. Table 1에 정의된 확률변수의 평균, Coefficient of variation (COV)와 분포형태는 [11]에 근거한다. 최초 균열 길이 a_i 는 평균값 0.5mm와 COV = 0.1을 가지는 정규분포함수를 따르는 것으로 가정하였으며, 연간 하중반복횟수 N_{an} 는 로그정규분포함수로 1.0×10^6 의 평균값과 1.0×10^5 의 표준편차를 가진다고 가정하였다. 또한, 식 (1)과 (2)에서의 형상함수 $Y(a)$ 는 1.12의 상수로 고려하였다. Table 1에 정의된 확률변수를 Monte Carlo simulation을 통해 각각 100,000개의 샘플을 생성하여 구조부재의 최소수명을 계산하였다. 이때, 구조부재의 최소사용 수명은 피로균열의 크기가 부재 두께인 50mm에 도달하

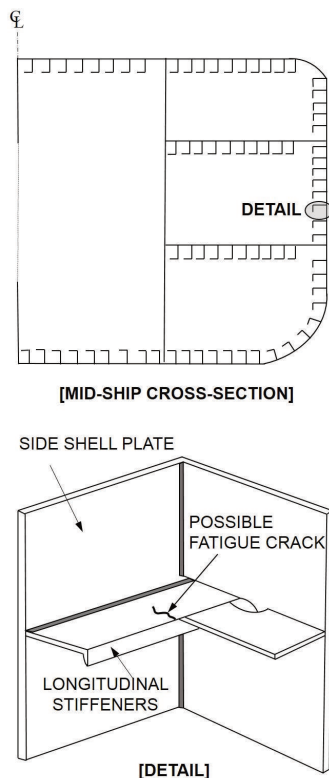


Fig. 3. Mid-ship cross-section and fatigue critical location

는 시간으로 Fig. 4.에서와 같이 평균 15.26년과 표준편차 9.05년의 값을 가지는 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 얻을 수 있다. Fig. 4.에서의 최초 사용수명 PDF는 식 (4)에서 정의된 구조물의 사용수명 내 균열발견확률 P_{life} 을 계산하는데 사용된다.

Table 1. Random variables for fatigue crack prediction

Random variables	Mean	Coefficient of variation	Distribution type
Initial crack size a_i (mm)	0.5	0.1	Normal
Annual number of cycles N_{an}	1.0×10^6	0.1	Lognormal
Material constant C	2.3×10^{-12}	0.3	Lognormal
Material exponent m	3.0	0.05	Normal
Stress range S_r (MPa)	22.5	0.1	Weibull

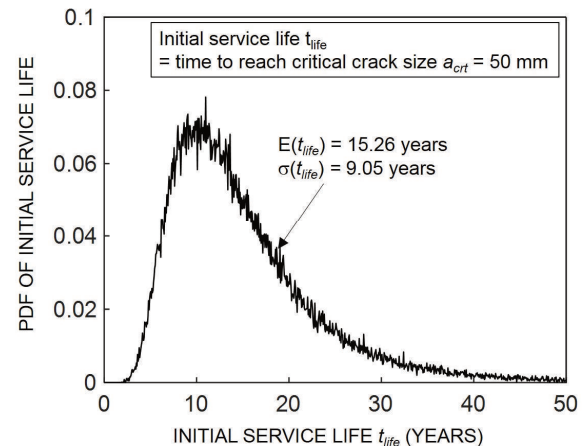


Fig. 4. Probability density function (PDF) of initial service life

3.1 사용수명 내 균열발견확률 최대화를 위한 최적화

본 연구에서 제시되는 다단계 최적화기법의 첫번째 최적화과정은 Fig. 1.에서 보는 바와 같이 사용수명 내 균열발견확률 P_{life} 을 최대화하는 점검시기를 결정하는 것으로 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\text{Find } t_{\in sp} = \{t_{\in sp,1}, t_{\in sp,2}, \dots, t_{\in sp, N_{\in sp}}\} \quad (8a)$$

$$\text{to maximize } P_{life} \quad (8b)$$

$$\text{subject to } t_{\in sp} \leq 20 \text{ years} \quad (8c)$$

$$\text{given } N_{\in sp} = 1 \text{ and inspection method} \quad (8d)$$

여기서, 목적함수 P_{life} 는 식 (4)에서 제시되어 있으며, 설계변수인 균열점검시기 $t_{\in sp}$ 는 20년을 초과하지 않는다. 또한, 균열점검 횟수는 1회로 비파괴 균열점사인 와전류탐상법(Eddy Current, EC), 초음파탐상법(Ultrasonic, UT) 및 액체침투탐상법(Liquid Penetrant, LT)을 적용한다. EC, UT, LT 비파괴 균열점사에 대한 균열발견확률 P_{insp} 계산을 위해 식 (3)을 적용하며, Table 2에서 제시된 계수 α, β ^[16]를 사용한다. 식 (3)의 계수 α 와 β 는 균열점사방법인 EC, UT, LT의 균열발견확률 P_{insp} 을 대표하는 값으로 일반적으로 세 가지 방법 중 동일한 균열크기에 대해 EC가 가장 큰 균열발견확률 P_{insp} 을 제공한다. 식 (8)에 정의된 최적화 문제는 MATLAB(2016b)의 Optimization toolbox를 사용하여 설계변수의 해를 구했으며, 이를 Table 2에 정리하였다. 예를 들어, 와전류탐상법(EC)을 적용할 경우 P_{life} 를 최대화하기 위한 최적 점검 시기는 4.87년이 되며, 이때 P_{life} 는 0.93을 가지며, 초음파탐상법(UT)을 적용할 경우 최대 P_{life} 인 0.71을 얻기 위해서는 7.81년에 점검을 수행해야 한다.

Table 2. Values of design variable and objective

Inspection method	Parameters for P_{insp}	Inspection time $t_{insp,1}$ (years)	P_{life}
EC	$\alpha = -0.968$ $\beta = -0.571$	4.87	0.93
UT	$\alpha = 0.122$ $\beta = -0.305$	7.81	0.71
LT	$\alpha = 0.829$ $\beta = -0.423$	9.79	0.50

3.2 균열성장예측을 위한 확률변수의 업데이트

Fig. 1에서 보는 바와 같이 균열의 크기가 a_{ma} 보다 작을 경우에는 측정된 균열의 크기로 균열성장 예측 모델 (즉, 식 (1)과 (2))의 확률계수를 업데이트하게 되는데 이때 Fig. 2.에서 설명한 MCMC를 기반으로 하는 Bayesian 이론을 적용한다. 본 연구에서는 유지보수를 위한 균열의 크기 a_{ma} 를 부재두께 50mm의

5%인 2.5mm와 10%인 5mm 두 가지로 적용하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 와전류탐상법(EC)을 적용할 경우 최초 점검 시기 4.87년이며, 이 때 평균 균열크기는 식 (2)에 의해 1.2mm로 예측된다. 이때 측정된 균열의 실제크기 $a_{insp,1}$ 가 0.6mm와 1.8mm인 두 가지 경우로 가정하여 연간하중반복 N_{an} 와 응력범위 S_r 를 각각 업데이트한다. 측정된 균열의 크기 0.6mm는 최초 예측된 평균 균열의 크기 1.2mm 보다 적은 값으로 이는 균열의 진행이 최초 예측보다 느리다는 것을 의미하며, 측정된 균열의 크기 1.8mm는 최초 예측된 평균균열의 크기 1.2mm보다 크므로 실제 균열이 최초 예측보다 빠르게 진행한다는 것을 의미한다. 측정된 균열의 크기는 모두 a_{ma} 보다 적으므로 Fig. 1.에서 보는 바와 같이 업데이트 과정을 거치게 된다. Fig. 5.는 Table 1에 정의된 연간하중 반복횟수 N_{an} 와 응력범위 S_r 의 최초 PDF(Prior PDF)와 업데이트된 PDF (Posterior PDF)를 보여준다. 연간하중 반복횟수 N_{an} 는 Table 1에서 보는 바와 같이 평균 1.0×10^6 와 표준편차 1.0×10^5 를 가지는 로그정규분포 PDF로 가정하였으나, 측정된 균열의 크기가 0.6mm일 경우 MCMC를 기반으로 하는 Bayesian 업데이트 과정을 통해 평균 7.73×10^5 와 표준편차 5.82×10^4 를 가지는 PDF를 구할 수 있다. 또한, 측정된 균열의 크기가 1.8mm일 경우, 업데이트된 PDF는 평균 1.29×10^6 와 표준편차 4.93×10^4 를 가지게 된다. 응력범위 S_r 의 경우 최초 로그정규분포를 따르는 평균값 22.5MPa와 표준편차 2.25MPa를 확률변수로 가정하였으나, 측정된 균열의 크기가 0.6mm일 경우 업데이트를 통해, Fig. 5(b).에서 보는 바와 같이 17.03MPa의 평균값과 1.66MPa의 표준편차를 가지는 응력범위 S_r 에 대한 PDF를 얻을 수 있다.

Fig. 6.에서는 업데이트된 연간하중 반복횟수 N_{an} 와 응력범위 S_r 를 적용하여 와전류탐상법(EC)이 적용된 첫번째 점검 시점 $t_{insp,1} = 4.87$ 년 이후 잔류수명에 대한 PDF를 보여준다. 만약 측정된 균열의 크기가 0.6mm일 경우, 업데이트된 확률변수를 이용하여 잔존수명이 평균 40.10년임을 알 수 있으며, 측정된 균열의 크기가 1.8mm인 경우에는 평균 잔존수명이 평균 4.02년으로 예측된다.

3.3 최적 유지보수 시점 결정

두 번째 최적화 과정은 유지보수를 위한 균열 크기 a_{ma} 에 도달할 시기 t_{ma} 와 두 번째 점검시기 $t_{insp,2}$ 의 오차를 최소화하는 것으로 해당 목적함수 f 를 다음과 같이 표현한다.

$$f = |t_{ma} - t_{\in sp,2}| \quad (9)$$

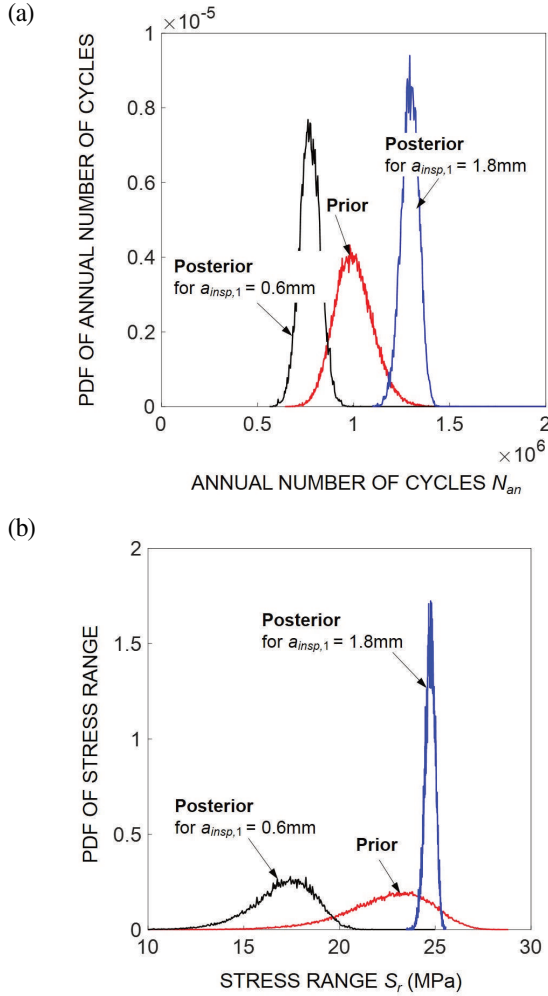


Fig. 5. Prior and posterior distribution: (a) annual number of cycles N_{an} ; (b) stress range S_r

t_{ma} 를 구하기 위해 $t_{insp,1} = 4.87$ 년에 와전류탐상법(EC)을 사용하여 측정된 균열의 크기가 0.6mm와 1.8mm인 두 가지 경우에 대해서 Fig. 5.에서 보는 바와 같이 업데이트된 연간하중반복 N_{an} 와 응력범위 S_r 를 적용하였으며, Fig. 7(a).와 7(b).에 각각 균열의 크기가 0.6mm와 1.8mm인 경우 대해 균열 크기 $a_{ma} = 2.5$ mm와 5.0mm에 해당하는 t_{ma} 의 PDF를 나타내었다. Table 3에서는 두 번째 최적화 결과인 점검시기 $t_{insp,2}$ 를 보여준다. 예를 들어, 첫 번째 와전류탐상법(EC)을 사용하여 측정된 균열의 크기가 $a_{\in sp,1} = 0.6$ mm인 경우, $a_{ma} = 2.5$ mm일 때, 두 번째 최적 점검시기는 첫 번째 점검 이후 19.97년이 되며, $a_{\in sp,1} = 1.8$ mm 경우에는 첫 번째 점검 이후 0.67년에 점검이 필요하다. 한편, 유지보수를 위한 균열의 크기 a_{ma} 를 5.0mm로 적용할 경우에는 측정된 균열의 크기 $a_{\in sp,1} = 0.6$ mm에 대해 25.61년이

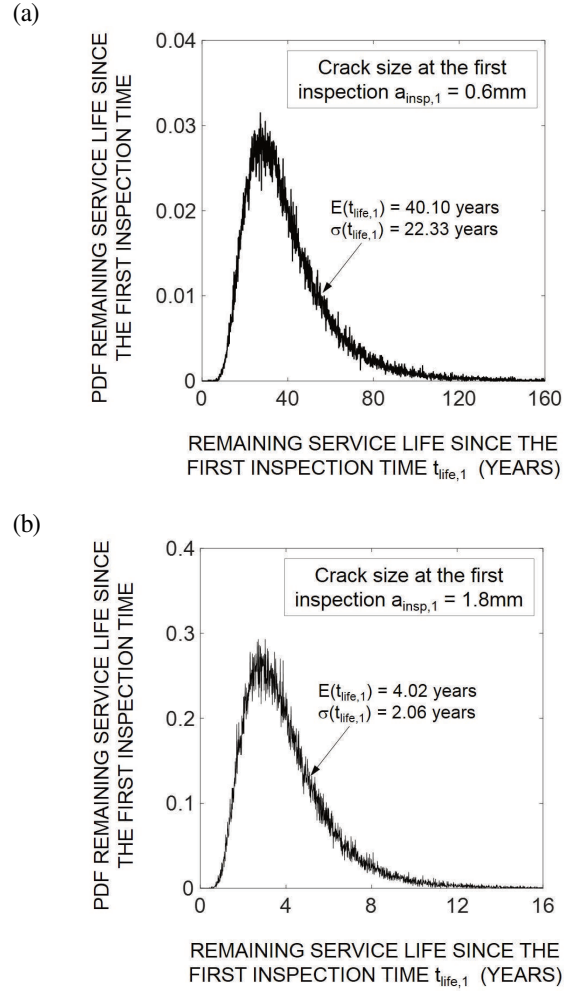


Fig. 6. PDF of remaining service life since the first inspection: (a) $a_{insp,1} = 0.6$ mm; (b) $a_{insp,1} = 1.8$ mm

후를 두 번째 점검시기로 볼 수 있으나, 측정된 균열의 크기 $a_{\in sp,1}$ 이 1.8mm의 경우에는 1.77년 이후가 최적의 두 번째 점검시기가 된다.

Table 3. Optimum second EC inspection time

Crack size for maintenance a_{ma} (mm)	Observed crack size $a_{insp,1}$ at the first inspection time $t_{insp,1}$ (mm)	Second inspection time $t_{insp,2}$ since the first inspection time $t_{insp,1}$ (years)
2.5	0.6	19.97
	1.8	0.67
5.0	0.6	25.61
	1.8	1.77

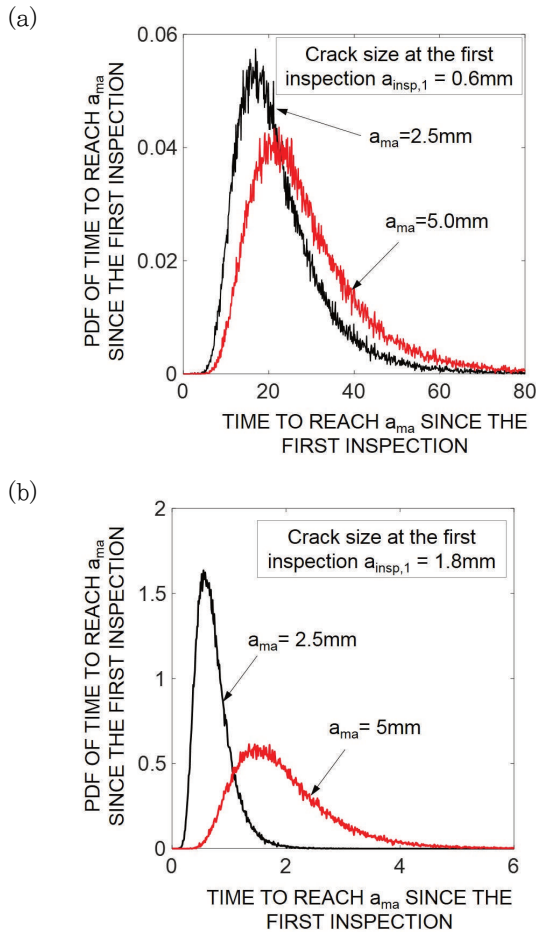


Fig. 7. PDF of time for crack size to reach a_{ma} since the first inspection $t_{insp,1} = 4.87$ years: (a) $a_{insp,1} = 0.6mm$; (b) $a_{insp,1} = 1.8mm$

4. 결론

본 연구에서는 피로에 의한 균열발생을 효율적으로 관리하기 위한 최적점검 시기를 결정하는 방법을 제시하였다. 점검과정에서 생성되는 균열크기 정보를 이용하여, 균열성장 예측에 필요한 변수들을 업데이트하고, 이를 통해 다음 점검시기를 결정하게 된다. 본 연구에서 제시된 결과를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- 본 연구에서 제시된 피로균열의 최적점검 시기결정 방법은 점검결과에 따른 균열성장예측 모델을 지속적으로 업데이트할 수 있다. 또한, 기존의 정기점검에서 생성된 정보를 바탕으로 본 연구에서 제시된 방법을 통합 적용하여 보다 정확하고 신뢰성 있는 균열관리를 가능케 한다.
- 측정된 균열과 최초 예상된 균열의 상대적인 차이와 유지보수를 위한 균열의 크기 설정에 따라 다음 점검주기 결정에 영향을 받는다. 즉, 측정된 균열의 크기가 최초 예상보다 클 경

우, 그리고 유지보수를 위한 균열의 크기가 작을수록 두 번째 점검시기가 앞당겨진다.

- 본 연구에서는 측정된 균열로 피로 균열성장예측 모델의 변수를 업데이트하였으나, 균열의 크기와 다른 측정결과를 복합적으로 업데이트에 활용할 수 있다.
- 첫 번째 점검에서 측정된 균열의 크기가 유지보수에 해당하는 균열의 크기보다 클 경우 유지보수를 통해 구조물의 피로 성능이 최초 상태로 회복되면 제시된 과정을 처음부터 반복한다.
- 본 연구에서는 와전류탐상법(EC), 초음파탐상법(UT) 및 액체침투탐상법(LT)에 대해 적용하였으나, 균열의 발견확률을 정의할 수 있는 정보가 가용한 경우 보다 다양한 균열탐지방법을 고려하여 적용할 수 있다.
- 단일 피로균열 예상지점을 대상으로 본 연구의 결과가 제시되었으나, 일반적으로 다수의 피로균열을 동시에 관리에 하는 현실적인 여건을 반영한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 본 연구에서는 초기균열의 크기를 가정하여 균열진전에 의한 피로 수명을 계산하였으나, 피로수명은 균열의 최초 발생 및 진전 수명을 동시에 고려하여 예측할 필요가 있다.
- 제시된 방법의 정확성 및 신뢰성은 균열크기 예측의 정확성에 좌우되므로, 보다 정확하고 신뢰성 있는 균열진전 예측모델의 적용이 수반되어야 한다. 또한, 적용된 예측모델과 관련 가정을 기반으로 수치적 결과가 계산된 점을 고려할 때 현실적인 적용을 위한 추가적인 검증에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 원광대학교 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 경갑수, 이성진, 박진은, 차철준(2012) 강철도교 열화현상에 관한 보수/보강 연구: 강철도교의 플랜지 용접이음부의 거동 특성 및 피로균열 보수보강, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.613-625.
- Kyung, K.S., Lee, S.J., Park, J.E., and Cha, C.J. (2012) A Study on Repair/Retrofit for Deteriorations of Steel Bridge: Behavior Characteristics of Welded Joint Part of Flange and Repair/Retrofit of Fatigue Crack in Railway Steel Bridge,

- Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.613-625 (in Korean).
- [2] 이재선, 장경호, 황지훈, 박현찬, 전준태, 김유철(2011) 강부재의 균열 모니터링에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제2호, pp.159-167.
Lee, J.S., Chang, K.H., Hwang, J.H., Park, H.C., Jeon, J.T., and Kim, Y.C. (2011) Study on Crack Monitoring System in Steel Structure, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.2, pp.159-167 (in Korean).
- [3] 김광진, 김인태, 류용열(2010) COD(Crack Opening Displacement) 측정을 통한 강재의 피로균열진전속도 추정에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제6호, pp.589-597.
Kim, K.J., Kim, I.T., and Ryu, Y.Y. (2010) Experimental Study on Evaluation of Fatigue Crack Growth Rate of Steel Plates Using Crack Opening Displacement, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.6, pp.589-597 (in Korean).
- [4] 김상효, 이상우, 마호성, 김종학(1999) 강철도교의 잔존피로수명 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제11권, 제4호, pp.329-338.
Kim, S.H., Lee, S.W., Mha, H.S., and Kim, J.H. (1999) Remaining Fatigue Life Evaluation of Steel Railroad Bridge, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.11, No.4, pp.329-338 (in Korean).
- [5] Rangel-Ramírez, J.G., and Sørensen, J.D. (2008) Optimal Risk-Based Inspection Planning for Offshore Wind Turbines, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.8, No.4, pp.295-303.
- [6] Cremona, C. (2003) Life Cycle Cost Concepts Applied to Welded Joint Inspection in Composite Bridges, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.3, No.2, pp.95-105.
- [7] Fisher, J.W., Kulak, G.L., and Smith, I.F.C. (1998) *A Fatigue Primer for Structural Engineers*, National Steel Bridge Alliance, USA.
- [8] Fisher, J.W. (1984) *Fatigue and Fracture in Steel Bridges: Case Studies*, Wiley, USA.
- [9] Guedes-Soares, C., and Garbatov, Y. (1996) Fatigue Reliability of the Ship Hull Girder Accounting for Inspection and Repair, *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, Vol.51, No.3, pp.341-351.
- [10] Kim, S., Frangopol, D.M., and Soliman, M. (2013) Generalized Probabilistic Framework for Optimum Inspection and Maintenance Planning, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.139, No.3, pp.435-447.
- [11] Soliman, S.M., and Frangopol, D.M. (2014) Life-Cycle Management of Fatigue-Sensitive Structures Integrating Inspection Information, *Journal of Infrastructure Systems*, American Society of Civil Engineers, Vol.20, No.2, 04014001.
- [12] van Ravenzwaaij, D., Cassey, P., and Brown, S.D. (2018) A Simple Introduction to Markov Chain Monte-Carlo Sampling, *Psychonomic Bulletin & Review*, Psychonomic Society, Vol.25, No.1, pp.143-154.
- [13] Gamerman, D., and Lopes, H.F. (2006) *Markov Chain Monte-Carlo: Stochastic Simulation for Bayesian Inference*, Chapman & Hall/CRC, USA.
- [14] Carlin, B.P., and Chib, S. (1995) Bayesian Model Choice via Markov Chain Monte Carlo Methods, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, Royal Statistical Society, Vol.57, No.3, pp.473-484.
- [15] Gilks, W.R., Richardson, S., and Spiegelhalter, D.J. (Eds.) (1996) *Markov Chain Monte Carlo in Practice*, Chapter 8. Inference and Monitoring Convergence, Chapman and Hall/CRC, UK, pp.131-143.
- [16] Forsyth, D.S., and Fahr, A. (1998) An Evaluation of Probability of Detection Statistics, *RTO Meeting Proceedings 10: Airframe Inspection Reliability Under Field/Depot Conditions*, NATO Research and Technology Organization, France, pp.10-1-10-5.

요 약: 본 논문에서는 Bayesian 업데이트 기반 다단계 최적 피로균열점검 시기 결정을 다룬다. 다단계 최적화 중 첫 번째 최적화 과정에서는 피로균열이 구조물의 파괴에 이르기 전 감지될 확률을 최대화하는데 그 목적을 두며, 결과적으로 최적 점검시기를 얻게 된다. 첫 번째 점검 시기에 측정된 피로균열의 크기는 기존의 균열크기 예측에 필요한 확률변수의 업데이트에 사용되는데, 이를 위해 Markov chain Monte Carlo 시뮬레이션 기반 Bayesian 업데이트를 적용한다. 업데이트된 피로균열 모델의 확률변수는 두 번째 점검시기를 결정하는 최적화 과정에 적용된다. 두 번째 최적화 과정의 목적함수는 피로균열의 크기가 유지보수를 위한 크기에 도달할 때 점검을 수행하는 데 시간적 오차를 최소화하는 데 있다. 본 연구에서 제시된 방법은 선박구조물의 측면부재의 피로현상에 적용한다.

핵심용어: 다단계 최적화, 점검, Bayesian, Markov chain Monte Carlo 시뮬레이션, 피로, 유지보수