

확률론적 구조물 수명관리의 유지보수 상관관계 영향 평가

김선용^{1*}

Correlation Effect of Maintenances on Probabilistic Service Life Management

Sunyong Kim^{1*}

Abstract: The assessment and prediction of service life of a structure are usually under uncertainty so that rational probabilistic concepts and methods have to be applied. Based on these rational assessment and prediction, optimum maintenance strategies to minimize the life-cycle cost and/or maximize the structural safety can be established. The service life assessment and prediction considering maintenance actions generally includes effects of maintenance types and times of the structural components on the service life extensions of structural system. Existing researches on the service life management have revealed the appropriate system modeling considering the correlation among the components is required for system reliability analysis and probabilistic service life estimation. However, the study on correlation among the maintenance actions is still required. This paper deals with such a study for more effective and efficient service life management. In this paper, both the preventive and essential maintenances are considered for the extended service life estimation and management.

Keywords: Correlation, Maintenance, Life-cycle, Service life, Structural reliability

1. 서론

일반적으로 구조물의 수명은 제한적이거나 다양한 불확실성으로 인해 이를 정확히 예측하는 것은 불가능하다. 따라서, 확률론적인 이론과 방법을 통해 구조물의 수명을 적절하게 예측하기 위한 방법들이 개발되어 왔다. 구조물의 유지보수(maintenance)를 고려한 수명예측 기법을 바탕으로 수명관리의 효율성을 증대시키고, 결과적으로 구조물의 안전성 증대와 생애주기비용의 절감을 실현시킬 수 있다(Frangopol et al., 2001; Furuta et al., 2011).

구조물의 수명관리는 불확실성의 효율적 고려를 위해 신뢰성 이론을 적용한다. 구조시스템(structural system)의 신뢰성 평가는 시스템을 구성하는 구조요소(structural component)의 신뢰성 평가와 시스템 모델링을 통해 수행된다(Ang and Tang, 1984; Leemis, 1995). 구조시스템은 신뢰도에 대한 구조요소의 역할과 기여도를 고려하여 모델링 된다. 따라서, 구조시스템의 신뢰도는 구조요소의 모델링과 구조요소의 상관관계(correlation)에 영향을 받는다. 이를 바탕으로 최초 구조시스템의 신뢰도를 평가하고 열화요소를 반영한 수명을 평가하게

된다. 구조시스템의 모델링과 구조요소의 상관관계에 따른 신뢰도와 수명에 대한 연구는 Frangopol and Kim(2011)와 Zhu and Frangopol(2012) 등에서 찾아볼 수 있다. 구조물의 수명연장과 신뢰도 향상은 유지보수 방법과 시기에 따라 달라지는데, 생애주기 비용 최소화와 관련된 목적함수(objective function)를 가지는 최적화(optimization) 과정을 통해 수명관리가 이루어질 수 있다(Frangopol, 2011).

본 논문에서는 구조시스템을 구성하는 구조요소의 상관관계와 더불어 기존의 연구에서 고려된 바 없는 유지보수간의 상관관계에 따른 수명평가 영향분석을 수행하며, 이를 통해 향후 좀 더 효율적인 수명관리 기법 개발에 활용하고자 한다. 또한, 예방유지보수(preventive maintenance)와 필수유지보수(essential maintenance)를 모두 고려하며, 유지보수간 독립(independent) 상태와 완전상관(perfectly correlated) 상태에 따른 수명 예측 및 최적화 유지보수 계획 수립을 비교 제시한다.

2. 파괴확률과 신뢰성

이 장에서는 구조물의 사용수명(service life)에 기반을 둔 구조요소 및 구조시스템의 파괴확률(probability of failure)과 신뢰성(reliability)에 대한 이론을 소개하며, 구조물의 유지보수와 수명연장과의 관계를 설명하고자 한다.

¹정회원, 원광대학교 토목환경공학과 조교수, 교신저자

*Corresponding author: sunyongkim@wku.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2016년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 3월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2.1 구조요소의 파괴확률과 신뢰성

구조물의 파괴확률은 일반적으로 특정시간에서의 상태함수(state function)로 표현된다. $[g(\mathbf{X}) > 0]$ 일 경우는 “안전상태(safe state)”, $[g(\mathbf{X}) = 0]$ 일 경우는 “한계상태(limit state)”, 그리고 $[g(\mathbf{X}) < 0]$ 일 경우는 “파괴상태(failure state)”로 파괴확률 p_F 과 신뢰성 p_S 은 다음과 같이 표현된다.

$$p_F = \int_{g(\mathbf{x}) < 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1)$$

$$p_S = 1 - p_F = \int_{g(\mathbf{x}) > 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 는 확률변수 벡터이고, $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ 는 벡터 \mathbf{X} 의 공동 확률 밀도 함수(joint probability density function)이다.

2.2 구조시스템의 파괴확률과 신뢰성

구조시스템의 파괴확률이나 신뢰성을 평가하기 위해서는 구조요소와 가능 파괴모드를 모두 고려할 필요가 있다. 예를 들어, 교량의 파괴확률 혹은 신뢰성을 구하기 위해서는 그 구성요소인 deck, girder 그리고 pier 등의 요소를 전체 구조시스템으로 모델링 하고, 파괴를 초래하는 요인인 휨, 전단, 좌굴, 피로 등 또한 구조시스템으로 고려할 수 있다.

일반적으로 구조시스템은 직렬(series), 병렬(parallel), 그리고 혼합(combined) 모델을 활용하게 되는데(Ramakumar, 1993), 각각의 파괴확률은 다음과 같다.

$$p_{F,series} = p \left[\bigcup_{i=1}^N \{g_i(\mathbf{X}) \leq 0\} \right] \quad (3)$$

$$p_{F,parallel} = p \left[\bigcap_{i=1}^N \{g_i(\mathbf{X}) \leq 0\} \right] \quad (4)$$

$$p_{F,comb} = p \left[\bigcup_{j=1}^M \bigcap_{i=1}^J \{g_{i,j}(\mathbf{X}) \leq 0\} \right] \quad (5)$$

여기서, N = 직렬 혹은 병렬 모델의 구조요소 개수, M = 혼합모델의 병렬시스템 개수이며, j 번째 병렬 시스템은 J 개의 구조요소를 갖는다. Fig. 1에서는 $N=3$ 에 해당하는 직렬 혹은 병렬 시스템 모델과 $M=1$ 을 가지는 혼합모델을 도식화하였다. 식 (5)에서의 상태함수는 $g_1(\mathbf{X}) = g_{1,1}(\mathbf{X})$, $g_2(\mathbf{X}) = g_{2,1}(\mathbf{X})$, $g_3(\mathbf{X}) = g_{1,2}(\mathbf{X})$ 의 관계를 가진다.

구조시스템의 파괴확률은 구조요소의 상관관계에 따라 다

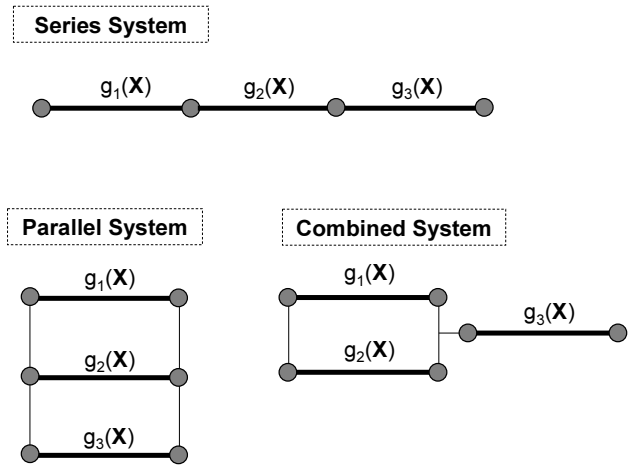


Fig. 1 System modeling for probability of structural failure

음과 같은 범위를 가진다.

$$\max [p_{F,i}] \leq p_{F,series} \leq 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_{F,i}) \quad (6)$$

$$\prod_{i=1}^N p_{F,i} \leq p_{F,parallel} \leq \min [p_{F,i}] \quad (7)$$

직렬 시스템일 경우 각 요소가 완전 상관관계를 가지면 식 (6)의 하한값을, 독립관계인 경우는 상한값을 가지게 된다. 또한, 병렬 시스템일 경우 식 (7)의 하한값과 상한값은 각각 독립 관계와 완전 상관관계에 해당된다.

2.3 유지보수에 따른 수명연장

구조물의 수명은 일반적으로 그 구조성능이 특정 성능을 만족하지 못하는 시점을 말한다. 구조물의 최초의 수명은 적절한 유지보수를 통해 연장되는데, 유지보수의 방법을 일반적으로 예방유지보수와 필수유지보수로 구별한다(Das, 1999).

예방유지보수는 정해진 시간에 적용되며 이를 통해 구조열화의 진행을 완화/지연시키며, 구조요소의 성능향상으로 전체 구조시스템의 부분적 성능향상을 유발시킬 수 있다. 예방유지보수의 방법으로는 구조요소의 부분적 교체, 균열 제거, 부식제거 및 도색 등이 포함된다. NCHRP(2006)에서는 콘크리트 교량 부식의 예상 감염지수(susceptibility index)에 따른 예방유지보수 방법을 제시하고 있으며, 이에 따른 기대 수명 연장을 정량적으로 제시하고 있다. i 번째 예방유지보수에 따른 연장된 수명 $t^{(PM)}_{life,i}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다(Kim et al., 2011).

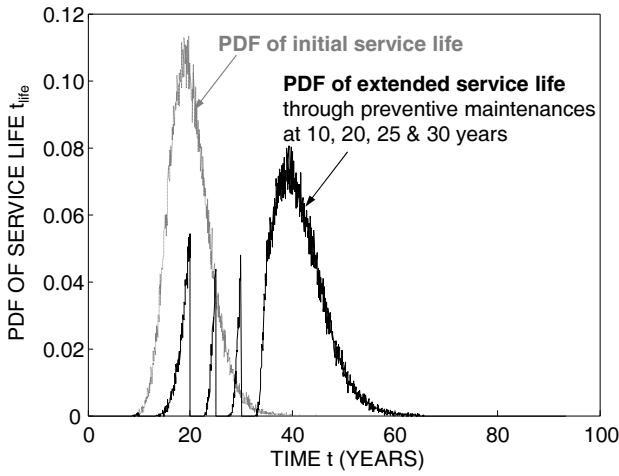


Fig. 2 PDFs of initial and extended service lives through preventive maintenances

$$t_{life,i}^{(PM)} = \begin{cases} t_{life,i-1}^{(PM)} & \text{for } t_i^{(PM)} > t_{life,i-1}^{(PM)} \\ t_{life,i-1}^{(PM)} + t_{ex}^{(PM)} & \text{for } t_i^{(PM)} \leq t_{life,i-1}^{(PM)} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, $t_{ex}^{(PM)}$ 는 시간 $t_i^{(PM)}$ 에 적용된 예방유지보수로 연장되는 수명을 의미한다. 또한, i 번째 예방유지보수에 의한 수명 연장 $t_{ex}^{(PM)}$ 는 $t_{life,i-1}^{(PM)}$ 전에 적용되어야 유효하다. Fig. 2에서는 최초의 구조물의 수명이 평균 20년과 표준편차 4년을 가지는 로그정규분포로 표현될 때 확률밀도함수(PDF: probability density function)를 Monte Carlo Simulation을 이용하여 도식화하였다. 또한, 10, 20, 25, 30년에 예방유지보수가 적용되고, 연장된 수명시간 $t_{ex}^{(PM)}$ 이 로그정규분포로 표현되고, 평균과 표준편차가 각각 5년과 1년일 경우 식 (8)을 이용하여 PDF를 Fig. 2와 같이 구하였다. 10년 후에 적용되는 첫번째 예방유지보수($t_i^{(PM)} = 10$)로 연장된 수명인 $t_{life,1}^{(PM)}$ 은 $t_{life,0}^{(PM)}$ 을 최초 수명으로 계산하게 되는데, 평균 20년과 표준편차 4년의 로그정규분포로 표현되는 최초수명이 첫번째 예방유지보수 적용시점인 10년보다 적을 경우 식 (8)에서 정의된 바와 같이 구조물의 수명은 더 이상 연장되지 못하게 된다. 이를 고려하여 연속적으로 20, 25, 30년에 적용되는 예방유지보수로 인한 연장된 최종수명 $t_{life,4}^{(PM)}$ 를 구하여, 이를 PDF로 표현하면 Fig. 2가 된다. 여기서 20년과 40년 사이 3개의 불연속 구간은 i 번째 예방유지보수가 수명 $t_{life,i-1}^{(PM)}$ 이전에 적용되지 못해 발생한 것이다.

필수유지보수는 구조성능이 한계에 도달하였을 경우 적용하는 유지보수로 예방유지보수보다 더 큰 구조적 성능 향상을 기대할 수 있으며, 연장되는 수명 또한 길지만, 더 많은 비용이 필요하다. 구조요소의 전면적 강화 및 교체가 필수유지

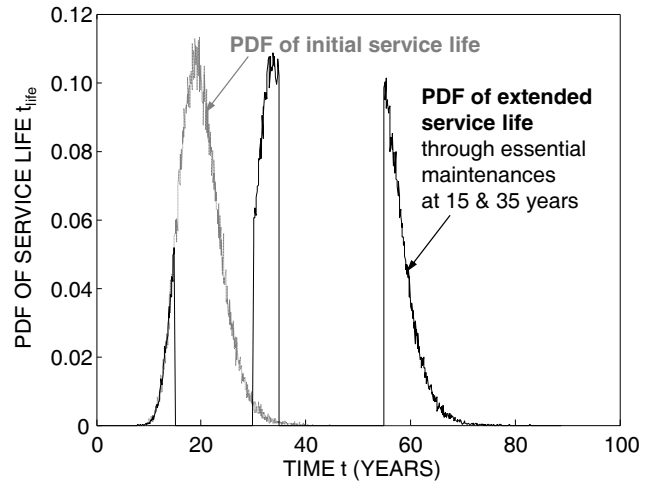


Fig. 3 PDFs of initial and extended service lives through essential maintenances

보수로 볼 수 있다. 필수유지보수와 예방유지보수의 사례분석에 대한 상세한 내용은 NCHRP(2006), Alampalli(2014), Cheng(2014) 등에서 찾아볼 수 있다. 필수유지보수에 따른 구조물 또는 구조요소의 연장되는 수명과 성능이 최소수명이나 성능과 동일할 경우 i 번째 필수유지보수에 따른 연장된 수명 $t_{life,i}^{(EM)}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다(Kim et al., 2011).

$$t_{life,i}^{(EM)} = \begin{cases} t_{life,i-1}^{(EM)} & \text{for } t_i^{(EM)} > t_{life,i-1}^{(EM)} \\ t_{life,i-1}^{(EM)} + t_{life,0}^{(EM)} & \text{for } t_i^{(EM)} \leq t_{life,i-1}^{(EM)} \end{cases} \quad (9)$$

여기서, $t_{life,0}^{(EM)}$ 는 최초 수명을 나타낸다. Fig. 3에서는 Fig. 2에서와 동일한 최초의 수명을 가지는 구조물에 대해 식 (9)를 바탕으로 15년과 35년에 필수유지보수가 적용되어 연장된 수명 $t_{life,2}^{(EM)}$ 의 PDF를 도식화하였다.

3. 사용수명 예측과 상관관계의 영향

확률변수들 간의 상관관계의 정도를 표현하기 위해 상관계수(correlation coefficient) ρ 를 사용한다. 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = \frac{\mu_{XY} - \mu_X \mu_Y}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (10)$$

여기서, μ_X = 확률변수 X의 평균; σ_X = 확률변수 X의 표준편차. 상관계수 ρ 는 -1부터 +1 사이의 값을 가지며, 0일 경우

두 변수는 독립관계임을 나타내고, ± 1 일 경우에는 완전상관 관계를 나타내어 서로 선형의 관계를 가진다.

3.1 구조요소의 상관관계에 따른 사용수명

구조시스템의 파괴확률은 식 (6)과 (7)에 명시된 바와 같이 구조요소의 상관관계에 따라 그 값이 달라진다. 구조요소의 파괴확률 $p_{F,i}$ 는 사용수명 t_{life} 가 시간 t 보다 작을 확률로 다음과 같다(Ang and Tang, 1984; Leemis 1995).

$$p_{F,i} = P(t_{life,i} \leq t) \quad (11)$$

이는 구조요소의 파괴확률 $p_{F,i}$ 는 $t_{life,i}$ 의 누적분포함수(CDF : cumulative distribution function) $P(t_{life,i} \leq t)$ 로부터 구할 수 있는 것을 의미한다. Fig. 1의 시스템 모델을 구성하는 3개 요소의 수명과 유지보수가 Table 1에서 제시된 값을 가질 경우 직

렬과 병렬 시스템 모델의 CDF를 각각 Figs. 4와 5에 나타내었다. CDF는 식 (11)에서 언급된 바와 같이 구조물의 연장된 수명이 특정시간 t 보다 작을 확률을 도식화한 것으로 Fig. 4에서

Table 1 Probabilistic parameters and maintenance application time for service life prediction

	Initial service life(years)	Maintenance time (years)
Component 1	^a LN(30; 6)	^b PM: 20, 30, 35, 40 ^c EM: 30, 60, 90
Component 2	^a LN(20; 4)	^b PM: 10, 20, 25, 30 ^c EM: 20, 40, 60
Component 3	^a LN(10; 2)	^b PM: 5, 10, 15, 20 ^c EM: 10, 20, 30

^aLognormally distribution; ^bPreventive maintenance; ^cEssential maintenance

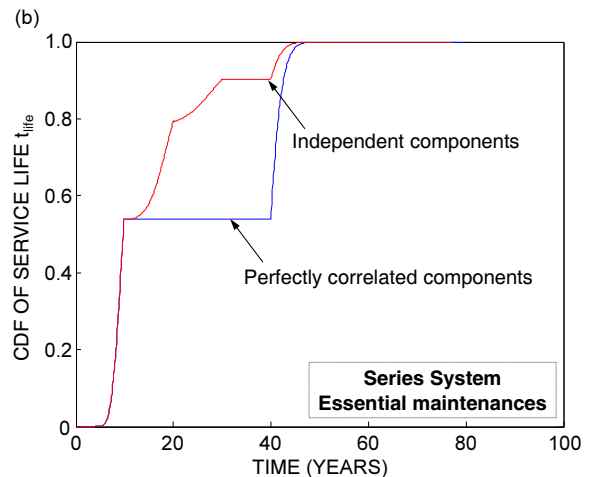
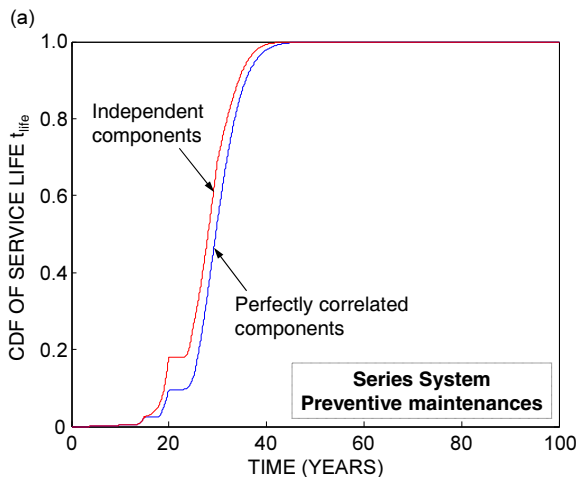


Fig. 4 Component correlation - CDFs of extended service lives for series system of Fig. 1: (a) preventive maintenance; (b) essential maintenance

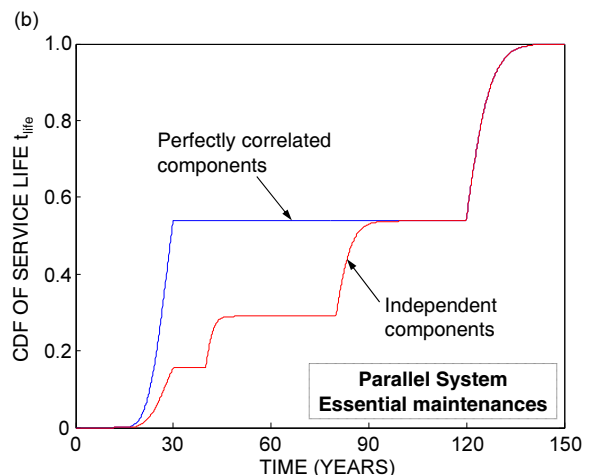
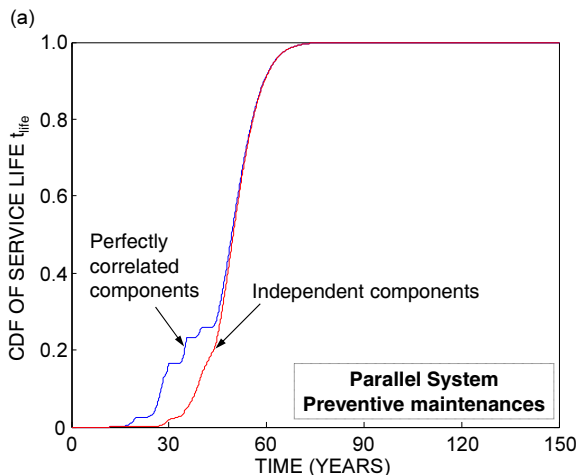


Fig. 5 Component correlation - CDFs of extended service lives for parallel system of Fig. 1: (a) preventive maintenance; (b) essential maintenance

보는 바와 같이 수명이 50년보다 작을 확률이 1.0에 가까워지며, 반대로 수명이 50년보다 길 확률은 0에 가까워짐을 알 수 있다.

구조요소의 상관관계는 상태함수 $g(X)$ 의 확률변수 벡터 X 를 고려하여 계산된다. 구조시스템의 시간 의존적 신뢰성 평가에 있어서, 구조요소들이 동일하게 제작되고, 작용하는 하중과 경련열화 조건 또한 동일한 경우 구조요소가 서로 완전 상관관계에 있다고 볼 수 있다.

3.2 유지보수의 상관관계에 따른 사용수명

유지보수에 따른 구조신뢰성은 생존함수(survivor function)를 이용하여 구할 수 있다. 생존함수는 일반적으로 exponential distribution, lognormal distribution, Weibull distribution을 이용하여 표현하는데, 생존함수를 기반으로 하는 확률론적 구조안전성 평가는 계산절차가 간단하고, 신속히 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 유지보수에 따른 구조열화의 지연이나, 구조성능의 향상을 복합적으로 표현하기 어렵다. 구조요소의 생존함수는 파괴확률을 이용하여 다음과 같이 정의된다(Leemis, 1995).

$$S_i(t) = 1 - p_{F,i} = P(t_{lfe,i} > t) \quad (12)$$

또한, 다수의 필수유지보수에 의한 구조요소의 생존함수 $S_i(t)$ 는 일반적으로 다음과 같이 표현된다(Klaassen et al., 1989; Kececioglu, 1995; Yang et al., 2006).

$$S_i(t) = \begin{cases} S_i(t) & \text{for } t < t_i^{(EM)} \\ S_i(t - t_i^{(EM)}) \prod_{j=1}^i S_i(t_j^{(EM)} - t_{j-1}^{(EM)}) & \text{for } t_i^{(EM)} \leq t < t_{i+1}^{(EM)} \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)은 필수유지보수에 의해 연장되는 구조물의 수명이 최초 수명과 동일하고, 유지보수간 서로 독립이라는 가정에 제한적으로 적용될 수 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 구조요소의 상관관계에 따라 구조물 사용수명의 누적분포함수가 상이한 값을 가지는 것과 마찬가지로 유지보수의 상관관계에 따라 사용수명의 확률론적 분포가 다를 수 있다. 유지보수가 서로 동일한 방법과 위치에 적용되어 그 연장되는 수명이 같을 경우 유지보수간 상관관계는 서로 독립이라고 보기 어렵다. 본 연구의 예방유지보수에 있어서의 상관관계는 식 (8)과 (9)에서 i 번째 유지보수에 의해 연장되는 시간과 $i-1$ 번째 유지보수에 의해 연장되는 시간과의 상호 상관관계를 고려한다.

Figs. 2, 3, 4, 5에서의 유지보수에 따른 PDF와 CDF는 유지보수간 상호관계가 완전상관관계에 있다는 가정하에서 도식화된 것이다. Fig. 6은 Table 1에서 정의된 3개의 요소가 서로 독립인 직렬 시스템 모델의 유지보수간 상관관계가 독립인 경우와 완전상관관계의 경우를 모두 고려하여 나타내었다. 즉, 예방유지보수는 (a), 필수유지보수는 (b)에 각각 도식화하였다. 또한, Fig. 7은 병렬 시스템 모델의 경우 요소의 상관관계가 서로 독립인 경우, 유지보수간 상관관계가 독립인 경우와 완전상관관계인 경우를 Fig. 6에서 마찬가지로 나타내었다. Figs. 6과 7에서 보는 바와 같이 예방유지보수에 비해 필수유지보수에 있어서 유지보수간 상관관계가 CDF에 더 큰 영향이 있음을 알 수 있다. 또한, 필수유지보수에 있어서 직렬과 병렬시스템 모두 독립관계에서의 파괴확률이 완전상관관계에서의 파괴확률보다 큰 값을 제공함으로써 유지보수간 독립관계를 고려한 수명평가가 좀 더 보수적이라고 할 수 있다.

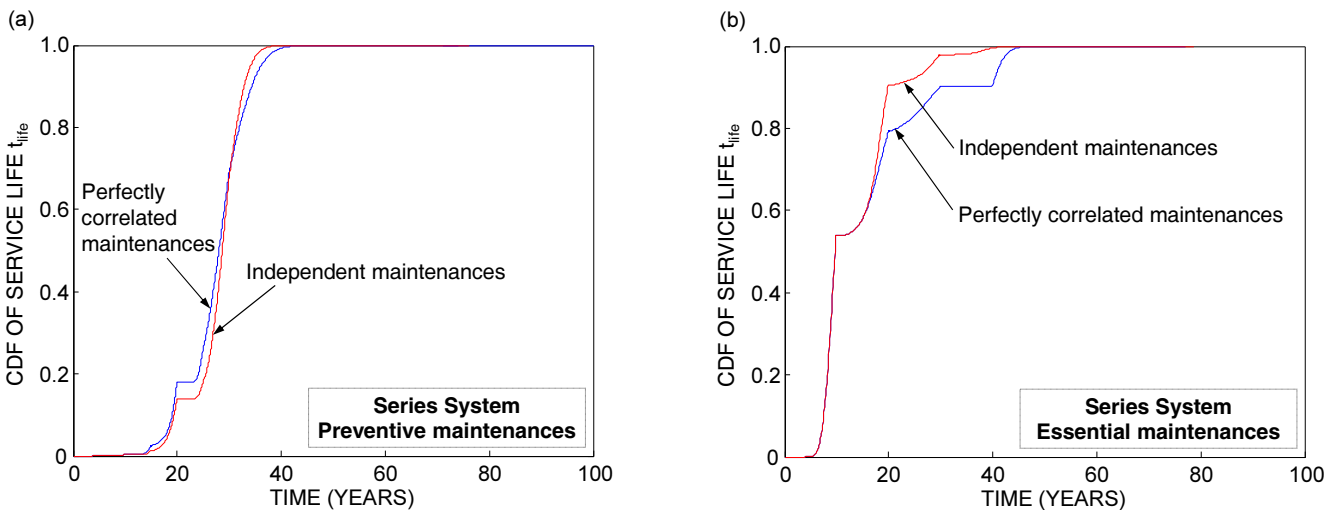


Fig. 6 Maintenance correlation - CDFs of extended service lives for series system of Fig. 1: (a) preventive maintenance; (b) essential maintenance

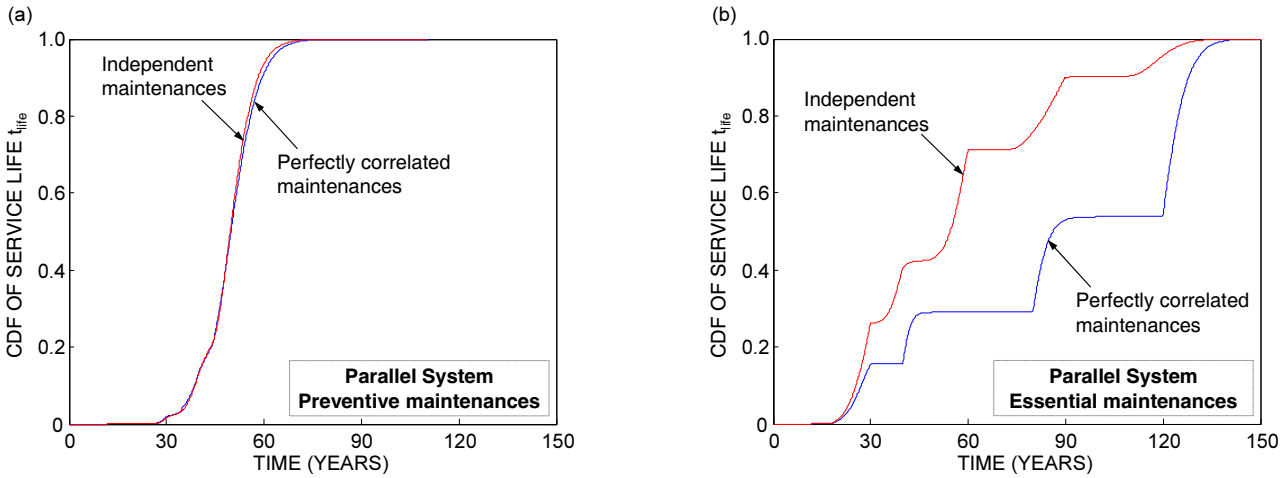


Fig. 7 Maintenance correlation - CDFs of extended service lives for parallel system of Fig. 1: (a) preventive maintenance; (b) essential maintenance

3.3 유지보수의 상관관계를 고려한 최적화 유지보수

유지보수간 상관관계는 구조물의 수명평가와 더불어 유지보수 계획 수립에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 그 영향을 알아보기 위해 Table 2에서 정의된 최적화 문제를 적용한다.

일반적으로 최적화 문제는 목적함수, 설계변수, 그리고 설계변수조건과 일반조건으로 구성되며, 주어진 조건에 만족함과 동시에 목적함수를 충족하는 설계변수를 찾는 것이 최적화 과정이라고 할 수 있다. Table 2에서 정의된 최적화 문제의 목적함수는 Fig.1 병렬시스템의 3개 구성요소에 필수유지보수를 적용하였을 경우 목표수명인 60년에서의 병렬시스템의 파괴확률의 최소화이며, 이를 위해 각 구성요소별 유지보수 적용 시간간격 $t_{int,i}$ 이 설계변수가 된다. 또한, 유지보수 적용 시간 간격은 2년에서 40년 사이로 제한한다. 즉, 구조요소 1, 2와 3에 2, 3, 6회의 필수유지보수를 적용할 경우, 전체 병렬시

스템의 60년 이후 파괴확률이 최소가 되는 유지보수 시간간격을 구하는 것이 본 최적화문제이다.

Table 3에서는 구조요소의 상관관계와 유지보수의 상관관계 모두를 고려한 최종 결과를 제시하고 있으며, Fig. 8에서는 Table 3에서의 결과 일부를 CDF로 도식화하였다. 최적화 기법은 Matlab R2013a Optimization Tool의 fminsearch를 적용하여 결과를 얻었으며, genetic algorithm을 이용하여 검토하였다. 여기서, fminsearch는 최적화 문제의 목적함수인 파괴확률 $p_{F,parallel}$ 과 같은 불연속 비선형 함수에 적합하나 초기 가정값 (Initial value)에 따라 그 결과가 상이할 수 있어(Mathwork, 2015) 이를 보완하기 위해 genetic algorithm을 적용하여 최종 결과의 타당성 여부를 검토하였다.

Table 3에서 보는 바와 같이, 구조요소가 서로 독립이고 유지보수 또한 서로 독립관계를 가질 경우, 목표 수명 60년에서의 최소파괴확률인 0.023을 기대하기 위해 구조요소 1, 2, 3에 대해 필수유지보수를 각각 20.09년, 15.02년, 5.7년 간격으로 적용해야 한다. Table 3과 Fig. 8에서 보는 바와 같이, 필수유지보수의 상관관계는 유지보수 시점에 큰 영향을 키친다고 볼 수 없으나, 평가된 파괴확률에는 상이한 차이를 보임을 알 수 있다.

본 최적화 문제에서 구조요소 1, 2과 3에 대해 각각 2, 3, 6회

Table 2 Formulation of optimization problem

Objective	Minimize $p_{F,parallel}$ at 60 years
Design variables	$t_{int,1}; t_{int,2}; t_{int,3}$
Constraints	$2 \text{ years} \leq t_{int,i} \leq 40 \text{ years}$
Given	$m_1 = 2; m_2 = 3; m_3 = 6$

Table 3 Optimum essential maintenance time interval and the associated probability of failure for the parallel system

Component correlation	Maintenance correlation	Time interval between maintenances t_{int} (years)			Probability of failure p_F
		Component 1	Component 2	Component 3	
Independent	Independent	20.09	15.02	5.70	0.023
	Perfectly correlated	20.03	15.03	5.34	0.002
Perfectly correlated	Independent	20.06	11.86	4.04	0.075
	Perfectly correlated	20.03	12.27	4.67	0.026

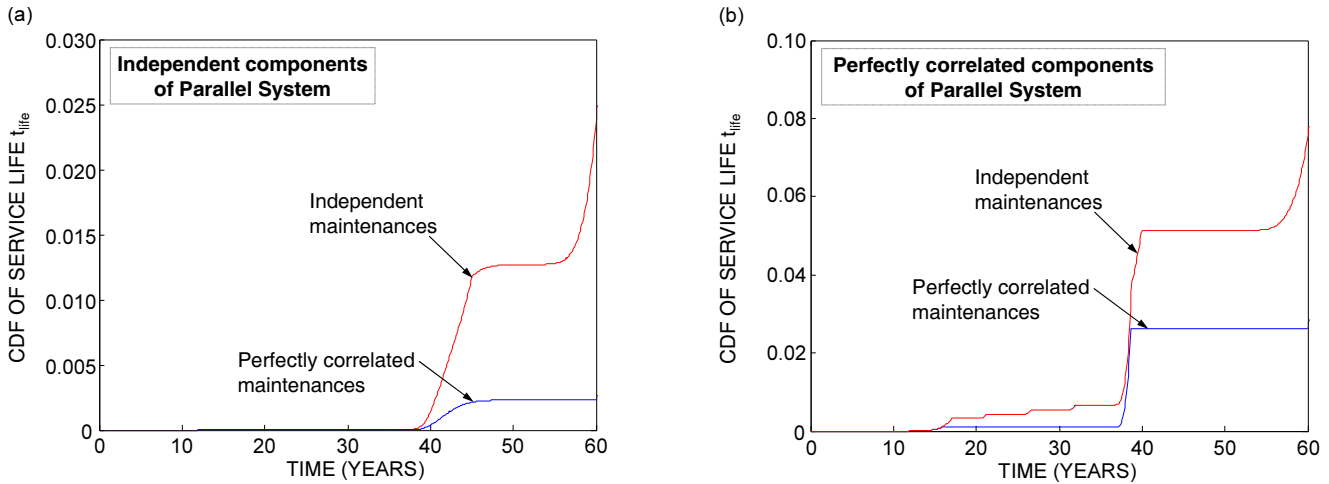


Fig. 8 CDFs of extended service lives with optimum essential maintenance associated with Table 3: (a) independent components; (b) perfectly correlated components

로 가정된 유지보수 적용 횟수는 일반적으로 구조물의 최초 수명 및 성능을 고려하여 최소유지보수 비용이 발생되도록 결정하게 되는데, 유지보수 비용의 최소화와 구조물의 목표 수명에서의 파괴확률 최소화를 목적으로 다중 목적 최적화문제(Multi-objective optimization problem)로 확대적용이 가능하다.

4. 결론

본 논문에서는 구조시스템을 구성하는 구조요소의 상관관계와 유지보수 간의 상관관계를 동시에 고려하는 확률론적 수명예측을 통해 최적화 수명관리에서의 영향을 분석하였다. 유지보수의 대표적인 두 가지 모델인 예방유지보수와 필수유지보수에 대해 수명연장효과를 반영하는 확률론적 모델링을 통해 목표 수명동안 구조시스템의 파괴확률을 최소화하는 최적화 유지보수 시간 간격을 수립하게 된다. 본 연구에서 제시된 구조요소 및 유지보수 간의 상관관계 영향을 고려한 실제 구조물 확률론적 수명 평가와 유지보수 전략수립을 위해서는 전체 구조물을 구성하는 구조요소의 적절한 모델링과 적용 가능한 유지보수를 고려한 수명연장효과와 정량적 평가가 좀 더 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 원광대학교 교비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Alampalli, S. (2014), Bridge Maintenance. Bridge Engineering Handbook, Second Edition, CRC Press, 269-300.
2. Ang, A. H.-S., and Tang, W. H. (1984), Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol. II, John Wiley & Sons, New York.
3. Cheng, X., Duan, L., and Najjar, W.S. (2014), Rehabilitation and Strengthening of Highway Bridge Superstructures. Bridge Engineering Handbook, Second Edition, CRC Press. 443-488.
4. Das, P.C. (1999), Prioritization of Bridge Maintenance Needs, In Case Studies in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructure Systems, D.M. Frangopol, ed. ASCE, Reston, VA, 26-44.
5. Frangopol, D.M. (2011), Life-cycle Performance, Management, and Optimization of Structural Systems under Uncertainty: Accomplishments and Challenges, *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, 7(6), 389-413.
6. Frangopol, D.M., and Kim, S. (2011), Service life, reliability and maintenance of civil structures, Chapter 5 in Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures, L.S. Lee and V. Karbari, eds., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, U.K., 145-178.
7. Frangopol, D.M., Kong, J.S., and Gharaibeh, E.S. (2001), Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges, *Journal of Computing in Civil engineering*, ASCE, 15(1), 27-34.
8. Furuta, H., Frangopol, D.M., and Nakatsu, K. (2011), Life-cycle Cost of Civil Infrastructure with Emphasis on Balancing Structural Performance and Seismic Risk of Road Network, *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, 7(1-2), 65-74.
9. Kececioglu, D.B. (1995), Maintainability, Availability, and Operational Readiness Engineering Handbook, Vol. 1. Prentice Hall, New Jersey.
10. Kim, S., Frangopol, D.M., and Zhu, B. (2011), Probabilistic Optimum Inspection/Repair Planning to Extend Lifetime of Deteriorating Structures. *Journal of Performance of Constructed*

Facilities, ASCE, 25(6), 534-544.

11. Klaassen, K.B., and van Peppen, J.C.L. (1989), *System Reliability: Concepts and Applications*, Distributed in the USA by Routledge. Chapman, and Hall, E. Arnold, New York.
12. Leemis, L.M. (1995), *Reliability, Probabilistic Models and Statistical Methods*, Prentice Hall, New Jersey.
13. MathWorks (2015), *Optimization Toolbox 3 User's Guide*, MathWorks, Natick, MA.
14. NCHRP (2006), *Manual on Service Life of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Bridge Superstructure Elements*, NCHRP Report 558. Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC.
15. Ramakumar, R. (1993), *Engineering Reliability: Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, New Jersey.
16. Yang, S-I., Frangopol, D.M., and Neves, L.C. (2006), Optimum Maintenance Strategy for Deteriorating Structures based on Lifetime Functions, *Engineering Structures*, Elsevier, 28(2), 196-206.
17. Zhu, B., and Frangopol, D.M. (2012), Reliability, redundancy and risk as performance indicators of structural systems during their life-cycle. *Engineering Structures*, Elsevier, 41(0), 34-49.

Received : 08/04/2015

Revised : 10/03/2015

Accepted : 11/04/2015

요 지 : 구조물의 수명관리는 일반적으로 불확실성의 효율적 고려를 위해 신뢰성 이론을 적용한다. 전체 구조시스템의 신뢰성 평가는 구조요소의 신뢰성 평가와 구조시스템의 모델링을 통해 이루어진다. 구조시스템은 신뢰도에 대한 구조요소의 역할과 기여도를 고려하여 모델링된다. 따라서, 구조시스템의 신뢰도는 구조요소의 모델링과 구조요소의 상관관계에 따라 서로 다른 결과를 제시하게 된다. 최초 구조시스템의 신뢰도 평가와 열화요소를 반영한 구조시스템의 수명 평가를 바탕으로 생애주기 비용 최소화와 관련된 목적함수를 가지는 최적화 과정을 통해 수명관리가 이루어진다. 본 논문에서는 구조시스템을 구성하는 구조요소의 상관관계와 더불어 기존의 연구에서 고려된 바 없는 유지보수 간의 상관관계에 따른 수명평가 영향분석을 수행하며, 이를 통해 향후 좀 더 효율적인 수명관리 기법 개발에 활용하고자 한다. 또한, 예방유지보수와 필수유지보수를 모두 고려하며, 유지보수간 독립 상태와 완전상관 상태에 따른 수명 예측 및 최적화 유지보수 계획 수립을 비교 제시한다.

핵심용어 : 상관관계, 유지보수, 생애주기, 사용수명, 구조신뢰성
