

확률론적 생애주기비용-이익분석 기반 수명관리 최적화 기법

김선용*

¹원광대학교 토목환경공학과

Optimum Service Life Management Based on Probabilistic Life-Cycle Cost-Benefit Analysis

Sunyong Kim¹*

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University

요약 사회기반시설물을 포함한 구조물은 수명유지 또는 연장을 위하여 적절한 점검과 유지보수가 필수적이다. 이러한 점검과 유지보수는 일반적으로 생애주기비용 평가를 통해 관련 계획이 수립된다. 본 논문에서는 구조물의 생애주기비용과 그 사용으로 인해 발생하는 이익을 고려하는 확률론적 비용-이익분석과 이를 통한 구조물 최적수명 결정 방법을 다루고자 한다. 생애주기비용은 구조물 초기 제작/건설비용, 유지보수 비용과 구조물 파괴로 인한 예상손실을 고려하게 된다. 일반적으로 구조물의 수명연장은 생애주기비용의 증가를 유발하나 사용기간 증가로 인해 발생하는 이익 또한 증가하여, 이를 최적화하는 수명관리에 관심을 가질 필요가 있다. 생애주기 평가에 있어서 유지보수 적용이 구조성능, 구조물 파괴확률 그리고 수명에 미치는 영향을 확률론적 방법을 적용하여 평가하며, 이를 통해 생애주기비용과 이익의 차이를 목적함수로 구성하게 된다. 이 목적함수가 최대가 되는 지점이 설계변수인 구조물 최적수명이 되는데, 최적화문제 구성에 있어서 제한조건의 변화에 따라 유지보수 계획수립도 가능하다. 본 논문에서 다루어지는 구조물 수명관리 최적화기법이 안전성과 효율성을 동시에 고려하는 사회기반시설물 수명관리에 기여할 것으로 기대한다.

Abstract Engineering structures including civil infrastructures require a life-cycle cost and benefit during their service lives. The service life of a structure can be extended through appropriate inspection and maintenance actions. In general, this service life extension requires more life-cycle cost and cumulative benefit. For this reason, structure managers need to make a rational decision regarding the service life management considering both the cost and benefit simultaneously. In this paper, the probabilistic decision tool to determine the optimal service life based on cost-benefit analysis is presented. This decision tool requires an estimation of the time-dependent effective cost-benefit under uncertainty to formulate the optimization problem. The effective cost-benefit is expressed by the difference between the cumulative benefit and life-cycle cost of a deteriorating structure over time. The objective of the optimization problem is maximizing the effective cost-benefit, and the associated solutions are the optimal service life and maintenance interventions. The decision tool presented in this paper can be applied to any deteriorating engineering structure.

Keywords : Benefit, Civil Infrastructure, Life-Cycle Cost, Maintenance, Optimization, Service Life Management

1. 서론

사회기반시설물을 포함하는 구조물은 다양한 형태의

비용(cost)과 이익(benefit)을 수반하며, 구조물의 설계와 계획과정에서 이러한 비용과 이익에 대한 평가를 수행한다[1,2,3]. 특히, 사용 중인 구조물의 경우 구조적 성능과

본 논문은 2016년도 원광대학교 연구비 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Sunyong Kim(Wonkwang Univ.)

Tel: +82-63-850-6716 email: sunyongkim@wku.ac.kr

Received February 5, 2016

Revised April 6, 2016

Accepted April 7, 2016

Published April 30, 2016

수명유지/연장을 위해 생애주기비용(life-cycle cost) 평가를 바탕으로 적절한 유지보수 계획(maintenance intervention)을 수립하고 적용한다[3,4]. 최근 몇 년간 구조물의 수명관리(service life management)는 생애주기비용 평가를 기반으로 한 최적화(optimization) 기법이 적용되어왔다[5,6,7]. 일반적으로 사회기반시설의 생애주기비용 평가는 구조물의 안전성, 구조적 성능과 가치 평가를 통합하는 기법으로 구조물의 초기 제작/건설비용, 유지보수 비용과 구조물 열화로 인한 성능감소와 파괴에 따른 예상손실을 고려한다. 또한 구조물의 유지보수(maintenance)가 구조성능(structural performance)과 사용수명(service life)에 미치는 영향을 고려하게 된다[8]. 구조물의 성능향상과 수명연장은 생애주기비용의 증가를 유발하나 사용기간 증가로 인해 발생하는 이익 또한 증가하여, 이를 최적화하는 수명관리에 관심을 가질 필요가 있다.

본 논문에는 구조물의 생애주기비용과 그 사용으로 인해 발생하는 이익을 고려하는 확률론적 생애주기비용-이익분석을 통한 새로운 구조물 최적수명 결정 방법을 제시하고자 한다. 생애주기비용 평가에 있어서 유지보수의 적용이 사용수명과 구조물 파괴확률에 미치는 영향을 확률론적 방법을 적용하여 평가하며, 이를 통해 생애주기비용과 이익의 차이를 목적함수로 구성한다. 이 방법론에서는 목적함수가 최대가 되는 지점이 설계변수인 구조물 최적수명이 된다. 최적화문제 구성에 있어서 제한조건의 다양한 변화에 따라 최적수명 결정뿐 아니라 구조물 유지관리 전략 수립 또한 가능하다. 본 논문에서 다루어지는 구조물 수명관리 최적화기법이 안전성과 효율성을 동시에 고려하는 구조물 수명관리에 기여할 것으로 기대한다. 또한 이 구조물 수명관리 기법은 사회기반시설물에만 국한되지 않고 다양한 구조물에 적용 가능하다.

2. 생애주기비용-이익 분석

생애주기비용-이익 분석은 구조물의 사용기간 동안 발생하는 이익과 소요되는 비용을 분석하는 절차로서 일반적으로 사회기반시설물에서는 그 계획과 설계과정에서 이를 일부 수행한다[9]. 사회기반시설물의 수명기간 중 발생하는 비용인 생애주기비용은 초기설계와 건설비용, 운영비용, 유지보수 비용 등을 포함하며, 사용자의

편의로 인해 얻어지는 직간접 사용자 비용을 이익으로 간주한다. 이 이익 C_{ben} 과 생애주기비용 C_{life} 의 차이를 순이익(effective benefit), C_{eff} 이라 하며 다음과 같이 표현한다[10].

$$C_{eff} = C_{ben} - C_{life} \quad (1)$$

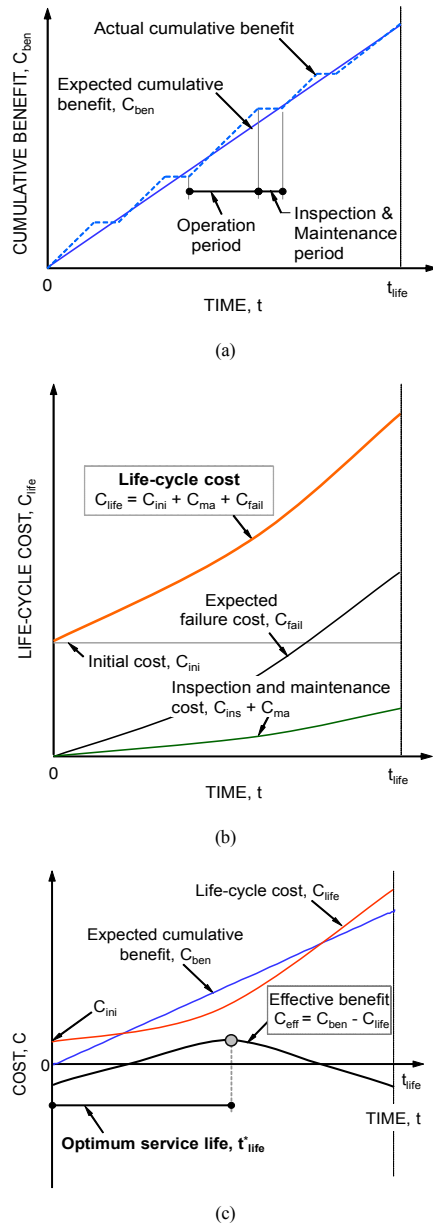


Fig. 1. Time-dependent cost and benefit profiles
(a) Cumulative benefit (b) Life-cycle cost
(c) Effective benefit

C_{ben} 와 C_{life} 의 불확실성을 고려하여 확률변수로 취급할 경우 구조물의 특정수명기간에서 C_{eff} 이 양의 값을 가질 확률 P_{ben} 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{ben} = P(C_{eff} \geq 0) = P(C_{ben} \geq C_{life}) \quad (2)$$

시간 t 에서의 C_{ben} 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{ben} = \int_0^t R_{av} C_{ben,un} dt \quad (3)$$

여기서, R_{av} 는 가용성(availability)으로 전체구조물의 수명과 구조물 순사용기간의 비율을 나타내며[11], $C_{ben,un}$ 은 단위시간당 이익을 나타낸다. 또한 생애주기비용 C_{life} 는

$$C_{life} = C_{ini} + C_{ma} + C_{fail} \quad (4)$$

이며, 여기서, C_{ini} 는 초기 건설비용, C_{ma} 는 점검 (inspection)과 유지보수(maintenance)를 포함하는 비용 그리고 C_{fail} 은 구조물의 손상과 파괴로 인해 발생하는 예상손실비용을 말한다. C_{fail} 는 다음의 식을 통해 구할 수 있다.

$$C_{fail} = P_f C_f \quad (5)$$

여기서, P_f 는 파괴확률(probability of failure), C_f 는 구조물의 파괴로 인해 발생하는 손실(monetary loss)을 나타낸다. Fig. 1에서는 시간에 따른 구조물에 사용으로 발생하는 이익 C_{ben} 과 생애주기비용 C_{life} 을 도식화하였다.

3. 생애주기비용-이익 분석 기반 최적수명 결정

한정된 예산의 효율적 적용과 사회기반시설물의 수명연장을 위해서는 최적유지보수 전략수립이 필수적이다 [12,13]. 본 논문에서는 구조물의 유지보수에 따른 수명영향 그리고 생애주기비용-이익 분석을 통합하는 최적수명관리 의사결정도구 방법을 제시한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 구조물의 사용수명 증가에 따라 C_{ben} 와 C_{life} 는 모두 증가하게 되며, 두 값의 차이인 C_{eff} 이 최대가 되는 지점이 최적수명으로 정의한다. 이 최적수명은 C_{ben} 와 C_{life} 의 시간의존적 형상에 따라 Fig. 2에서와 같이 3가지의 경우로 나눌 수 있다. Case 1에서는 C_{eff} 이 지속적으로 증가하여, 구조물의 최적수명을 결정할 수 없는 경우

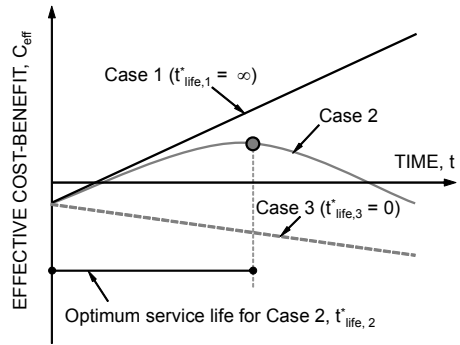


Fig. 2. Effective benefit over time

를 나타내며, Case 3에서는 C_{eff} 이 지속적으로 감소하여, 구조물의 최적수명이 0인 경우를 도식화 하였다.

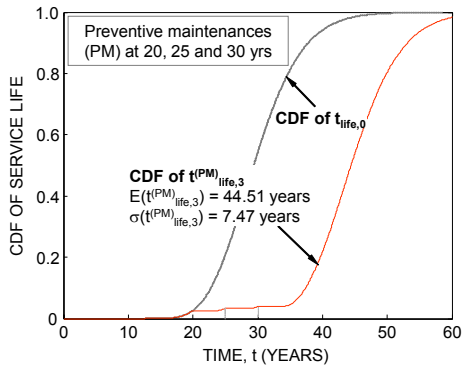
3.1 유지보수에 따른 수명연장

구조물의 성능향상과 수명연장을 위한 유지보수는 크게 예방유지보수(preventive maintenance, PM)와 필수유지보수(essential maintenance, EM)로 나뉜다. 예방유지보수는 사전에 정해진 시간에 적용되어 구조물의 열화를 지연시킨다. i 번째 예방유지보수의 적용에 따라 연장된 구조물의 수명 $t_{life,i}^{(PM)}$ 을 다음과 같이 나타낸다[14].

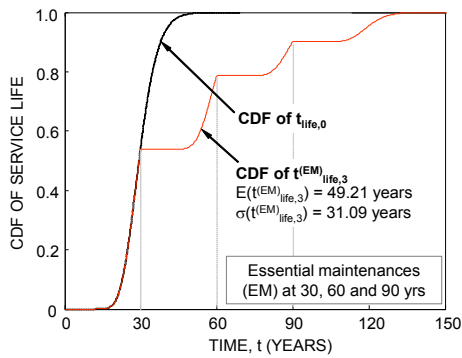
$$t_{life,i}^{(PM)} = \begin{cases} t_{life,i-1}^{(PM)} & \text{for } t_i^{(PM)} > t_{life,i-1}^{(PM)} \\ t_{life,i-1}^{(PM)} + t_{ex}^{(PM)} & \text{for } t_i^{(PM)} \leq t_{life,i-1}^{(PM)} \end{cases} \quad (6)$$

여기서, $t_{ex}^{(PM)}$ 는 예방유지보수로 인해 연장된 수명이다. 유지보수는 구조물이 그 사용수명에 도달하기 전에 적용해야 유효하다. 즉, 구조물 사용수명 이후 ($t_i^{(PM)} > t_{life,i-1}^{(PM)}$) 예방유지보수의 적용으로 인한 수명연장은 존재하지 않는다($t_{ex}^{(PM)} = 0$). 또한 필수유지보수는 구조 성능이 한계에 도달할 경우 적용하는 유지보수로써 연장되는 수명과 구조성능의 향상에 있어서 예방유지보수보다 더 유리하지만, 더 많은 비용이 소요된다. 필수유지보수는 일반적으로 구조요소의 전면적 강화와 교체와 관련되며, 그에 따른 수명연장을 다음과 같이 표현할 수 있다 [14].

$$t_{life,i}^{(EM)} = \begin{cases} t_{life,i-1}^{(EM)} & \text{for } t_i^{(EM)} > t_{life,i-1}^{(EM)} \\ t_{life,i-1}^{(EM)} + t_{life,0} & \text{for } t_i^{(EM)} \leq t_{life,i-1}^{(EM)} \end{cases} \quad (7)$$



(a)

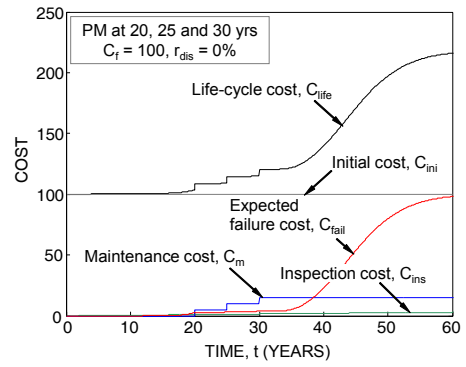


(b)

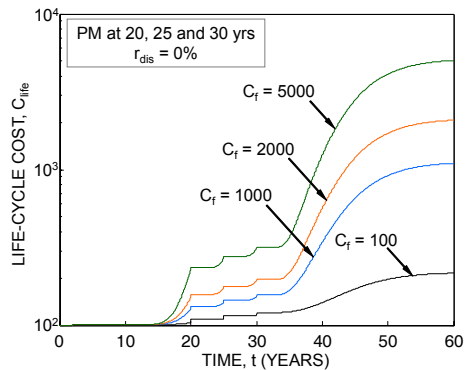
Fig. 3. Effect of maintenance on CDF of the extended service life
(a) Preventive maintenance (b) Essential maintenance

여기서, $t_{life,0}$ 는 구조물의 최초수명이다. 즉, 필수유지보수로 인해 구조물은 최소의 성능을 가진다고 볼 수 있다.

구조물의 최초수명 $t_{life,0}$ 이 평균(mean) 30년과 표준편차(standard deviation) 6년을 가지는 로그정규분포로 표현될 때 예방유지보수와 필수유지보수가 적용된 누적분포함수(CDF: cumulative density function)를 Fig. 3에 도식화하였다. 여기서, 예방유지보수로 인한 수명연장 $t_{ex}^{(PM)}$ 은 평균 5년과 표준편차 1년을 가지는 로그정규분포를 따른다고 가정한다. 이 CDF는 구조물의 연장된 수명이 특정시간 t 보다 작을 확률을 나타내는 것으로, Fig. 3(a)에서 보는바와 같이 예방유지보수를 20년, 25년 그리고 30년에 적용할 경우 그 구조물의 수명은 최초 평균 30년에서 44.51년으로 연장됨을 볼 수 있다. 또한 Fig. 3(b)는 필수유지보수를 30년, 60년 그리고 90년에 적용할 경우 연장된 평균수명의 CDF를 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Life-cycle cost over time for $C_f = 100$
(b) Effect of the expected monetary loss C_f on life-cycle cost C_{life}

3.2 최적사용수명 결정

주어진 유지보수계획이 적용될 경우 최적수명 t_{life}^* 을 결정하기 위한 최적화 문제를 생애주기비용-이익 기반으로 다음과 같이 구성한다.

$$\text{Find } t_{life}^* \tag{8a}$$

$$\text{to maximize } C_{eff} \tag{8b}$$

$$\text{such that } P_f \leq P_{crit} \tag{8c}$$

$$\text{given } t_{ex}^{(PM)}, \mathbf{t}_{PM} = \{t_{PM,1}, t_{PM,2}, t_{PM,3}\} \tag{8d}$$

일반적으로 최적화문제는 목적함수(objective function), 설계변수(design variables)와 제한조건(constraints) 등으로 구성된다. 여기서, 목적함수는 C_{eff} 의 최대화이며, 설계변수는 앞서 언급한 바와 같이 최적수명 t_{life}^* 이 된다. 또한 구조물의 수명기간 중 파괴확률 P_f 가 한계값 $P_{crit} = 0.2$ 를 넘지 않도록 가정하였으며, 이 밖의 조건은 Fig.

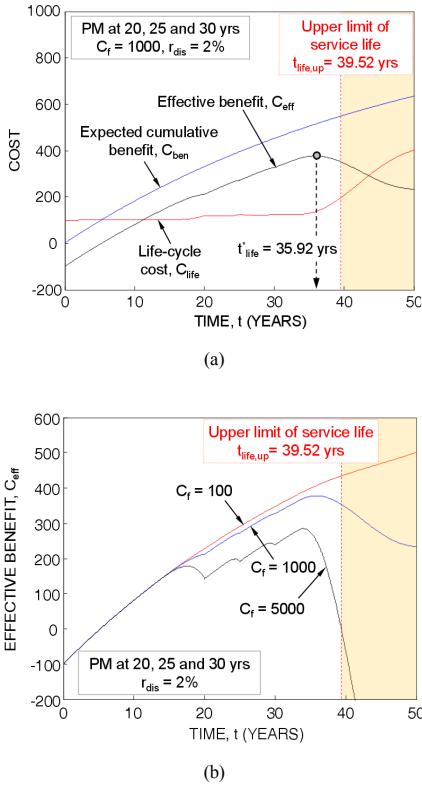


Fig. 5. (a) Effective benefit C_{eff} over time and optimum service life t_{life}^* (b) Effect of the expected monetary loss C_f on optimum service life t_{life}^*

3(a)에 적용된 바와 같다. Eq. (1)에서 보는 바와 같이 C_{eff} 는 C_{ben} 와 C_{life} 의 차이로 $C_{im} = 100$, C_{ma} 는 매 2년 마다 수행되는 점검과 관련된 비용 $C_{ms} = 0.1$ 그리고 예방유지보수비용 $C_m = 5$ 을 합하여 구해진다. 구조물의 손상과 파괴로 인해 발생하는 예상손실비용 C_{fail} 의 평가에 있어서 파괴확률 P_f 는 Fig. 3(a)의 CDF인 $P(t^{(PM)}_{life,3} \leq t)$ 로 계산된다. 또한 C_{ben} 평가에서는 가용성 $R_{av} = 1$ 과 $C_{ben,un}$ 이 매년 일정한 값인 20을 가진다는 가정을 적용한다. C_{fail} 에서의 C_f 가 100일 경우 시간에 따른 생애주기비용과 이를 구성하는 비용을 Fig. 4(a)에 도식화하였다. 또한 C_f 값이 100, 1000, 2000과 5000일 경우 시간에 따른 생애주기비용을 Fig. 4(b)에서 찾아 볼 수 있다.

Eq. (8)에서 정의된 최적화 문제는 MATLAB(R2015b)의 optimization toolbox에서 제공되는 genetic algorithm을 적용하였다. Fig. 5(a)에서는 $C_f = 1000$ 일 경우 시간에 따른 C_{eff} , C_{ben} 와 C_{life} 의 변화를 나타낸다. 여기서, 연

Table 1. Optimum service life and maximum effective cost benefit

Failure cost C_f	Optimum service life t_{life}^* (years)	Max. effective benefit C_{eff}
100	39.52	356.29
500	38.71	331.90
1000	35.92	316.18
2000	34.95	297.01
5000	34.10	249.35

장수명의 상한선(upper limit of service life) $t_{life,up} = 39.52$ 년은 Fig. 3(a)에서 보듯이 파괴확률의 한계값 $P_{crit} = P(t^{(PM)}_{life,3} \leq t) = 0.2$ 에 해당되어 본 최적화문제에서는 최적수명이 이를 넘지 않도록 제한하였다. 결과적으로, 최적수명 t_{life}^* 은 C_{eff} 이 최대가 되는 시점에 해당되는 35.92년으로 볼 수 있다. 또한 C_f 의 변화에 따른 t_{life}^* 의 영향을 Fig. 5(b)에 나타내었으며, 여기에 해당되는 t_{life}^* 와 C_{eff} 의 값을 Table 1에 제공하였다. Fig. 5(b)와 Table 1에서 보는 바와 같이 C_f 의 증가에 따라 최적수명 t_{life}^* 이 줄어드는 경향을 볼 수 있는데, 이는 구조물의 파괴로 인한 손실 C_f 가 클수록 C_{life} 의 C_{fail} 가 증가하게 되어 t_{life}^* 이 줄어들게 되는 것이다.

3.3 최적사용수명과 유지보수 시기 결정

유지보수의 시기와 최적수명을 동시에 결정하기위해 다음과 같이 최적화 문제를 구성할 수 있다.

$$\text{Find } t_{life}^* \text{ and } \mathbf{t}_{PM} = \{t_{PM,1}, t_{PM,2}, t_{PM,3}\} \quad (9a)$$

$$\text{to maximize } C_{eff} \quad (9b)$$

$$\text{such that } P_f \leq P_{crit} \quad (9c)$$

$$\text{given } t^{(PM)}_{ex} \quad (9d)$$

이 최적화 문제에서는 C_{eff} 가 최대가 되는 설계변수인 최적수명 t_{life}^* 과 예방유지보수의 시점인 $\mathbf{t}_{PM} = \{t_{PM,1}, t_{PM,2}, t_{PM,3}\}$ 을 계산한다. 그 밖의 조건은 이전 최적화문제의 적용조건과 동일하다. Table 2에서는 C_f 값에 따른 설계변수와 목적함수의 값이 제공된다. 즉, C_f 값이 1000일 경우 예방유지보수를 8.21년, 16.11년 그리고 26.46년도에 적용하면, 목적함수 C_{eff} 가 561.63으로 최대가 되며, 따라서, 최적수명은 35.42년이 된다. 또한 비용과 이득계산시 연간 2%의 할인율을 적용할 경우 최대 C_{eff} 와 C_f 와의 관계를 Fig. 6에서 볼 수 있다.

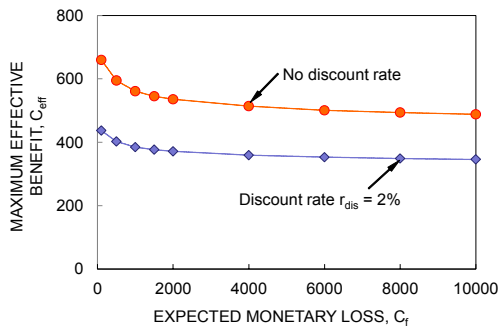


Fig. 6. Relation of the expected monetary loss C_f to the maximum effective benefit C_{eff}

Table 2. Design variable and objective function values

Expected monetary loss C_f	Objective values C_{eff}	Design variables			
		Preventive maintenance time (years)			Service life (years)
		$t_{pm,1}$	$t_{pm,2}$	$t_{pm,3}$	t_{life}^*
100	668.65	10.85	19.25	29.28	39.68
1000	561.63	8.20	16.11	26.46	35.42
10000	489.66	8.14	15.42	23.14	30.88

4. 결론

본 논문에는 사회기반시설물을 포함하는 구조물의 생애주기비용과 그 사용으로 인해 발생하는 이익분석을 기반으로 하는 최적수명결정 방법을 제시하였다. 구조물의 수명과 이를 바탕으로 하는 파괴확률 그리고 생애주기비용에 포함되는 초기비용, 유지관리비용과 구조물 사용기간 중 발생하는 이익을 고려하여 최적수명을 결정하게 되는데 이를 바탕으로 구조물 수명관리에 적용되는 유지보수 시점도 결정할 수 있음을 보였다. 본 논문에서 다루어지는 구조물 수명관리 최적화기법을 통해 안전성과 효율성을 동시에 고려하는 수명관리에 기여할 것으로 기대한다. 여기서 제시된 방법은 다양한 사회기반시설물에 적용가능하나, 실질적인 적용을 위해서는 구조물의 시간에 따른 구조성능 저하와 유지보수의 효과를 반영하는 정확한 모델링 그리고 비용산정에 필요한 요소의 보다 신뢰성 있는 정보를 기반으로 하는 평가가 수반되어야 한다.

References

- [1] Sage, A.P., and Rouse, W.B. "Cost-benefit and cost-effectiveness analyses and assessments," Chapter 6 in Economic, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, U.S., pp. 251-296, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118015490.ch6>
- [2] Helm, D., and Thompson, D. "Privatized transport infrastructure and incentives to invest," Journal of Transport Economics and Policy, London School of Economics and Political Science, 25(3), pp. 231-246, 1991.
- [3] Garvin, M. J., and Cheah, C. Y. J. "Valuation techniques for infrastructure investment decisions," Construction Management and Economics, Routledge, 22(4), pp. 373-383, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01446190310001649010>
- [4] ASCE. Report Card for America's Infrastructure. American Society of Civil Engineers(ASCE), Reston, VA.
- [5] Asiedu, Y., and Gu, P. "Product life cycle cost analysis: State of the art review," International Journal of Production Research, Taylor and Francis, 36(4), pp. 883-908, 1998. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/002075498193444>
- [6] Layer, A., Brinke, E.T., Houten, F.V., Kals, H., and Haasis, S. "Recent and future trends in cost estimation," International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Taylor and Francis, 15(6), pp. 499-510, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09511920210143372>
- [7] Frangopol, D.M., and Maute, K. "Life-cycle reliability-based optimization of civil and aerospace structures," Computers & Structures, Elsevier, 81(7), pp. 397-410, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00020-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00020-8)
- [8] IAEA. Safety and Effective Nuclear Power Plant Life Cycle Management towards Decommissioning. IAEA-TECDOC-1305, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2002.
- [9] Cellini, S.R., and Kee, J.E. "Cost-effectiveness and cost-benefit analysis," Chapter 21 in Handbook of Practical Program Evaluation, 3rd edn, Wholey, J.S., Hatry, H.P., and Newcomer, K.E., eds., Jossey-Bass, San Francisco, U.S., pp. 493-530, 2010.
- [10] Carmichael, D.G. Infrastructure Investment: An Engineering Perspective. CRC Press-Taylor & Francis Group, London, U.K, 2014.
- [11] White, V.S., Copinger, D.A., and Reid, R.L. U.S. Nuclear Power Plant Operating Cost and Experience Summaries. NUREG/CR-6577, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2001.
- [12] NCHRP. 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, 2006.
- [13] Kim, S., Frangopol, D.M., and Soliman, M. "Generalized probabilistic framework for optimum inspection and maintenance planning," Journal of Structural Engineering, ASCE, 139(3), pp. 435-447, 2013.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000676](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000676)

- [14] Kim, S., Frangopol, D.M., and Zhu, B. "Probabilistic optimum inspection/repair planning to extend lifetime of deteriorating RC structures," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 25(6), pp. 534 - 544, 2011.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000197](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000197)

김 선 용(Sunyong Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한국과학기술원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2011년 5월 : Lehigh University 토목공학 (공학박사)
- 2012년 5월 ~ 2015년 2월 : 한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 원광대학교 토목환경공학과 조교수

<관심분야>

구조물 유지관리, 확률론적 구조해석