

기능특성을 고려한 생애주기 비용합수

Life Cycle Cost Method by Segregation of Safety and Function

이준구* · 김한중** · 윤성수*** · 최원**** · 이형진**** · 김종옥***** · 정남수***** · 이정재*****†
 Joon-Gu Lee* · Han-Jung Kim** · Seong-Su Yoon*** · Won Choi**** · Hyung-Jin Lee*****
 Jong-Ok Kim***** · Nam-Su Jung***** · Jeong-Jae Lee*****†

Abstract

An advanced model for assessing life cycle cost of the facility containing several subdivisions has been proposed with systems engineering approach. This model evaluates the maintenance cost in the sphere of the safety as well as in that of its functionality. The proposed approach has been shown to be more reasonable and practical than existing models. The serviceability and reasonability have been proved through evaluating life cycle cost of the reservoir which is a representative agricultural facility. In addition, the proposed method is helpful to make a maintenance strategy using the survival probability in the point of safety and functionality.

Keywords : Life Cycle Cost, Reservoir, Survival Probability, Life Time Distribution Function, FTA, AHP

1. 서 론

생애주기비용은 원래 시스템엔지니어링에서 반드시 다루어져야 하는 부분으로서 체계적인 사고를 통해 보다 나은 새로운 시스템을 개발하는데 필수인자로서 분석되고 있다. 사회간접자본 시설을 다루는 분야에서도 여러 요소가 하나의 목적을 위해 그 기능을

발휘하는 형태의 시설물들을 하나의 시스템으로 보고 시스템엔지니어링 분석기법들을 적용하여 분석하고 있다. 대표적인 농업용 시설물인 저수지는 제체시설, 여수방류시설, 취수시설로 나눌 수 있으며, 이들은 물을 가두어 농업용수를 공급하는 목적을 달성하기 위해 각각의 기능을 수행한다. 또한 홍수와 같은 기상재해로부터 안전해야 한다는 특징을 갖는다. 농업용 저수지를 정밀안전대상 시설물로 분류하여 5년마다 1회의 비율로 진단을 실시하고 있는 이유도 이러한 특징 때문일 것이다. 실제 유지보수의 이력자료를 분석하여도 안전확보를 위한 유지보수와 기능확보를 위한 유지보수로 구분이 가능하다. 즉, 농업용수를 공급해야하는 기능적 특징과 재해로부터 안전을 유지해야하는 특징을 갖는 이러한 시설물의 생애주기비용을 기능특성을 반영하여 현실적으로 산출할 필요가 있으므로 농업시설물의 기능특성을 분석하는

* 한국농촌공사 강화지사 차장
 ** 환경대학교 지역자원시스템공학과 교수
 *** 충북대학교 지역건설공학전공 교수
 **** 서울대학교 지역시스템공학전공 대학원
 ***** 공주대학교 지역건설공학전공 교수
 ***** 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 교수
 † Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4581
 Fax: +82-2-873-2087
 E-mail address: lj@snuc.ac.kr

2008년 7월 17일 투고
 2008년 11월 4일 심사완료
 2008년 11월 4일 게재확정

시스템적 접근방법을 조사하고, 현재 사용되고 있는 생애주기비용함수를 검토하여, 안전측면과 기능측면의 유지관리가 이루어져야 하는 농업시설물에 대해 적용이 가능하도록 생애주기비용함수를 개선할 필요성이 있다.

생애주기비용(Life Cycle Cost)연구는 초기투자비와 유지관리비의 관계에서 초기투자비가 크면 유지관리비가 작고, 초기투자비가 작으면, 유지관리비가 큰 특징에서 시스템 생애기간동안의 할인율을 고려하여 시스템 설계 시 그 생애기간동안 최소기대비용이 발생되도록 설계하는 경제성 분석연구(Lee, 1994)로서 시스템엔지니어링에서 주로 다루어지는 분야다. 최근 사회간접자본시설부분에서도 공공시설물의 설계 시 경제성 평가를 의무화(Construction Engineering Management Act, 2000, Administrative Law at dept. of Transportation(USA), 1994)하는 등 생애주기비용에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Kim, 1999; Im, 1999; Sim, 2000; An, 2001; Yang, 2002; Kong, 2001; Frangopol, 1997; Noortwijk, 2004). 생애주기비용연구는 사업의 타당성 평가를 위한 경제성 분석연구뿐만 아니라 기존 시설물의 유지관리 분야에서도 활용되고 있다.

국내의 생애주기비용함수를 이용한 연구는 건축분야에서 가장 많았으며, 특히 공동주택 및 건축설비의 투자효율 경제성 평가에 관한 연구가 주를 이룬다(Park, 2002; Kang, 2003). 교량에 적용한 사례도 많았는데 구(1996)는 강구조 교량과 콘크리트 교량의 시공 및 철거에서 발생하는 비용의 비교에 생애주기비용함수를 이용하였고, 한국강구조학회(1997,8)는 고속철도교량으로 RC박스거더교와 강합성교를 생애주기비용함수로서 비교하였다. 시설안전기술공단(2001)은 교량의 무보수, 현행, 사후, 예방유지관리 수준에 대한 생애주기비용 분석을 시도하였다. Frangopol(1997)은 노후구조물의 생애주기비용에 기초한 최적 유지관리 기법 모형을 개발하였으며, 양(2002)은 NATS(National Structures Database)의 데이터와 생애함수를 이용하여 교량의 최적 유지관리 전략을 제시하였다.

농업시설물에 대한 생애주기비용함수를 작성하기

위해서는 시스템을 분석하고, 구성요소로 재구성하여 파괴경로를 밝히며, 그 확률을 판단하는 함수를 결정하는 절차가 필요하다. 시설물의 기능특성을 분석하는 시스템적 접근방법으로 결함수 분석(FTA) 기법을 검토하고, 시스템의 구성요소간 중요도를 결정하는 의사결정도구인 계층분석법(AHP)의 장단점을 분석한다. 그리고, 요소의 생애분포특성을 표현하는 함수로 사용되는 생존함수, Weibull함수, 지수함수, Log-Logistic함수의 특징들을 비교한다. 시스템을 구성하는 이들 요소는 사용연한이 경과함에 따라 파괴확률이 증가하기 때문에 목표 내구연한을 충족하기 위해서는 일정 시점에서 유지보수를 받아야 하는데, 이러한 유지보수에 의한 생존확률의 개선을 생존함수에 표현하는 유지보수함수가 필요하다. 본 연구에서는 시스템의 유지보수를 보다 효율적으로 계획하고, 운영하기 위한 일련의 절차를 제시하고, 공용연한에 따른 시스템신뢰성기반의 생존확률 변화를 기능과 안전측면에서 관리할 수 있는 체계를 구성하고자 한다.

생애주기비용함수의 구성에 필요한 도구들을 검토하고 농업용 대표시설물인 저수지 사례를 들어 체계 구성 내용을 검증한다.

II. 비용함수의 개선

1. 생애주기 함수법

가. 함수 구성흐름

농업용 시설물 시스템의 생애주기비용함수 구성을 위해서는 Fig. 1과 같은 절차가 필요하다.

나. 단계별 분석과 적용

(1) System Decomposition

시스템을 구성하는 하부시스템, 요소, 이벤트단위로 시스템을 세분하는 것을 말하며, 시스템을 분석하여 세분하는 방법에는 결함수분석(FTA), 최소통과군(MPS)과 최소절단군(MCS) 등이 있는데 본 연구에서는 비교적 실제 데이터를 기반으로 분석하는 방법인 결함수분석법을 이용하였다.

(2) Component Classification

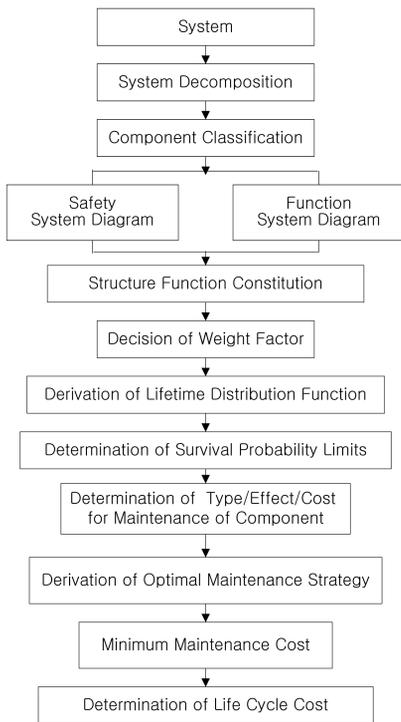


Fig. 1 Flowchart of life cycle cost function

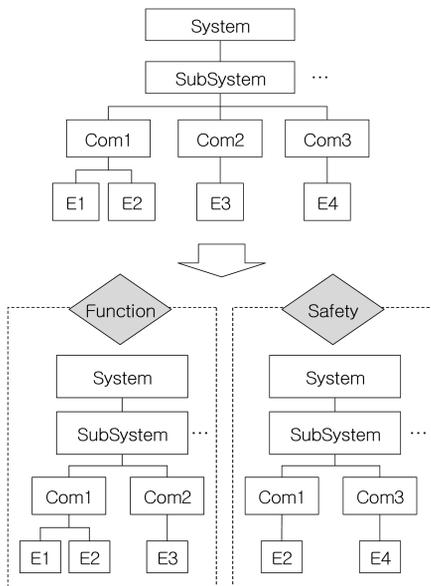


Fig. 2 System decomposition

시스템을 구성하는 요소를 안전과 기능에 관여하는 것으로 각각 그룹화 하는 것을 말하며, 중복되는

것도 허용한다. Fig. 2와 같이 첫 단계의 시스템 분석결과를 토대로 구성한다.

(3) Structure Function Constitution

이벤트, 요소, 하부시스템, 시스템의 관계를 Fig. 2와 같이 수계(Tree)형식으로 구성하고, 식 (1)~(3)의 함수를 구성하는 것을 말한다.

(4) Decision of Weight Factor

이벤트, 요소, 하부시스템이 바로 위 단계에 미치는 영향도(식 (1)~(3)에서 w)를 결정하는 것을 말하며, 첫 번째 단계에서 설명한 MPS나 MCS법에 의해 결정할 수 있는 방법과 의사결정기법 등을 이용하여 결정할 수 있는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 다수 대안에 대한 다면적 평가가 가능하여 비교적 복잡한 시스템에서도 적용이 용이한 특징을 가진 계층분석법(AHP)을 사용하였다.

(5) Derivation of Lifetime Distribution Function

이벤트, 요소, 하부시스템, 시스템의 생애분포함수를 유도하는 것을 말하며, Fig. 3과 같은 이벤트의 생애분포를 잘 표현하는 Weibull, Log-Logistic, Exponential power 함수 등이 사용되며 본 연구에서는 크기계수와 형상계수로서 다양한 분포특성의 표현이 가능한 Weibull 함수를 사용하였다. 이벤트의 생존함수를 구조함수에 대입함으로써 Fig. 4와 같은 시스템 생존함수를 얻게 된다. 여기서 생애분포함수의 유도는 다음과 같은 방법으로 수행되며 본 연구에서는 첫 번째 방법을 사용하였다.

1) 이벤트의 생애분포자료는 기존 시설물로부터 생애기간동안 축적된 정밀안전진단 등의 자료나 연구조사자료 등을 사용

2) 축적된 자료가 없는 경우 추정된 함수를 사용

3) 수명예측 모델이 있을 경우 이를 사용

(6) Determination of Limits of Survival Probability

요소의 생존확률한계를 결정하는 것으로 유지보수가 필요한 시점의 생존확률을 결정하는 것이다. 여기서 한계를 결정하는 방법에는 다음과 같은 것이 있으며 본 연구에서는 첫 번째 방법을 사용하였다 (Table 6, interval 결정).

1) 기존시설물의 유지보수 실적자료가 있는 경우

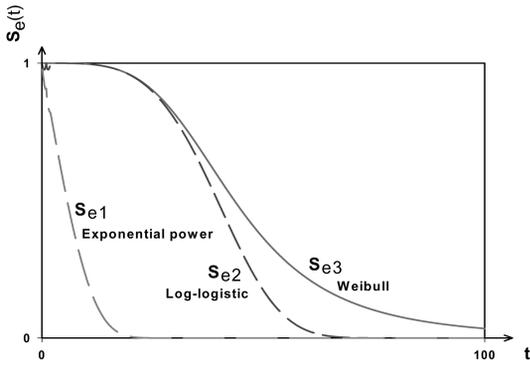


Fig. 3 Lifetime distribution function

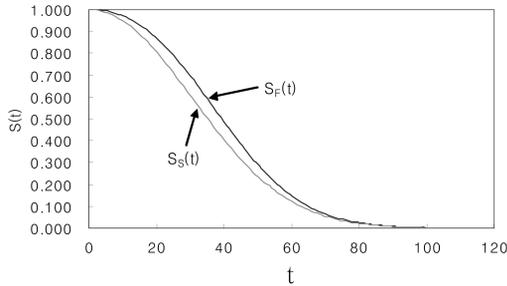


Fig. 4 Survivor function of system

이를 분석하여 결정.

- 2) 자료가 없는 경우 추정값 사용.
- 3) 수명예측 모델이 있는 경우 이를 사용.
- (7) Determination of Type/Effect/Cost for Maintenance Strategy

생애주기 동안 생존확률이 낮아지고 파괴확률이 커져가는 요소의 유지보수의 방법, 효과, 비용에 대한 결정을 의미하며 실적자료가 있으면 이를 분석하여 사용하고, 없는 경우 Table 1과 같은 형식으로 추정값을 사용하기도 한다. 본 연구에서는 실적자료를 통계분석하여 결정하였다(Table 6).

(8) Derivation of Optimal Maintenance Strategy 이상의 단계에서 얻은 자료를 통하여 시스템의 최적 유지관리 전략을 유도하는 단계로서 최적화프로그램이 사용된다.

(9) Minimum Maintenance Cost

최적화를 통하여 결정된 안전과 기능측면의 유지관리비용을 말하며 생애주기비용함수에 적용될 값이 된다.

Table 1 Maintenance method category

Method No.	Level (Type)	Effect	Cost (%)	Component	Event
1	Repair	SLC	30	com 1	E1, E2
2	Rehabilitation	α	50	com 1	E1, E2
3	Replacement	RTTI	100	com 1	E1, E2
4	Repair	SLC	30	com 2	E3
5	Rehabilitation	α	50	com 2	E3
6	Replacement	RTTI	100	com 2	E3
7	Repair	SLC	30	com 1	E2
8	Rehabilitation	α	50	com 1	E2
9	Replacement	RTTI	100	com 1	E2
10	Repair	SLC	30	com 3	E4
11	Rehabilitation	α	50	com 3	E4
12	Replacement	RTTI	100	com 3	E4

* SLC : Slope Change, RTTI : ReTurn To Initial value, $\alpha < 1$

(10) Determination of Life Cycle Cost

안전과 기능의 유지관리 비용을 생애주기비용함수에 대입하여 시스템의 생애주기비용을 결정하는 마지막 단계이다.

$$S_{\omega_j}(t) = \sum_{i=1}^l w_i S_{e_i}(t) \quad (1)$$

여기서, $\sum_{i=1}^l w_i = 1$

$S_{e_i}(t), S_{\omega_j}(t)$: 이벤트, 요소 생애분포함수

l : j 요소에서 발생하는 이벤트 수

$$S_{sub_k}(t) = \sum_{j=1}^m w_j S_{\omega_j}(t) \quad (2)$$

여기서, $\sum_{j=1}^m w_j = 1$

$S_{sub_k}(t)$ = 하부시스템 생애분포함수

m : 하부시스템 k 를 구성하는 요소의 수

$$S(t) = \sum_{k=1}^n w_k S_{sub_k}(t) \quad (3)$$

여기서, $\sum_{k=1}^n w_k = 1$

$S(t)$ = 시스템 생애분포함수

n : 시스템을 구성하는 하부시스템의 수

2. 생애주기비용함수의 구성

시스템의 생애동안 소요되는 생애주기비용은 식 (4)와 같이 설계비, 시공비, 유지관리비, 사용자비용, 해체폐기 및 재활용비로 구성되며, 사용자비는 시스템의 파괴가 발생하여 유지보수하는 동안 시스템의 사용자에게 돌아가는 피해비용을 의미한다.

$$C_t = f(C_D, C_C, C_M, C_U, C_R) \quad (4)$$

여기서, C_D : 설계비 C_C : 공사비
 C_M : 유지관리비 C_U : 사용자비용
 C_R : 해체폐기비 및 재활용수익

윗 식에서 유지관리비는 식 (5)와 같이 유지보수, 진단, 및 파괴에 따른 경비가 포함되며

$$C_M = f(C_{RE}, C_{INS}, C_F) \quad (5)$$

여기서, C_{RE} : 보수, 보강 및 교체비용
 C_{INS} : 진단비용, C_F : 파괴비용

윗 식에서 유지보수비(C_{RE})는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 시스템을 구성하는 요소의 유지보수비의 합이 최소가 되도록 하는 유지보수전략에 의해 결정된 비용을 말하며 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 유지보수비용의 발생은 Fig. 2의 요소단계에서 발생된다는 기본 가정 하에서 식 (6), 식 (7)이 전개된다.

$$C_{RE} = \min \left[\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{C_{kj}}{(1+v)^{t_{kj}}} \right] \quad (6)$$

여기서, v : 할인율

또한, 생애주기비용은 모든 비용을 현재가치로 환산하여 비교하게 되므로 할인율을 고려한 현재가치로 환산하여야 한다. 따라서 식 (5)는 식 (7)과 같이 표현될 수 있다. 본 연구에서는 할인율로서 은행 공공부분 대출이자율의 최근 10년간 평균치인 실질할인율을 적용하였다.

$$C_M = \sum_{j=1}^m \frac{C_{RE}}{(1+v)^{t_j}} + \sum_{j=1}^m \frac{C_{INS}}{(1+v)^{t_j}} + \sum_{j=1}^m \left[\frac{C_j}{(1+v)^{t_j}} \times F_t(t) \right] \quad (7)$$

3. 생애주기비용함수의 개선

식 (4)로 표현되는 기존의 생애주기비용 함수(LCC)를 기능과 안전으로 구분되는 농업용 시설물에 적합하도록 식 (8)(ALCC)로 개선하였다. 개선된 주요 내용은 Table 2와 같이 LCC와 ALCC를 비교하였다. 개선사항을 설명하면,

첫째, 생애주기 비용항목 중 유지관리비인 식 (5)를 식 (9)로 변경함으로서 Fig. 5와 같이 안전시스템과 기능 시스템으로 구분하여 유지관리전략 계획을 수립할 수 있도록 하였다. Fig. 9는 샘플지구로 전북 소재 M.R, D.M, H.D지의 최근 수행한 유지관리에 대한 시스템 생존확률을 나타낸 것인데 안전(Alcc_S)에 비하여 기능(Alcc_F)을 과도하게 보강하고 있거나, 안전의 보강을 소홀히 하고 있음을 알 수 있다. 만약 내규가 생존확률 0.4로 유지하도록 되어 있다면 기능에 관한 보강은 조금 낮은 수준으로 하거나 몇 년 더 사용한 후에 하는 것이 보다 경제적인 유지관리였을 것이다.

둘째, 생애주기 비용항목 중 사용자 비용을 시스템의 기능적 파괴(Functional Failure)에 의한 피해비용(Damage Cost)으로 표현하였다. 그 이유는 기존의 LCC에서 사용하던 복잡한 조사를 통해 추정함으로서 발생될 수 있는 주관성과 설문 등의 번거로움을 해소함과 동시에 시스템 안전의 파괴비용 산출 방법과 같이 신뢰성 기반의 비용산정이 가능하도록 하기 위함이다. 이를 위해 식 (5)의 파괴비용($C_F = C_f \times F$)을 식 (12)로 개선하였다. 여기서, 기본 가정은 Fig. 6과 같이 시스템 파괴로 인하여 발생될 수 있는 전체 피해비용은 안전시스템(Safety System)의 파괴로 인하여 발생하는 피해비용이고, 기능시스템(Function System)의 파괴로 인하여 발생하는 피해비용은 시스템의 기능을 수행하지 못하였을 때 발생하는 손실비용이다. 그렇다면 ALCC에서 파괴비용(C_F)은 Fig. 7의 안전시스템의 파괴확률(F_{tsa})에 Fig. 6의 안전시스템의 피해비용(C_{fsa})을 곱한 비용과 기능시스템의 파괴확률(F_{lse})에 기능시스템의 피해비용(C_{fse})을 곱한 비용을 합한 비용이 된다.

셋째, 진단비용을 세분화하였다. 정밀안전 진단은

5년마다 일회의 빈도로 수행되는 시스템안전을 위한 점검이며, 일상관리는 거의 매일 실시되는 시스템 기능을 위한 점검이다. 식 (9)에서 C_{INS} 은 정밀안전진단비용이며, C_{CH} 는 일상관리 비용이다. LCC에서 누락된 C_{CH} 를 ALCC에 추가하였다.

$$C_t = f(C_D, C_C, C_M, C_R) \quad (8)$$

$$여기서, C_M = f(C_{RE}, C_{INS}, C_{CH}, C_F) \quad (9)$$

$$C_{RE} = \begin{cases} C_{REsa} \\ C_{REse} \end{cases} \quad (10)$$

$$C_{CH} : \text{일상점검 연간비용} \quad (11)$$

$$C_F = \begin{cases} C_{Fsa} = F_{tsa}(t) \times C_{fsa} \\ C_{Fse} = F_{tse}(t) \times C_{fse} \end{cases} \quad (12)$$

$$C_M = \sum_{j=1}^m \frac{C_{REsa}}{(1+v)^{t_{pj}}} + \sum_{j=1}^m \frac{C_{REse}}{(1+v)^{t_{pj}}} \quad (13)$$

$$+ \sum_{j=1}^m \frac{C_{INS}}{(1+v)^{t_{pj}}} + \sum_{j=1}^m \frac{C_{CH}}{(1+v)^{t_{pj}}}$$

$$+ \sum_{j=1}^m \left[\frac{C_{fsa}}{(1+v)^{t_{pj}}} \times F_{tsa}(t) \right]$$

$$+ \sum_{j=1}^m \left[\frac{C_{fse}}{(1+v)^{t_{pj}}} \times F_{tse}(t) \right]$$

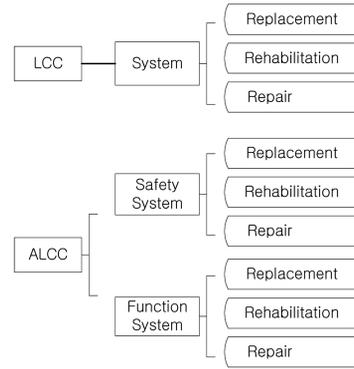


Fig. 5 Maintenance activities at LCC and ALCC

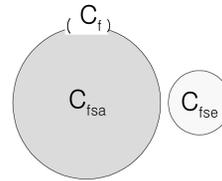


Fig. 6 Damage classification at ALCC

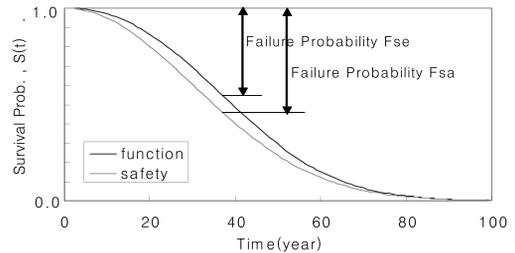


Fig. 7 Failure probability at ALCC

Table 2 Comparison LCC and ALCC

Category	LCC	ALCC		Remarks
		Safety	Function	
Repair, Rehabilitation, Replacement Cost	C_{RE}	C_{REsa}	C_{REse}	Different Maintenance Strategy Application
User Cost	C_U	-	$C_{Fse} = F_{tse} \times C_{fse}$	Assumption Based on Reliability
Inspection Cost	C_{INS}	C_{INS}	-	
Daily Check Cost	-	-	C_{CH}	
Failure Cost	C_F	C_{Fsa}	-	

III. 함수의 적용 및 고찰

개선한 생애주기비용함수의 적용을 위해 대표적인 농업시설물인 저수지의 사례를 들어 그 유용성을 검증하였다. 사례지구는 전북 소재 M.R., D.M., H.D. 3개 지구를 대상으로 하였으며, 지구 준공연도, 규모 등의 정보는 Table 3과 같고, 준공이후 사례지구의 유지보수 이력은 Table 4와 같이 하부시스템 단위로 요소별로 유지보수 규모를 정리하였다. Table 5는 하부시스템을 구성하는 요소에 수행된 유지보수의 비용을 구분한 것이며, 부대공사비용은 요소별 순공사비 효율에 따라 배분한 금액을 순공사비에 합한 금액이다. Table 6은 시스템 구성요소의 유지보수에

Table 3 Information of sample

Name	Open (year)	Irrigation Area (ha)	Draught frequency (yr)	Watershed Area (ha)	Available Quantity (m ³)	Surface Area of water (ha)	Embankment		
							Height (m)	Length (m)	Type
M.R.	1947	281.7	1	593	1270	24.8	13.7	207	Earth Dam, central Clay type
D.M.	1954	31.2	5	32	39	1.6	7.3	83.5	Earth Dam, uniform type
H.D.	1945	41	1	122	114	3.4	9.8	173	Earth Dam, central Clay type

Table 3 Information of sample(continue)

Name	Draught frequency (yr)	Spillway						Outlet works		
		Crest (m)			Outlet Channel(m)			Operating platform type	Tower or submerged intake height or length (m)	Conduit length (m)
		Gate Dim.	length	height	height	length	width			
M.R.	1	3.0×1.5×2 set	61	2.68	1.1	142	3	Room	L=8(D=0.4, S)	L=46 (D=0.7)
D.M.	5	-	4	0.60	0.9	40	23	-	(D=0.18(1holes), S)	L=29 (D=0.3)
H.D.	1	-	36	1.80	3.0	52	8	-	(D=0.2(3holes), S)	L=43 (D=0.45)

Table 4 Maintenance history

Name	Embankment			Spillway			Outlet works		
	Co*	activity	dimension (m)	Co*	activity	Dimension (m)	Co*	activity	Dimension (m)
M.R.	DC	heightening	L=207 △H=1.0	CC	recon.	L=61, H=2.68	SI	recon.	L=8.0
	DS	grouting	N=228holes	Gate	repl.	3.0(H)×1.5(B) (2sets)	C	rehab. (SP propulsion)	L=46 D=0.7
OC				recon.	L=142, B=3				
D.M.	DS	grouting	L=84holes	CC	recon.	L=3.6, H=0.9	C	rehab. (SP propulsion)	D=0.6 t=8mm
					grouting	L=6			
H.D.	DC	heightening	L=173 △H=2.75	CC	recon.	L=52	SI	recon.	D=0.3(2holes) 0.2(1holes)
	DS	grouting	N=203holes	OC	recon.	L=28	C	rehab.	D=0.4 L=30

* Co : Component name, Component abbreviation, DC:dam crest, DS:downstream slope, CC:crest & channel, OC:outlet channel, SI:submerged intake, C:conduit; Activity abbreviation, recon.:reconstruction, rehab.:rehabilitation

Table 5 Maintenance cost (unit : ×10³ won)

Name	Maintenance (year)	Embankment			Spillways			Outlet works		
		Co*	Activity	Cost	Co*	Activity	Cost	Co*	Activity	Cost
M.R.	2002	DC	heightening	277,082	CC, OC	recon.	237,948	SI	recon.	162,857
		DS	grouting	628,052	Gate	repl.	1,200,000	C	rehab.	
D.M.	2002	DS	grouting	122,155	CC, OC	recon.	17,832	C	rehab.	22,501
					CC	grouting	5,682			
H.D.	2002	DC	heightening	447,147	CC	recon.	209,652	SI	recon.	238,388
		DS	grouting	432,172	OC	recon.		C	rehab.	

* Co : Component abbreviation, Activity abbreviation : refer Table 4

Table 6 Strategy optimized by maintenance history and survivor function

Event	Level ¹⁾	Unit cost (×10 ³ won)	Interval (yr)	Cost ³⁾	Used activity
E_DC_SC(S)	rehab.	403	42	2×403	recon.
E_DC_F(S)	rehab.	403	38	2×403	heightening
E_DS_RH(S)	rehab.	403	48	2×403	heightening
E_DS_S(S)	repair	1,920	15	6×1,920	grouting
S_CC_SC(S)	repair/repl.	137/375	29/57	137+ 375	repair/recon.
S_CC_DD(S)	repair/repl.	137/375	29/57	137+ 375	repair/recon.
S_OC_DC(S)	repair/repl.	130/375	29/58	130+ 375	repair/recon.
S_OC_DD(S)	repair/repl.	130/375	29/58	130+ 375	repair/recon.
S_CC_SC_G(S) ³⁾	repl.	120,000	39	2×120,000	gate adoption or change
S_CC_DD_Gr(S) ⁴⁾	repair	490	45	2×490	grouting
E_US_RP(F)	rehab.	403	38	2×403	heightening
E_DS_SP(F)	rehab.	403	38	2×403	rehab.
E_DS_S(F)	repair	1,920	15	6×1920	grouting
S_CC_DD(F)	repair/repl.	137/375	29/57	137+ 375	repair/recon.
S_CC_DD_Gr(F) ⁴⁾	repair	490	45	2×490	grouting
S_SB_DD(F)	repair/rehab.	130/375	29/58	130+ 375	repair/rehab.
S_OC_DD(F)	repair/rehab.	130/375	29/58	130+ 375	repair/rehab.
O_OP_CD(F)	repl.	27,500	34	2×27,500	recon.
O_TS_DD(F)	repl.	27,500	34	2×27,500	recon.
O_TS_L(F)	repl.	27,500	50	27,500	recon.
O_TS_GT(F)	repl.	27,500	50	27,500	repl.
O_C_CD(F)	rehab.	2,500	70	2,500	rehab.
O_C_L(F)	rehab.	2,500	70	2,500	rehab.

¹⁾ Level : maintenance level abbreviation, rehab.:rehabilitation, repl.:replacement=recon.:reconstruction

²⁾ Cost : Predicted maintenance cost during one hundred year

³⁾ _G : Gate adoption or old gate change for solving events

⁴⁾ _Gr : Grouting for solving seepage under spillway

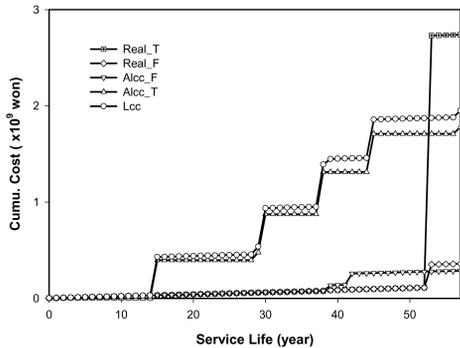
따른 시스템 생존확률과 유지보수 비용을 사용시간의 함수로 나타낼 수 있는 시스템적 분석에 의한 결과표를 나타낸 것이며, 유지보수 주기는 요소에서 나타나는 사건의 생애분포특성 자료로부터 유도한 생존함수의 확률한계 0.4를 가정한 주기이다. 또한, 비용은 현재 설계기준(농촌용수계획설계편람)의 목표내구연한 70년을 넘게 사용한 지구가 있으므로 목표내구연한을 100년으로 가정하여 100년 동안의 유지관리 예상비용을 최소화할 수 있는 유지전략으로 산정하였으나 향후 정밀한 연구를 통하여 최적의 목표내구연한 결정에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

사례지구를 대상으로 개선된 생애주기비용모델(Advanced Life Cycle Cost, ALCC)과 기존 생애주기비용모델(Life Cycle Cost, LCC)로 유지관리 비용을 예측하였고, 그 결과를 비교하기 위해 Fig. 8에 도시하였다. 비용의 비교는 기준년도의 현재가치로 환산하여 비교하여야 하므로 할인율을 적용하여야 하는데 본 사례에서는 은행의 공공분야 대출이자율의 10년간 평균치인 7%를 사용하였다. 그리고 물가상승율은 통계청의 전국소비자물가지수의 최근 10년간 평균치인 3%를 적용하였다. 첨자F는 기능시스템, S는 안전시스템, T는 두 시스템의 합, Real은 실제개보수시나리오를 공용연한에 따른 누적 유지보수비

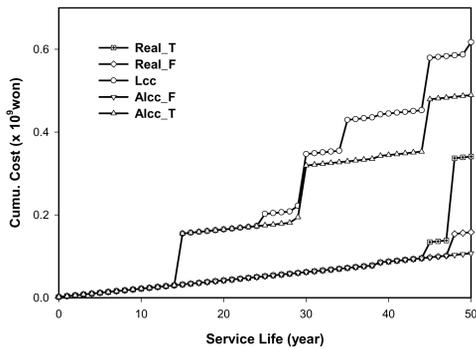
용으로 도시한 것이며, LCC와 비교하여 ALCC의 개선사항은 다음과 같다.

첫째, LCC곡선과 ALCC곡선의 차만큼의 유지관리 비용을 절감하였다. LCC가 안전 위주의 유지관리를 예상한데 비하여 ALCC는 안전과 기능으로 구분하여

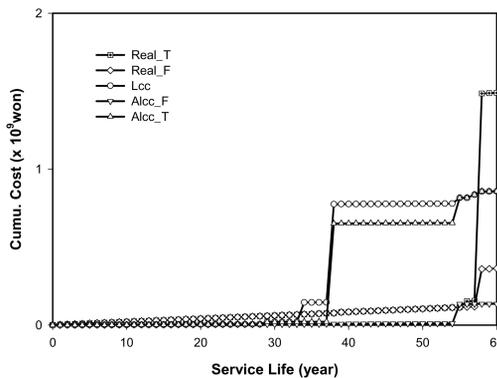
유지관리를 예상한다. 따라서 ALCC는 기능시스템의 유지관리를 보수·보강·교체(개수)를 선택적으로 적용함으로써 관리시점을 조절할 수 있어 LCC에 비하여 유지관리 비용을 절감할 수 있다.



(a) Sample M.R.

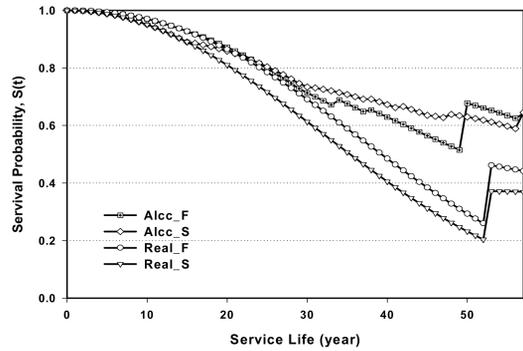


(b) Sample D.M.

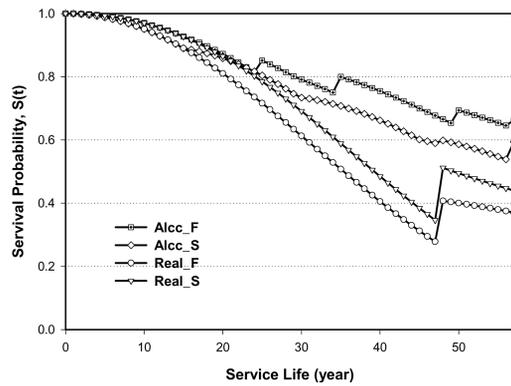


(c) Sample H.D.

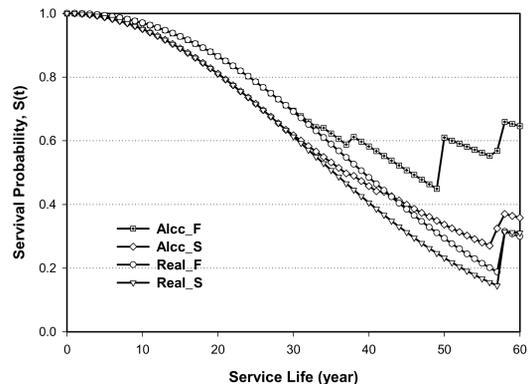
Fig. 8 Comparison of life cycle costs at samples ((a)~(c))



(a) Sample M.R.



(b) Sample D.M.



(c) Sample H.D.

Fig. 9 Comparison of system survivor functions at samples

둘째, LCC에서는 나타내지 못했던 기능시스템의 유지관리 비용(ALCC_F)을 나타낼 수 있다.

셋째, ALCC는 시스템의 유지관리에 따른 생존확률의 변화를 Fig. 9와 같이 사용연한의 함수로 표현할 수 있으며, 기능적 측면의 생존확률과 안전 측면의 생존확률을 구분함으로써 기능시스템과 안전시스템의 유지관리 전략을 달리할 수 있다. 유지관리 전략을 달리함으로써 유지관리 비용을 할인율을 적용한 현재가치로 비교할 때 비용집행을 늦출수록 경제적인 유지관리가 되는 것을 알 수 있다.

또한, 현행 유지관리에 의한 생존확률을 나타내는 Fig. 9에서 기능적 측면의 유지관리가 과도하게 이루어지고 있거나 안전측면의 유지관리가 소홀하게 이루어지고 있음을 그래프에서 쉽게 알아볼 수 있다. 현행의 유지관리 비용보다 작거나 거의 같은 비용으로도 ALCC 유지관리를 따를 경우, 유지관리 전략에 의해 요소의 보수주기 결정시 가정한 확률한계인 0.4를 상회하게 관리할 수 있음을 예시하고 있다.

물론 기능 측면의 유지관리 시점을 현 시점보다 늦추더라도 시스템 사용성의 확보에는 문제가 없어 보인다.

ALCC는 시스템적 접근방식으로 안전과 기능의 생존확률을 생애기간동안 나타낼 수 있으며, 유지관리에 의한 생존확률개선 효과를 표현할 수 있으므로 유지관리 시스템으로 활용이 가능할 것이다.

IV. 결 론

여러 부속시설로 이루어진 시설물에 대해 시스템 엔지니어링 접근법을 이용하여 시스템의 생애주기비용 항목 중 유지관리비용을 안전대책확보비용과 기능유지확보비용으로 구분하여 기존의 생애주기비용 산출방법을 좀 더 현실적으로 개선하는 생애주기비용 모델을 확립하고, 대표적인 농업시설물인 저수지 시스템을 예제로 하여 그 유용성을 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공용연한에 따른 시스템신뢰성기반의 생존확률 변화를 기능과 안전측면에서 관리할 수 있는 체계로서 생애주기비용함수법을 구성하였다.

2. 시스템의 안전과 기능을 구분할 수 있도록 생애주기비용함수를 개선하였다.

3. 사례지구를 대상으로 개선된 생애주기비용모델(ALCC)과 기존 생애주기비용모델(LCC)로 예측한 비용을 비교한 결과 ALCC가 유지관리 비용을 절감할 수 있음을 확인하였다.

4. ALCC에서 사용한 시스템적 접근법은 시스템의 유지관리에 따른 기능적 측면의 생존확률과 안전 측면의 생존확률변화를 각각 나타낼 수 있어 시스템별 유지관리 전략을 달리할 수 있을 것으로 사료되었다.

References

1. Chaaya, M. & A. Jaafaari, 2001, Cognizance of Visual Design Management in Life-Cycle Project Management, Journal of Management in Engineering, 17(1), pp.49-57.
2. Cho, H.-N., D.-H. Min & K.-M. Lee, 2001, Optimum Life-Cycle Cost Design of Orthotropic Steel Deck Bridges, Steel Structures
3. Ehlen, Mark A., 1997, Life-Cycle Costs of New Construction Materials, Journal of Infrastructure systems, pp.129-133.
4. Engelund, S., D. S. John & B. Sorensen, 1999, Evaluation of Repair and Maintenance Strategies for Concrete Coastal Bridges on a Probabilistic Basis, ACI Material Journal, pp.160-167.
5. Farhey, Daniel N., R. Naghavi, A. Levi, Aniruddha M. Thakur, Mark A. Pickett, Douglas K. Nims & Emin A. Aktan, 2000, Deterioration Assessment and Rehabilitation Design of Existing Steel Bridge, Journal of Bridge Engineering, 5(1), pp.39-48.
6. Frangopol, Dan M. & H. Furuta, 2001, US-Japan Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, Reston, VA:ASCE
7. Freyermuth, Clifford L., 2001, Life-Cycle Cost Analysis for Large Segmental Bridges,

- Concrete International, pp.89-95.
8. Fuller, Sieglinde K., 1996, Life-Cycle Costing Methodology, NIST
 9. Garboczi, Edward J., Dale P. Bentz & Geoffrey J. Frohnsdorff, 2000, Knowledge-Based Systems and Computational Tools for Concrete, Concrete International, pp.24-27.
 10. Hong, H. P., 2000, Assessment of Reliability of Aging Reinforced Concrete Structures, Journal of Structural Engineering, 126(12), pp.1458-1465.
 11. Jung, S.-S. & J.-J. Yee, 2000, A Study on the Development of Software for Life Cycle Cost Evaluation of HVAC system, Journal of Architectural Institute of Korea-Planning and Design Committee, 16(7), pp.101-108.
 12. Jung, S.-S. & D.-W. Kim, 2002, A Study on the Development of Cost Breakdown Structure in Present Worth Method and Annual Worth Method by HVAC system for systematic LCC Calculation, Journal of Architectural Institute of Korea-Structures Committee, 18 (6), pp.167-174.
 13. Kay, Dianne H., Susan M. Morgan & S. N. Bodapati, 2001, Service Life of Illinois Highway Noise Barriers Projected from Current Condition Survey, Journal of Performance of Constructed Facilities, 15(3), pp.82-89.
 14. Lee, S.-J., T.-K. Park, C.-S. Lee & Y.-I. Kim, 2002, A study on the Economic Evaluation Method for Remodeling of Deteriorated Military Facilities, Journal of Architectural Institute of Korea-Structures Committee, 18 (5), pp.105-112.
 15. Liu, Min & Dan M. Frangopol, 2004, Optimal bridge maintenance planning based on probabilistic performance prediction, Engineering Structures, 26, pp.991-1002.
 16. Oh, Y.-I., S.-B. Lee & T.-K. Lee, 1997, A Study on the Economic Analysis in Apartment House Based on Life Cycle Costing Techniques, Journal of Architectural Institute of Korea, 13(3), pp.325-333.
 17. Park, S.-K. & Alfred H.-S. Ang, 1997, Cost-effective Reliability of RC structure in Korea under earthquake, Journal of Korea Concrete Institute, 9(5), pp.137-148.
 18. Park, S.-K. 2001, LCC Optimization for Reinforced Concrete Structures under Seismic Hazards, KCI Concrete Journal, 13(2), pp. 26-32.
 19. P.E., Susan M. Morgan, Dianne H. Kay P.E., & S. N. Bodapati P.E., 2001, Study of Noise Barrier Life-Cycle Costing, Journal of Transportation Engineering, 127(3), pp.230-236.
 20. Ries, R. & A. Mahdavi, 2001, Integrated Computational Life-Cycle Assessment of Buildings, Journal of Computing in Civil Engineering, 15(1), pp.59-66.
 21. Singh, Balam K., 1996, How Significant is LCCA?, Concrete International, pp.59-62.
 22. Violetta, B., 2002, Life-365 Service Life Prediction Model, Concrete International, pp. 53-57.
 23. Yang, S.-I., 2001, REMaining Life Prediction of Deteriorating Bridge Based on Lifetime System Reliability, Journal of Korean Society of Steel Construction, 13(5), pp.467-476.
 24. Yang, S.-I., 2002, Lifetime Prediction of Existing Highway Bridges Using System Reliability Approach, Journal of Korean Society of Steel Construction, 14(2), pp.365-373.
 25. Yang, S.-I., 2002, Optimum Maintenance Strategy of Bridges Based on System Reliability, Journal of Korean Society of Steel Construction, 14(5), pp.627-639.
 26. Yang, S.-I., 2002, Time Dependent Maintenance Models of Bridges, Journal of Korean Society of Steel Construction, 14(3), pp.443-452.