

예방적 유지관리를 통한 교량의 생애주기비용 절감 효과 분석

정유석¹, 김우석^{2*}, 이일근³, 이재하⁴

Bridge Life Cycle Cost Analysis of Preventive Maintenance

Yo-Seok Jeong¹, Woo-Seok Kim^{2*}, Il-Keun Lee³, Jae-Ha Lee⁴

Abstract: The paper aims at evaluating effects of preventive maintenance on life cycle cost(LCC) reduction of bridges. The preventive maintenance activities capable to delay bridge deteriorations can reduce overall maintenance costs and extend service life of a bridge by regularly providing maintenance activities and avoiding larger maintenance(repairs or rehabilitations) costs. Couple of prediction models were proposed in order to calculate LCC of a typical bridge: a health score model and repair-rehabilitation cost model. In addition, the maintenance activities such as wash and painting were also suggested in order to consider effects of preventive maintenance in the analysis based on literature reviews. According to analysis results, new maintenance strategy(reactive maintenance + preventive maintenance) can save ₩0.5 billion per bridge for future life-cycle costs over 100 year analysis or ₩184 billion for entire HBMS(Highway Bridge Management System) inventory over 20 years. Small investments for preventive maintenance in improved bridge management can have a very significant return when considering the large bridge inventory.

Keywords: Bridge maintenance, Life cycle cost(LCC), Preventive maintenance

1. 서론

국내 관리교량수가 매년 증가하여 현재 30,000여개에 이르고 있다(Fig. 1). 특히 1980년 후반부터 2005년까지 압축적인 경제성장과 더불어 사회기반 시설이 집중적으로 건설되면서 교량 또한 도로 건설 및 확충으로 인해 집중적으로 건설되었다. 1985년부터 2005년 사이에 건설된 교량은 전체 교량의 63%(약19,000 개소)를 차지하고 있으며 추후 이들 교량의 노후화가 급격히 진행 될 것으로 예상된다. 특히, 보수·보강 물량이 급증하게 되는 30년 이상의 노후 교량은 현재(2015년) 8%(약 2,500개소)지만 10년 후 30%(약 9,600개소), 20년 후 72%(약 21,000개소)로 급증할 것으로 예측되고 있다(Fig. 2). 이처럼 특정기간에 건설된 다수 교량의 노후화로 인해 발생 되는 보수·보강 비용 급증은 이를 관리하는 교량 관리 주체에 게는 경제적 부담으로 작용 할 것이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 효율적인 유지관리 전략이 요구 되고 있다.

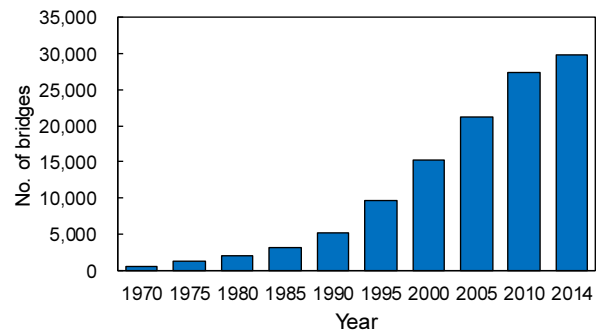


Fig. 1 Increase in numbers of bridges(accumulated)(KOSIS, 2015)

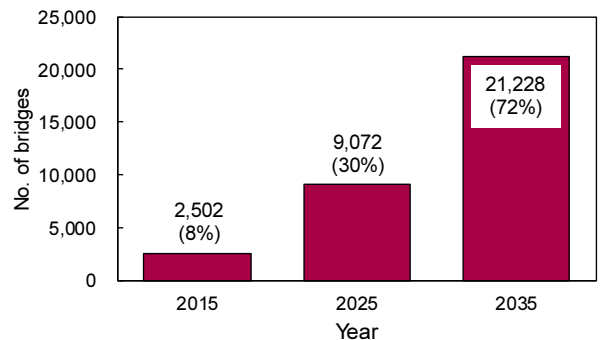


Fig. 2 Predicted numbers of bridges in service over 30 years (KOSIS, 2015)

¹정회원, 충남대학교 건설방재연구소 박사후연구원

²정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수, 교신저자

³정회원, 도로교통연구원 구조물연구실 책임연구원

⁴정회원, 한국해양대학교 건설공학과 조교수

*Corresponding author: wooseok@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

교량의 유지관리는 안전점검과 진단, 보수·보강, 개축 등과 같이 교량의 기능, 안전성, 내구성, 사용성을 확보하기 위하여 교량의 생애주기 동안 행해지는 일련의 행위를 지칭한다. 현재까지의 교량 유지관리는 주로 사용성 및 안전성에 초점을 맞추어 손상을 파악하여 보수·보강을 시행하는 대응적 유지관리(Reactive Maintenance, RM)였다(Lee et al., 2016; Park, 2005; Park, 2006; Sun and Park, 2014). 이러한 유지관리체계의 문제점은 구조물의 노후화가 진행됨에 따라 증가하는 보수·보강물량을 감당하기 힘든 단점이 있다. 미국의 경우 교량의 노후화 대비에 실패하여 매년 12.8조원(backlog yearly \$20.5 billion by 2028)이라는 천문학적인 예산을 쏟아 붓고 있으나, 이러한 비용도 필요한 유지관리 예산의 절반 수준이라는 것은 국내 교량 관리 주체가 반면교사로 삼아야 할 대목이다(ASCE, 2013).

교량 개소수와 규모가 증가하게 되면 이를 관리하기 위해 유지관리 효율을 극대화 하도록 다양한 관리지표를 개발하여 사용할 수 있다(Jeong et al., 2016a). 특히 노후교량의 수가 급격히 증가하게 되면 기존의 유지관리 전략만으로는 대처가 불가능하며 급격하게 노후화가 되기 시작할 경우 미국과 같이 사회적, 경제적으로 많은 문제를 야기 할 수 있다. 따라서 공용 초기에서부터 체계적인 유지관리를 통하여 교량의 수명을 연장하고 교량의 생애주기비용을 최소화하기 위한 전략이 필요하다. 그 중에서 예방적 유지관리(Preventive Maintenance, PM)를 하나의 대안으로 제안할 수 있다(Park et al., 2006).

구조물의 유지관리는 구조물의 손상이나 결함을 탐지하고 필요한 보수·보강을 실시하는 대응적 유지관리(RM)와 손상이나 결함의 발생을 사전에 예방하거나 구조물의 열화를 최대한 지연시키기 위해 실시하는 예방적 유지관리(PM)로 구분 할 수 있다. 예방적 유지관리에 대하여 많은 문헌에서 정의하고 있지만 미국의 미네소타 교통국(MnDOT, 2002)에서는 다음과 같이 정의하고 있다.

‘예방적 유지관리는 가벼운 열화를 정지, 점진적인 파괴를 지연, 통상적인 유지관리의 필요성을 저감시킬 목적으로 수행되는 전략적인 유지관리 활동이다. 예방적 유지관리활동은 반복적이며 계획된 유지관리 활동이 일반적이다. 즉, 예방적 유지관리 활동은 구조물의 성능을 획기적으로 개선하지는 않지만 사용수명을 연장하고 서비스 수준을 개선시킨다.’

즉 예방적 유지관리는 유지관리 활동 수행을 위한 방향이 설정되면 전문적인 지식이나 전문가 도움 없이 쉽게 시행할 수 있는 유지관리 활동이다.

본 논문에서는 이러한 예방적 유지관리 효과를 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC) 측면에서 분석하고자 한다. 이를 위해 현 수준의 유지관리 전략(대응적 유지관리, RM)과 새로운 유지관리 전략(대응적 유지관리, RM + 예방적 유지관리, PM)

의 비용분석을 실시하였다. 분석을 위해 2004년부터 2013년 동안의 고속도로 교량의 점검기록을 활용하여 교량의 공용연수에 따른 상태등급(건전도 점수) 관계식을 제안하였고(Jeong et al., 2016b) 비용분석을 위해서 FHWA(Federal Highway Administration) 자료를 활용하여 교량 상태에 따른 교량의 평균 보수·보강비용 관계를 설정하였다. 앞에서 제안된 복수의 관계식을 활용하여 100년간 교량의 생애주기비용을 산정하였다.

2. 교량의 생애주기비용(LCC) 산정 방법

2.1 교량 상태등급 변화 모델 제안

2.1.1 교량의 상태등급 예측 모델

교량의 성능변화, 즉 물리적인 상태 변화를 시간에 따라 산정하는 것은 불가능에 가까운 일이다. 교량 노후화, 열화, 손상 매커니즘은 어떻게 발생하는지 규명이 많이 되어 있지 않으며 규명 되어 있다 하더라도 시간에 대한 변화는 다양한 변수로 인해 정확도가 떨어지거나 불가능한 경우가 많다. 이번 장에서는 교량의 사용수명(상태등급 변화) 산정을 위해 문헌에서 언급하고 있는 세 가지 방법(생명표, 생존함수, 회귀분석)을 간략하게 설명하고자 한다.

수명산정에서 가장 널리 보편적으로 받아들여지는 방법은 사람의 수명산정에 사용되는 생명표이다. 교량과 사람의 수명주기에는 유사성이 있다. 사람은 탄생 후 주기적인 건강관리를 받으며 부상, 질병, 노화에 대해 진단을 받고 치료를 받는다. 그리고 시간이 지나 결국은 죽음을 맞이한다. 이와 유사하게, 교량 또한 건설 후 주기적으로 유지관리를 받는다. 결함, 손상, 열화에 대하여 진단받고 보수·보강을 받으며 교량의 기능이 필요해지지 않거나, 구조적인 요구조건을 만족하지 못할 때 교량의 수명종료가 이루어진다(Jeong et al., 2016b). 이러한 유사점을 고려한다면 사람의 수명산정 방법과 관련된 지표를 교량에 적용 할 수 있을 것이다. 사람의 생명표 작성과정에 산출되는 사람의 평균수명과 잔여수명 등은 교량의 관리주체가 원하는 교량의 평균사용수명과 교량의 잔여 수명 등으로 제공될 수 있다(KOSIS, 2014). 하지만 사람의 생명표는 연령별 사망률에 기초하여 작성하므로 교량에 적용하기에는 아직 자료가 부족한 실정이다. 즉, 연령별 사망률을 산출하기 위해서는 의미 있는 수준의 표본이 필요한데 국내 교량의 경우 공용연수별 교량수명종료의 사례가 매우 부족한 상황이다. 따라서 생명표 방법은 추후에 충분한 데이터가 확보된 뒤에는 가장 적절한 방법이나, 현재의 데이터로는 다른 통계적인 방법으로 교량의 사용수명산정에 대한 접근이 필요하다.

생명표를 활용한 사용수명 산정의 문제를 해결하기 위해 NCHRP Report 713에서는 통계적 기법인 생존함수와 회귀분석을 사용하여 교량의 사용수명을 산정하는 방법을 제시하였다(Thompson et al., 2012). 생존함수를 적용할 경우 우선적으로 대상구조물의 수명자료를 수집하여 시간에 따른 대상구조물의 부재 성능을 생존함수로 모델링 한 후 이를 통하여 교량의 수명을 예측한다. 생존함수를 이용한 교량의 수명추정은 교량이 시간에 따른 성능변화를 ‘확률적’으로 제공해 준다. 예를 들어 교량이 50년 후에도 공용중인 확률 등으로 정보를 제공한다. 하지만, 생존함수를 사용하여 수명예측 할 경우에는 현재 국내교량의 경우 교체실적이 있는 부재에는 사용가능하나 사용수명 종료로 인한 개축실적이 극히 드문 국내 교량의 경우에는 아직 적용이 불가능하다.

회귀분석은 교량의 미래 상태를 추정하고 관련변수를 분석하는데 유용한 기법이다. 특히 결과가 특정한 형태의 수식으로 표현되므로 사용이 쉬워 관리자 및 실무자들도 쉽게 적용할 수 있다. 이처럼 회귀분석 기법은 시간경과에 따른 교량의 상태등급을 특정식을 이용하여 나타내는 방법으로 가장 간단하면서 적용하기 쉬운 장점이 있으나, 전체 수명기간에 대한 산포도가 작은 자료가 있어야 좋은 결과를 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 국내 교량의 개축 실적이 부족한 관계로 회귀분석기법을 사용하여 교량의 사용수명산정을 수행하였다.

2.1.2 국내 고속도로 교량의 건전도 점수 변화 모델 제안

국내 고속도로 교량의 사용수명(상태등급 변화)을 산정하기 위하여 식 (1)을 사용하여 회귀분석 하였다. 식 (1)은 미국 AASHTO의 포장 상태를 예측하기 위해 개발된 식을 참조하여 결정 하였다(Patterson, 1987). 일반적으로 회귀분석에 사용되는 다항식의 경우 식 (1)과 달리 교량의 초기상태, 수명종료 시 상태등급, 사용수명과 같은 정보를 파악하고 특정 하는데 어려움이 따른다. 반면에 식 (1)은 이러한 정보를 직관적으로 파악하고 특정할 수 있는 유용한 회귀분석 식이라 할 수 있다(Jeong et al., 2016b). 이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 식 (1)을 사용하여 교량의 사용수명 산정에 사용하였다.

$$HS = I - (I - HS_{EOL}) \left(\frac{t_a}{t_{as}} \right)^a \quad (1)$$

여기서, HS = 교량의 건전도 점수(Health Score, $HS=1-DS$), DS = 교량의 결함도 점수(Damage Score), I = 건전도 점수곡선의 시작점, a = 곡선의 비선형 형상계수, t_{as} = 평균사용수명, t_a = 교량의 공용년수, $HS_{EOL} = 1 - DS_{EOL} = 1 - 0.64 = 0.36$ 이다. I 는 교량의 건전도 점수 곡선이 시작되는 지점이다. 안전점검 및 정밀안전

진단 세부지침-교량편(이하 세부지침)에 따르면 교량구성부재의 상태평가 시 가장 최상의 등급인 ‘a’등급의 건전도 점수는 0.9점이므로 $I = 0.9$ 가 된다(MOLIT, 2012). 또한 교량의 사용수명종료는 기존 연구(Jeong et al., 2016b)를 바탕으로 하여 건전도 지수 0.36을 사용하였다. 건전도 점수 0.36은 교량의 상태등급 E등급과 D등급의 중간값에 해당하는 값으로 중간값으로 결정한 이유는 다음과 같다. 세부지침(MOLIT, 2012)에 따르면 실제 교량의 상태등급이 D등급 도달 시 사용제한 여부를 검토하지만 사용금지 는 의무사항이 아니다. 하지만 E등급의 교량은 사용이 의무적으로 금지되므로 실제 교량의 사용금지는 D등급 내에서 이루어지는 경향을 띄게 된다. 따라서 회귀분석 시 교량의 수명종료 시점은 E등급과 D등급의 중간값인 건전도 점수 0.36을 적용하였다. 사용수명 종료 시점의 결정과정에 관해서는 참고문헌(Jeong et al., 2016b)에 자세히 기술되어 있다.

본 논문에서는 회귀분석의 편의를 위해 교량의 결함도 점수 대신에 건전도 점수를 사용하였다. 일반적으로 교량의 상태는 공용연수가 증가함에 따라 저하되는 경향을 보여준다. 하지만 결함도 점수는 이러한 경향을 보여주지 못한다($DS=0.1 \rightarrow 'A'$ 등급, $DS=1 \rightarrow 'E'$ 등급). 따라서 본 논문에서는 결함도 점수를 대신하여 건전도 점수(Health Score, $HI=1-DS$)를 사용하도록 하였다. 교량의 결함도 점수 산정 방법은 세부지침(MOLIT, 2012)에 자세하게 기술되어 있으며 여기서는 세부지침에 규정되어 있는 교량의 결함도 점수 산정 방법을 간략하게 소개 하도록 하였다.

교량의 결함도점수(Damage Score) 산정 방법은 먼저 경간별로 각 개별부재의 최저 결함도점수를 집계하여 개별부재 상태평가에 반영한다. 만약 한 경간 내에 동일 부재가 여럿 있는 경우 부재 중 최저 결함도점수를 해당 경간의 부재 결함도 점수로 산정한다. 부재의 상태평가 기준은 세부지침(KISTEC, 2012)에 설명되어 있다. 그리고 전체 교량의 상태평가는 경간별 부재결함도지수(Damage Index)에 가중치를 적용하여 평균한 값인 환산결함도점수를 기준으로 실시한다. 이때 경간별

Table 1 Criteria for evaluating condition rating of bridge/element based on damage score(MOLIT, 2012)

Condition State	Damage Index	Damage Score (DS)
A(a)*	0.1	$0 \leq X < 0.13$
B(b)	0.2	$0.13 \leq X < 0.26$
C(c)	0.4	$0.26 \leq X < 0.49$
D(d)	0.7	$0.49 \leq X < 0.79$
E(e)	1.0	$0.79 \leq X$

*A(a) represents that ‘A’ is the condition rating of the bridge and ‘a’ is the condition rating of the bridge element.

Table 2 Number of bridges used to predict average service life

2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
No. 4,395	5,669	5,768	5,815	6,459	6,943	7,186	7,627	8,002	6,386

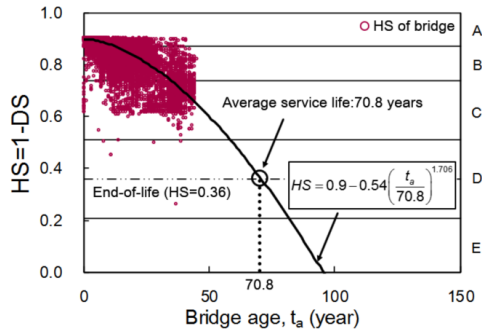


Fig. 3 Estimate of average service life of bridges

부재결함도지수(Damage Index)는 최저 결함도점수(Damage Score) 범위에 따라 결정된다(Table 1). 산정된 환산결함도점수는 교량 전체의 상태평가를 결정하는 기준이 되는 점수이며 결함도점수 범위에 따른 교량의 상태등급은 Table 1과 같다.

회귀분석 방법을 통해 교량의 사용수명 산정을 수행하기 위해서는 교량의 상태이력정보가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 Table 2와 같이 2004년부터 2013년까지 한국도로공사의 HBMS(Highway Bridge Management System)에 있는 교량의 상태정보를 사용하여 교량의 사용수명산정을 수행하였으며 사용수명 산정에 사용된 교량의 상태정보는 정밀(정기)점검 및 정밀안전진단의 결과로 산정된 교량의 결함도 점수이다.

식(1)과 교량의 건전도 점수 데이터를 활용하여 Fig. 3과 같

이 교량의 건전도점수곡선을 도출할 수 있다. 그리고 교량의 사용수명종료를 D등급의 중간값($HS = 0.36$)으로 보았을 때, 현재 유지관리 수준에서의 고속도로 교량의 평균 사용수명은 70.8년으로 추정할 수 있다.

2.2 교량의 생애주기비용 모델

2.2.1 예방적 유지관리 효과

교량의 유지관리 비용은 상태등급이 열악할수록 급속하게 증가하게 된다. 국내의 경우, 20년 내에 급격한 노후화가 예상되며 그로 인한 유지관리 비용 급증이 예견되고 있다. 이러한 점을 고려한다면 교량의 생애주기 비용 절감을 위해서는 교량의 상태등급이 악화되기 전에 예방적 유지관리를 통해 향후 교량 노후화에 따른 유지관리 비용 급증을 미연에 방지하도록 해야 한다(Park et al., 2006).

예방적 유지관리는 전설한 바와 같이 교량의 열화를 지연시켜 교량의 사용수명을 연장하고 유지관리 비용을 감소시킨다(MnDOT, 2014). 미네소타 주 교통국 보고서(2014)에 따르면, 예방적 유지관리 활동(예: 세척, 도장, 표면보호제, 균열실링 등)은 부재의 상태를 유지 또는 열화속도를 지연시키는 효과를 보여주는 것으로 보고되고 있다(Table 3). 그리고 같은 보고서에서는 예방적 유지관리 활동을 통해 교량 당 평균수명은 30년으로 연장되며 생애주기비용은 37% 감소된다고 밝혔다(MnDOT, 2014).

미국은 이러한 예방적 유지관리의 효과를 인지하고 다수의 주에서 예방적 유지관리를 2000년 초반부터 시행중에 있다. 미국의 경우 연방정부지원으로 관리되고 있는 고속도로 교량에 대해 HBRRP(Highway Bridge Replacement and Rehabilitation

Table 3 Effects of preventive maintenance on bridge elements(MnDOT, 2014)

Activities	Condition Level(MnDOT rating scale)		
	When applied	After treatment	
Deck	Flushing decks, joints, drains	All bridge with decks	Same but slows deterioration rate
	Crack sealing	≥ Fair, dependent on element condition state	≥ Fair but improved element condition state
	Deck sealing		
	Joint sealing		
Superstructure	Flushing bearing, beam end	All bridge with decks	Same but slows deterioration rate
	Clean and lubricate bearings	Good to fair, dependent on element condition state	Good to fair improves element condition rate
	Sealing/epoxy injection	Good to poor	Good to poor
	Painting beams	Good to fair, dependent on element condition state	Good to fair improves element condition rate
Substructure	Flushing bridge seats, pier caps	All bridges with decks	Same but shows deterioration rate
	Sealing	Good to fair	Good to fair
	Painting	Good to fair, dependent on element condition state	Good to fair improves element condition rate

Program)예산을 사용해 예방적 유지관리를 2002년부터 시행하였으며 연방정부는 2008년에 HBRRP에서 HBP(Highway Bridge Program)로 이름을 변경하여 지속적으로 교량의 예방적 유지관리를 지원하고 있다(WisDOT, 2008). 미국 북부 지역의 다수 주에서는 연방정부 지원(HBP 예산)으로 예방적 유지관리를 시행하고 있으며(Weykamp et al., 2009), 특히 뉴욕 주는 예방적 유지관리 활동 시행 시 예산 및 인력의 25%를 상 태등급 “B”등급(양호, Good condition) 이상 교량에 집중적으로 배정하고 있다(NYSDOT, 2014). 이처럼 미국 연방정부는 예방적 유지관리 예산을 따로 편성하여 필요한 주에 지원하는 등 예방적 유지관리 활동을 적극적으로 시행중에 있다.

2.2.2 교량의 생애주기비용 시나리오

예방적 유지관리(Preventive Maintenance, PM)의 효과 분석을 위해서는 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC) 시나리오를 구성해야 한다. 본 연구에서 사용된 생애주기비용 시나리오를 다음과 같이 구성하였다.

일반적으로 교량의 LCC는 식 (2)와 같이 구성된다. 하지만 이번 연구에서는 고속도로 교량의 바닥면적을 기준으로 표준교량(1,730 m²/교량)을 산정 하여 표준교량 당 예방적 유지관리 비용 효과를 분석 하는 것으로 표준교량의 건설비용과 개축비용은 교량 당 일정한 것으로 가정하였다. 그리고 물가 상승률도 고려하지 않았다. 또한 개축비용을 고려하였을 경우 비교 시점에 따라 개축비용으로 인해 생애주기비용이 급격히 달라진다. 따라서 본연구의 LCC산정에서는 초기공사비용(IC)과 개축비용(RC)은 고려하지 않았다.

$$LCC = \text{초기 공사비용(Initial Construction Cost, IC)} + \text{유지관리비용(Maintenance Cost, MC)} + \text{개축비용(Replacement Cost, RC)} \quad (2)$$

예방적 유지관리 효과 분석을 위해 유지관리비용(MC)만을 고려한 다음 두 가지의 생애주기비용 시나리오를 제안하였다.

$$LCC_{70}^T = \sum_{t=1}^T MC_{70}(t) \quad (3)$$

$$LCC_{100}^T = \sum_{t=1}^T MC_{100}(t) \quad (4)$$

여기서, LCC_x^T 는 사용수명 x 년 교량의 T 시점까지 생애주기비용, $MC_{70}(t)$ 은 사용수명 70년을 위한 시간 t 에서의 연간 유지관리비용, $MC_{100}(t)$ 은 사용수명 100년을 위한 시간 t 에

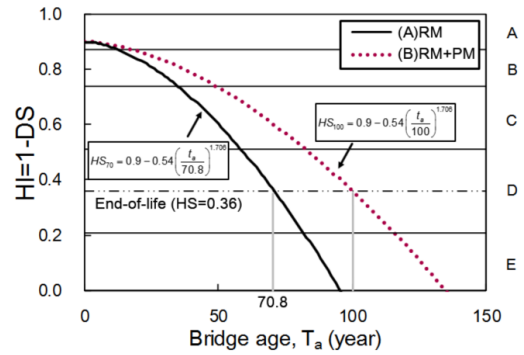


Fig. 4 HS(Health Score) curves, (A)RM: Only reactive maintenance considered(solid line), (B)RM+PM: Both reactive maintenance and preventive maintenance considered(dotted line)

서의 연간 유지관리 비용이다. 현재의 유지관리 전략은 대응적 유지관리(RM)만을 시행하므로 $MC_{70}(t)$ 는 교량의 상태등급에 따른 보수·보강 비용만을 산정 한 것이다. 그리고 $MC_{100}(t)$ 은 사용수명 100년을 위한 유지관리 비용으로 대응적 유지관리(RM)뿐만 아니라 예방적 유지관리(PM)를 포함하여 유지관리 비용을 산정 한 것이다.

앞에서 제시한 두 가지 생애주기비용 시나리오는 다음과 같은 가정을 고려하였다.

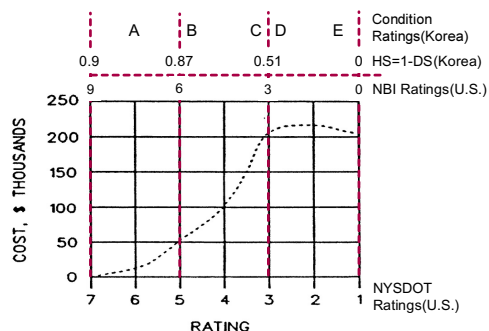
가정 1. 현재의 유지관리 전략인 대응적 유지관리(RM)만을 실시하였을 경우, 교량의 사용수명은 70.8년이며 공용연수에 따른 표준교량의 건전도 점수는 Fig. 4의 실선 곡선을 따른다. 이는 2.1.2장에서 도출된 현재 교량의 상태등급에 기반한 건전도 점수 변화곡선을 나타낸다.

가정 2. 대응적 유지관리(RM)와 예방적 유지관리(PM)를 모두 실시하였을 경우, 교량의 사용수명은 100년으로 가정하였다(Fig. 4의 점선). 이와 같은 수치는 예방적 유지관리 실시 시 교량 사용수명은 30년 증가 하고 비용은 37% 감소한다는 미네소타 주의 보고서를 참고하여 결정하였다(MnDOT, 2014). 예방적 유지관리를 실시하였을 경우 건전도 점수 곡선의 형상계수(식 (1)의 α)또한 변화하지만 본 연구에서는 Fig. 4의 실선 곡선과 동일한 것으로 가정하였다.

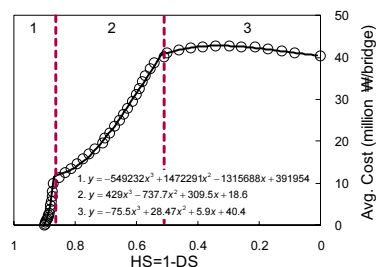
2.2.3 교량의 생애주기비용분석 모델

예방적 유지관리 효과를 분석하기 위해 현 수준의 유지관리 전략(대응적 유지관리, RM)과 예방적 유지관리가 포함된 사용수명 100년을 위한 유지관리 전략(RM+PM)의 비용을 분석 하였다.

본 비용분석에서는 가상의 표준교량(평균면적교량)을 설정하였다. 표준교량(1,730 m²/교량)은 현재 한국도로공사



(a) New York State(Park et al., 2006)



(b) Korea(equivalently converted from data(Fig. 5(a)) of New York State)

Fig. 5 Condition ratings of a bridge versus Average repair-rehabilitation cost

Table 4 Preventive maintenance activities(MnDOT, 2014; Weykamp et al., 2009; KISTEC, 2014)

	Activities	Period(yr)	Category
California	Epoxy inject	3	Sealing
	Joint seals-repair/clean	2	Washing
	Bearings-clean	2	Washing
	Paint-spot prep/spot paint	3	Painting
Virginia	Bridge deck washing(concrete)	1	Washing
	Bridge deck sweeping	1	Washing
	Seats and beam ends washing	2	Washing
	Cutting and removing vegetation	2	Washing
	Scheduled beam ends painting	10	Painting
	Removing debris from culverts	5	Washing
Minnesota	Flushing deck, Joints, Drains	1	Washing
	Crack sealing	condition*	Sealing
	Deck sealing	condition	Sealing
	Joint sealing	condition	Joint
	Rail sealing	condition	Sealing
	Flushing Bearings, Beam ends, Truss members	1	Washing
	Clean and Lubricate Bearings	condition	Bearing
	Sealing/Epoxy Injection	condition	Sealing
	Painting Beams	condition	Painting
	Flushing bridge seats, pier caps	condition	Washing
Michigan	Sub_Sealing	condition	Sealing
	Sub_Painting	condition	Painting
	Sub_Debris Removal	1	Washing
	Superstructure wash	1	Washing
	Vegetation control	1	Washing
	Drain system clean/repair	1	Washing
Korea	Paint-spot	condition	Painting
	Joint repair	condition	Joint
	Crack sealing	condition	Sealing
	Washing(Drains/Seat/Girder/Rail)	0.5	Washing
Korea	Joint	condition	Joint
	Bearing	condition	Bearing
	Painting	condition	Painting

*condition: condition-based

관리하는 교량의 바닥판 총면적에 관리 교량 개소수를 나눈 것으로 교량 당 평균 바닥판 면적을 의미한다. 교량의 상태등급에 따른 보수·보강 비용관계는 아직 국내에서는 정립되어 있지 못한 관계로 미국의 FHWA 자료를 활용 하였다. FHWA 자료(Fig. 5(a))는 교량의 상태등급에 따른 교량의 평균 보수·보강비용을 나타내고 있다. FHWA의 교량 상태등급에 따른 보수·보강 비용 그래프를 활용하여 현재 국내 고속도로 교량의 평균 상태등급($HS_{avg}=0.87$)과 최근 3년간 교량 당 투입된 평균 보수·보강 비용(7,924,600원/교량)을 기준으로 FHWA 그래프를 등가적으로 국내 고속도로 교량 상태등급에 따른 보수·보강비용으로 변환 하였다(Fig. 5(b)).

등가적으로 변환된 교량상태등급에 따른 보수·보강 비용(Fig. 5(b))과 교량의 건전도 점수 변화 곡선(Fig. 4)을 이용하여 표준 교량 당 생애주기 비용을 산출 하였다. Fig. 5(b)에서 보여주고 있는 비용곡선은 예방적 유지관리 비용이 포함되어 있지 않은 보수·보강 비용 곡선이다.

본 연구는 예방적 유지관리 활동의 효과를 분석 하는 것이 목적이므로 보수·보강 비용 곡선과 함께 적용될 예방적 유지관리 항목, 주기, 비용 결정이 필요하다. 현재 국내 고속도로 교량에는 예방적 유지관리 활동 항목이 구체적으로 명시되어 있지 않아 외국에서 시행되고 있는 유지관리 항목 및 한국시설안전공단에서 제안한 예방적 유지관리 항목(Table 4)을 참고하여 결정하였다.

Table 4를 바탕으로 분석에 적용할 예방적 유지관리 활동 및 주기를 Table 5와 같이 선정 하였다. 국내 고속도로의 경우, Table 4에서 조사된 항목들 중 일부(교좌장치, 신축이음, 균열 보수)는 보수·보강 활동에 포함하여 실시되고 있으므로 본 연구의 예방적 유지관리 활동으로 포함시켜 고려하게 되면 이 중으로 고려하는 것이 되므로 본 연구에서는 교량 청소 및 도

장만을 예방적 유지관리 항목으로 선정하여 분석에 적용 하였다. 다만 국내 고속도로 교량이 처해 있는 조건(예: 차량하중 환경하중 등)이 가정2의 상황과 상이하기 때문에 실제 가정2에서 언급한 예방적 유지관리 활동 효과는 현실적으로 제외된 항목을 고려한다 하여도 달라 질 수 있다. 이러한 모델의 변동성은 추후 데이터 축적을 통해 유지관리 활동과 교량 성능과의 상관관계가 정립이 된다면 점차 줄어 들것으로 판단 된다. 도장의 경우 강교도장과 콘크리트 교량의 표면보호제 살포로 구분되어 있으므로 분석 시 각각의 교량 개소수 비율을 산정하여 표준교량에 적용 하였다. 국부도장의 경우 도로공사 연구 보고서(KECRI, 2015)를 참고하여 강교량의 도장 손상률을 반영 하였다.

3. 교량의 생애주기비용(LCC) 산정

예방적 유지관리 효과를 분석하기 위해 앞에서 제시한 비용모델과 건전도 점수 모델을 이용하여 70.8년과 100년 동안의 교량 당 생애주기비용을 산정하였다(Fig. 6).

현재의 교량 유지관리인 대응적 유지관리(RM)만을 시행 하였을 경우, 70.8년에서 수명종료를 맞이하므로 이 때 교량의 개축이 필요하다. 하지만 교량의 개축은 많은 사회적 비용을 필요로 하므로 다양한 경제·사회적 의사 결정 단계를 거치게 된다. 실제 교량이 수명종료에 도달하였다 하더라도 개축이 이루어지지 않고 보수·보강만 이루어지는 경우도 있을 것이다. 따라서 이번 논문에서는 순수하게 유지관리 비용 측면만을 고려하여 교량의 개축 없이 100년 동안의 생애주기비용을 분석 하였다.

예방적 유지관리를 포함한 예산(RM+PM)을 투입 시, 운용 초기에는 예방적 유지관리로 인해 현재의 유지관리 전략(RM)에 비해 더 많은 유지관리 비용이 필요하지만 일정 시간

Table 5 Preventive maintenance activities used in estimating Life Cycle Cost(LCC) of a typical bridge(MnDOT, 2014; KECRI, 2015; KEC, 2015)

Category	Activities	Period(yr)	Unit	cost(₩)
Washing	Deck/Joint	1*	bridge	500,000*
	Substructure			
Painting	Drains	10**	m ²	42,629***
	Spot(steel)			
	Entire(steel)			
	Surface protection (concrete)			

*Transportation Asset Management Plan of Minnesota(MnDOT, 2014)

**Research Report of Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI, 2015)

***Unit cost tables for construction activities(KEC, 2015)

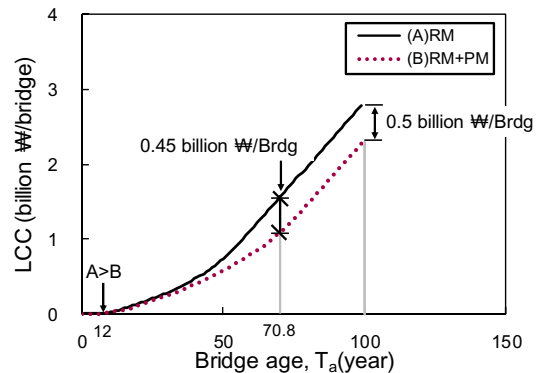


Fig. 6 Results of LCC analysis during 70.8-year period and 100-year period

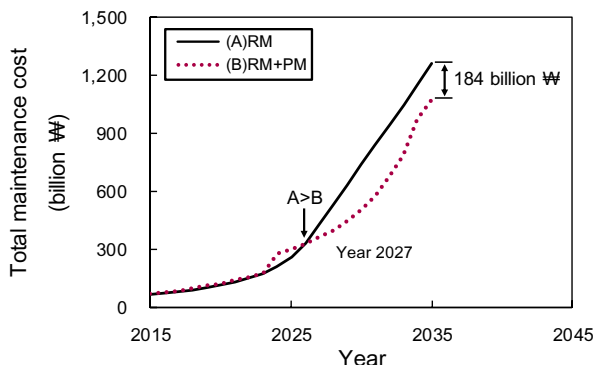


Fig. 7 Prediction of total maintenance cost in 20 years

이 지난 시점(공용연수 12년)부터는 비용이 작음을 알 수 있다. 구체적으로 교량의 공용연수 70.8년이 지난 시점에서 LCC는 대응적 유지관리예산(RM) 투입 시 교량 당 15.9억원 그리고 예방적 유지관리 포함 예산(RM+PM)투입 시 교량 당 11.2억원으로 산정이 되었다. 70.8년간 교량 당 4.5억원 정도의 금액이 절약되는 것으로 예측되었다. 현재 도로공사가 관리하는 고속도로 교량 총 8,425 개소를 고려 할 경우 현재의 연간 유지관리 비용과 비슷한 연간 594억의 예산이 절약 될 것으로 예측 된다. 100년간의 비용 효과 고려 시 대응적 유지관리 예산(RM)만 투입된 경우는 더욱 큰 격차를 보여준다. 향후 20년간의 고속도로 전체 교량 관리 비용도 다음 그림과 같이 분석되었다(Fig. 7).

예방적 유지관리가 포함된 유지관리 전략(RM+PM)의 경우 대응적 유지관리만 포함된 현재의 유지관리(RM)에 비해 100년간 교량당 5억의 비용절감 효과가 발생하며(Fig. 6) 향후 20년 뒤에는 총 1,837억원, 즉 연간 약 92억원의 비용절감 효과가 있다(Fig. 7). 단기적으로는 추가비용으로 다소 불리해 보이지만 장기적 관점에서 예방적 유지관리를 포함한 유지관리 전략이 훨씬 경제적임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 예방적 유지관리 효과를 교량의 생애주기비용 관점에서 분석 하였다. 생애주기비용을 산정하기 위해 비용 모델과 교량의 건전도 지수 변화 모델을 제안하여 활용하였다. 제안한 모델을 사용하여 생애주기비용을 산정 하였으며 이를 기초로 하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

1) 2004~2013년동안 HBMS상에 기록되어 있는 고속도로 교량의 점검기록을 사용하여 회귀분석을 통해 공용연수에 따른 건전도 점수 변화 모델을 산정하였다. 현재 수준의 교

량 유지관리 전략(대응적 유지관리만 실시)하에서는 교량의 평균 사용수명은 70.8년으로 예측 되었다.

- 2) 현재 국내 고속도로 교량에는 예방적 유지관리 활동이 이루어 지지 않고 있다. 따라서 외국문헌과 한국시설안전공단이 제시한 예방적 유지관리 활동을 참고하여 본 연구에서는 교량의 청소 및 도장만을 예방적 유지관리 활동으로 선정하여 교량의 생애주기 비용을 산정하였다.
- 3) 현재 국내에서는 교량의 상태등급에 따른 보수·보강 비용 모델이 정립 되어 있지 못한 관계로 FHWA에서 제시한 보수·보강 비용 관계를 사용하여 국내 고속도로 교량의 상태 등급에 따른 보수·보강 비용 모델을 제시 하였다.
- 4) 교량의 건전도 점수 변화 모델과 비용모델을 사용하여 예방적 유지관리 효과를 생애주기비용 관점에서 분석 하였다. 100년간 예방적 유지관리 활동으로 인해 교량 당 5억원의 절감효과를 볼 수 있으며 현재 예방적 유지관리 활동을 실시할 경우 20년 후(2035년)에는 총 1,837억원, 즉 연간 약 92억원의 비용 절감효과를 볼 수 있는 것으로 분석 되었다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원과 충남대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

ASCE (2013), 2013 Report Card for America's Infrastructure, American Society of Civil Engineers, U.S.

Jeong, Y., Kim, W., Lee, I., Lee, J., and Kim, J. (2016a), Development of Bridge Inspection Reliability and Improvement Strategy, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, accepted (in Korean).

Jeong, Y., Kim, W., Lee, I., Lee, J., and Kim, J. (2016b), Service Life Definition and end-of-life Criterion for Bridge Maintenance, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(4), 68-76 (in Korean).

KEC (2015), Unit Cost Tables for Construction Activities, Korea Expressway Corporation, Korea (in Korean).

KECRI (2015), Prediction Model for Long-term Maintenance Costs of Highway Bridges (Final Report), Korea Expressway Corporation Research Institute, Korea (in Korean).

KISTEC (2012), Guideline and Commentary of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures-Bridge, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Korea (in Korean).

KISTEC (2014), Manual for Bridge Maintenance, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Korea (in Korean).

- KOSIS (2014), Life Table of 2013, Korea Statistical Information Service, Korea (in Korean).
- KOSIS (2015), Status of the Nation's Bridges and Tunnels in Republic of Korea, Korea Statistical Information Service, Korea (in Korean).
- Lee, I., Park, C., Park, M., and Lee, I. (2016), Bridge Defect Management to Extend Service Life, *Proceedings of Spring Conference of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2016*, 669-670 (in Korean).
- MnDOT (2002), Preventive Maintenance (Final Report), Minnesota Department of Transportation, U.S.
- MnDOT (2014), Transportation Asset Management Plan (Draft), Minnesota Department of Transportation, U.S.
- MOLIT (2012), Guideline of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- NYS DOT (2014), New York State DOT Transportation Asset Management Plan Draft v 05-02-14 (External Review), New York State Department of Transportation, U.S.
- Park, B., Park, C., Kim, J., and Shin, J. (2006), Preventive Maintenance of Highway Bridge Structures, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 10(3), 3-13 (in Korean).
- Park, C., Shin, J., and Lee, Y. (2005), Rational Measures for the Maintenance of Bridges, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 53(4), 2005, 104-111 (in Korean).
- Patterson, W. (1987), Road Deterioration and Maintenance Effects, The World Bank Highway Design and Maintenance Standards Series.
- Sun, J. and Park, K. (2014), Estimation of Budget Demands of Bridges Based on Maintenance Strategy, *Proceedings of Spring Conference of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2014*, 785-788 (in Korean).
- Thompson, P. D., Ford, K. M., Arman, M. H. R., Labi, S., Sinha, K. C., and Shirole, A. M. (2012), Estimating Life Expectancies of Highway Assets - Volume 1: Guidebook, Transportation Research Board, NCHRP 713, National Academy of Sciences, U.S.
- Weykamp, P., Kimball, T., Hearn, G., Johnson, B. V., Ramsey, K., D'Andrea, A., and Becker, S. (2009), Best Practices In Bridge Management Decision-Making, NCHRP Scan 07-05, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, U.S.
- WisDOT (2008), A Systematic Process for Using Federal Aid to Support Bridge Preventive Maintenance, Wisconsin Department of Transportation, U.S.

Received : 06/01/2016

Revised : 06/27/2016

Accepted : 07/18/2016

요 지 : 본 논문은 교량의 예방적 유지관리 효과를 생애주기비용 절감 측면에서 분석 하였다. 예방적 유지관리는 현재 실시되고 있는 대응적 유지관리 전략과 대비 되는 유지관리 전략으로 교량의 열화지연을 통해 궁극적으로는 교량의 사용수명을 연장 시키며 생애주기비용을 절감시키는 유지관리 전략이다. 이러한 예방적 유지관리 효과를 분석하기 위해 교량의 공용연수에 따른 건전도 점수 변화 모델과 FHWA 자료를 바탕으로 한 국내 고속도로 교량의 건전도 점수에 따른 보수·보강 비용 모델을 제시 하였다. 제시한 복수의 모델과 국내의 참고 문헌을 바탕으로 제안된 예방적 유지관리 항목(청소와 도장)의 비용과 주기를 활용하여 사용수명 100년까지의 표준교량(1,730 m²/교량) 당 생애주기 비용과 향후 20년간의 고속도로 총 유지관리 비용을 산정 하였다. 분석 결과 100년간 예방적 유지관리 활동으로 인해 교량 당 5억원의 절감효과를 볼 수 있으며 현재 예방적 유지관리 활동을 실시할 경우 20년 후(2035년)에는 총 1,837억원, 즉 연간 약 92억원의 비용 절감효과를 볼 수 있는 것으로 분석 되었다.

핵심용어 : 교량 유지관리, 생애주기비용, 예방적 유지관리
