

교량 상태에 따른 생애주기비용 영향 분석

박준용, 이기세*
서울기술연구원 도시인프라연구실

A Study on Life Cycle Cost According to Bridge Condition

Jun-Yong Park, Keesei Lee*
Department of Urban Infrastructure Research, Seoul Institute of Technology

요약 노후화로 인해 급증하는 유지관리 비용에 대응하기 위하여 자산관리적 관점에서 교량의 유지관리 비용 예측은 필수적이다. 교량의 유지관리 비용 예측은 교량 상태에 기반하여 생애주기비용을 지표로 수행되며, 일반적으로 교량 상태는 열화환경, 하중조건, 재료특성 등에 따라 상당히 넓은 분포특성을 가진다. 본 논문에서는 교량 상태에 영향을 주는 변수로 사용수명, 열화속도, 점검오차를 활용하는 상태예측모델을 활용하여 교량 상태가 생애주기비용 산정에 미치는 영향을 평가하였다. 검토된 변수 중에서 점검오차가 특히 생애주기비용 산정에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그리고 실제 고속도로 교량의 건전도지수 분포를 기반으로 상하한을 모사하는 상태예측모델을 구축하여 개별 교량에서 발생가능한 생애주기비용의 상하한 값을 추정하였다. 상태예측모델과 연계하여 생애주기동안 발생하는 비용을 예측하기 위해 교량 건전도지수에 따른 보수보강비용 산정식을 활용하였다. 분석을 통해 교량의 상태에 따라 생애주기비용의 차이가 상당히 크게 발생함을 확인하였다. 이에 따라 기존의 평균을 모사하는 단일모델로는 효율적 관리가 어려울 수 있으므로, 향후 다양한 종류의 상태예측모델을 구축하여 교량에 따라 적합한 모델을 적용하는 등 개별 교량의 유지관리 비용 예측신뢰도를 높이기 위한 연구가 필요하다.

Abstract To cope with the increasing maintenance costs due to aging, the maintenance cost was evaluated from the perspective of asset management. The maintenance cost can be predicted based on the condition of the bridge, and the life cycle cost is used as an index. In general, the condition of a bridge has a wide distribution characteristic depending on the deterioration, load, and material characteristics. In this paper, to evaluate the effect of the bridge conditions on the life cycle cost, condition prediction models were constructed considering the service life, deterioration rate, and inspection error, which are the main variables of the bridge condition and life cycle cost calculation. In addition, condition prediction models were constructed based on the distribution of the health index to estimate the upper and lower bounds of the life cycle costs that can occur in individual bridges. Life cycle cost analysis showed that the life cycle cost differed significantly according to the condition of the bridge. Accordingly, research will be needed to increase the reliability of predicting the life cycle cost of individual bridges.

Keywords : Life Cycle Cost, Condition Prediction Model, Service Life, Deterioration, Bridge Inspection

본 논문은 서울기술연구원(2020-AA-001, 계측데이터 기반 교량 형상추정 방안)의 지원을 받아 수행된 연구임.

*Corresponding Author : Keesei Lee(Seoul Institute of Technology)

email: kslee@sit.re.kr

Received October 22, 2020

Revised December 1, 2020

Accepted February 5, 2021

Published February 28, 2021

1. 서론

압축성장시기에 집중적으로 건설된 교량들은 대부분 20년 이상 사용되었으며, 일반적으로 노후화의 기준이 되는 30년 이상 사용된 교량의 비율도 점차 증가하고 있다. 서울시의 경우 30년 이상된 도로시설물이 2018년 기준으로 35% 수준이며, 10년 뒤에는 60% 이상이 30년을 넘어서게 된다[1]. 향후 다수 교량의 노후화로 인해 급증하는 유지관리비용이 문제가 될 것이며, 이에 따라 효율적으로 대응하기 위한 유지관리 전략이 필요하다.

노후화되는 교량이 증가함에 따라 선제적 관리가 중요시되고 있지만, 노후화의 기준으로 활용되는 30년의 근거는 명확하지 않다. 최신 재료의 개발, 보수보강 공법 등으로 점차 장수명화 되어가는 상황에서 30년이라는 기준은 적합하지 않을 수 있다. 따라서 공용연수에 근거한 노후화 기준을 적용하기보다는 교량의 주요 재료특성, 열화 환경, 통행량 등의 조건에 따라 실제 상태를 예측하고 이에 따라 유지관리 전략, 예산 계획이 결정되어야 한다.

실제로 재료, 하중, 환경, 형식 등의 조건에 따라 교량 상태에 큰 차이가 발생하며, 심지어 점검 오차로 인해 점검으로 얻는 상태와 실제 상태의 차이가 발생하기도 한다. 교량 상태의 차이가 크게 발생하면 예상 유지관리비용 또한 차이가 크게 발생하며, 이 경우 관리전략 및 예산 계획 수립에 차질이 발생한다.

따라서 본 논문에서는 교량 상태를 결정하는 주요 변수들에 따른 생애주기비용 영향을 분석하고, 상태에 따라 발생 가능한 개별 교량의 생애주기비용 상하한값을 추정하고자 한다. 교량의 사용수명, 열화속도, 점검오차 세 가지 변수를 고려하여 교량 상태예측모델을 구성하였으며, 구성된 모델을 활용하여 변수별 생애주기비용 영향을 비교하였다. 그리고 실제 고속도로 교량의 건전도지수 이력을 활용하여 건전도지수 분포의 상하한을 모사하는 상태 예측모델을 구성하였으며, 이때 교량 형식은 구분하지 않고 모든 형식의 교량 이력을 활용하였다. 이에 따라 개별 교량의 생애주기비용의 상하한을 추정하였다.

2. 연구 동향

일반적인 교량 유지관리 전략은 보수, 보강, 개축과 같은 유지관리 활동의 계획을 수립하고 예산을 최적으로 활용하는 역할을 가진다. 경제성을 고려한 전략 수립을 위해서 경영·경제학적인 자산관리 개념을 도입하여 생애

주기비용 분석 등이 활용되기도 한다. 이때 분석에 주로 활용되는 요소는 교량의 상태를 예측하기 위한 모델, 유지관리 비용을 예측하기 위한 모델, 보수보강 효과를 정량화하기 위한 모델 등이 있다.

한국도로공사[2]는 고속도로 교량관리시스템에서 관리하고 있는 2004년부터 2013년까지의 교량 상태등급 이력을 활용하여 고속도로 교량의 평균 건전도 변화곡선을 개발하였으며, 고속도로 교량의 평균수명을 추정하였다. 총 6만 개가 넘는 교량의 건전도지수가 활용되어 분포가 상당히 크게 발생하였으나, 평균을 모사하는 모델만 개발되어 다양한 조건의 교량에 적용하기에는 한계가 있다. 그러므로 다양한 조건의 교량에 적용하기 위해서는 건전도지수, 평균사용수명, 형상계수, 점검오차 등의 변수 조절을 통한 모델개발이 필요하다. 정유석 등[3]은 한국도로공사의 상태예측모델을 활용하여 예방적 유지관리의 비용 절감 효과를 생애주기비용 측면에서 분석하였다.

한국건설기술연구원에서는 교량의 성능변화를 반영하여 관리주체가 관리하는 교량 전체의 유지관리 비용을 예측하는 절차를 개발하였다[4]. 유지관리 비용을 예측하기 위하여 보수보강 비용 예측모델, 성능예측모델, 개축 비용 및 시기, 목표관리수준, 유지관리 활동에 따른 성능 향상 한계값과 같이 다양한 변수를 고려하였다. 실제로 비용에 영향을 주는 대부분 변수를 고려하여 예측 방법 자체의 신뢰도는 높지만, 개별 변수를 정의하기 위한 정보가 충분히 있을 경우 신뢰도 높은 분석이 가능할 것으로 추정된다. 성능예측모델은 보수보강이 수행되지 않은 기간의 상태등급 이력을 활용하여 유지관리 활동의 효과를 제외한 교량의 연평균 열화율을 추정한다[5]. 이 모델 또한 관리교량의 평균 상태를 추정하기 위해 개발되었으므로, 개별 교량의 상태 추정 및 비용 분석에 적용하기는 어렵다.

관리 교량들의 상태는 교량이 처한 열화환경에 따라 상당히 큰 차이를 보이며 이로 인해 사용수명 또한 큰 차이가 발생한다. 강설시 도로에 살포하는 제설제는 염분 성분으로 인해 바닥판의 열화를 일으키는 주요 원인으로 꼽힌다. 실제로 제설제 사용량이 가장 많은 지역과 가장 적은 지역에서 바닥판의 열화속도가 상당히 차이이며, D 등급 기준으로 사용수명이 2배 차이가 나는 것을 확인하였다[6]. 그리고 미국의 경우 열화환경이 열악한 북부와 상대적으로 좋은 남부의 경우 사용수명이 13년정도 차이가 나는 것을 확인하였다[2]. 미국의 미네소타 주에서는 다양한 상태를 가지는 교량들에 대한 예측의 정확도를 높이기 위하여 지역, AADT, 상부구조 형식, 바닥판 형식

등을 고려하여 7종류의 상태예측모델을 개발하였다[7].

국외에서는 교량 관리시스템을 개선하기 위하여 비용 영향이 작은 변수를 제외하고 영향이 큰 변수는 운영단계에서 업데이트하는 방식을 적용하였으며 이에 대한 효과를 생애주기비용으로 평가하기도 하였다[8]. UHPC를 활용한 교량의 성능을 기존 콘크리트 교량의 성능과 비교하거나[9], 케이블과 같은 주요 부재 단위에서 비용효율성을 평가하기 위해 생애주기비용 분석이 활용되었다[10, 11]. 겨울철 도로포장 유지관리를 위해 개발된 제설시스템의 성능을 기존 제설시스템과 비교하기 위해 생애주기비용 분석이 적용되기도 한다[12]. 이처럼 국외 사례에서는 생애주기비용 분석 방법보다는 설계와 유지관리 단계에서 발생하는 여러 종류의 의사결정에 비용효율적으로 대응하기 위한 연구가 주를 이루고 있다.

선행 연구들은 관리주체의 입장에서 관리 교량 전체의 유지관리 비용 혹은 평균 유지관리 비용의 예측에 집중하였다면, 본 논문에서는 비용에 영향을 주는 주요 변수들에 대한 영향 평가와 함께 실제 고속도로 교량의 넓은 건전도지수 분포를 충분히 고려하기 위하여 개별 교량의 발생 가능한 유지관리 비용의 상하한값을 추정하는 데 목적이 있다.

3. 상태예측모델

3.1 교량의 상태예측모델

교량의 상태변화에 영향을 주는 요인은 노후화, 하중 변화, 기상변화 등 다양하며, 세부요인별 매커니즘이 많이 규명되어 있으나 이를 복합적으로 고려하여 교량의 상태를 예측하기는 여전히 불확실성이 많다. 이러한 문제로 인해 진단점검을 통해 얻은 실제 교량의 상태등급 이력을 활용하여 공용연수에 따른 교량 상태등급을 예측하기도 한다.

한국도로공사의 경우 Fig. 1과 같이 10년간 상태이력이 고려되어 고속도로 교량의 전체적인 경향을 확인할 수 있는 상태예측모델을 개발하였다. 그리고 상태예측모델과 모델 개발에 활용된 건전도지수의 분포까지 함께 포함되어 있으므로 실제 고속도로 교량 상태에 따른 생애주기비용의 산정에 가능하다. 또한, 교량의 상태에 영향을 주는 다양한 변수를 모델에서 고려하고 있다는 장점이 있다. 반면에 한국건설기술연구원의 모델은 보수보강효과를 제외한 열화율을 고려하였기 때문에 다양한 유지관리 전략에 따른 효과를 분석하는 등의 활용성이 높

지만, 생애주기비용 평가를 위해 유지관리 활동의 효과에 대한 정량화 모델 등 신뢰할만한 분석을 위해서 추가적인 정보가 많이 필요하다는 특징이 있다.

이러한 사항을 고려하여 이 연구에서는 다양한 조건에 따른 생애주기비용의 차이를 분석하기 위하여 한국도로공사가 개발한 교량 상태예측모델을 활용하였다. 상태예측모델인 Eq. (1)을 활용하여 공용연수별 건전도지수를 산정한다.

$$HI = I - (I - HI_{EOL}) \left(\frac{T_a}{T_{as}} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서 HI 는 건전도지수($HI = 1 - DS$), DS 는 결함도지수, I 는 초기 건전도지수, β 는 상태예측모델의 비선형형상계수, T_{as} 는 평균사용수명, T_a 는 공용년수, HI_{EOL} 는 사용수명 종료 시점의 건전도지수이다.

모델의 시작점 역할을 하는 초기 건전도지수 I 는 상태등급 A의 건전도지수 0.9를 활용하여 설정되었다. HI_{EOL} 는 사용수명 종료의 기준으로 정유석 등[13]의 연구결과를 참고하여 사용제한여부를 검토하는 상태등급 D와 사용이 중단되는 상태등급 E의 중간값으로 설정하였으며, 이때의 건전도지수 값은 0.36이 적용되었다. T_{as} 는 2013년 기준으로 10년간 고속도로 교량의 평균 사용수명인 70.8년을 적용하였다[2]. β 는 비선형형상계수이며 시간에 따른 교량의 열화속도를 나타낸다. 연간 열화속도가 동일하다면 1이며, 공용연수에 따라 열화속도가 점차 증가한다면 1보다 큰 값을 가지고 반대의 경우는 1보다 작은 값을 가진다. β 도 마찬가지로 2013년 기준으로 10년간 고속도로 교량의 평균을 고려하여 1.706을 적용하였다[2].

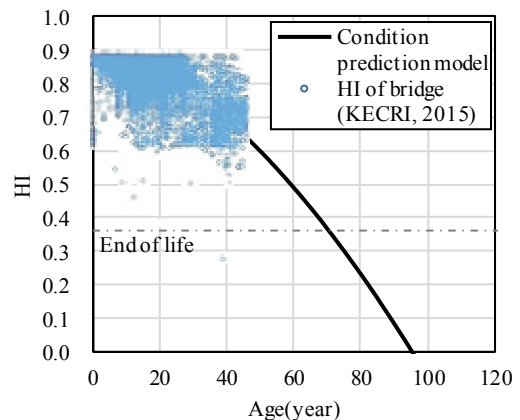


Fig. 1. Condition prediction model

3.2 매개변수 분석 시나리오

상태예측모델의 주요 변수인 교량의 사용수명, 열화속도, 점검오차에 따른 생애주기비용의 영향을 검토하기 위하여 6종류의 상태예측모델을 구성하였다. 변수 영향 평가의 대조군으로서 고속도로 교량의 평균을 나타내는 한국도로공사가 개발한 상태예측모델을 활용하였다. 실험군으로서 교량의 사용수명과 열화속도를 고속도로 교량의 평균값에서 10% 증감 적용한 모델을 각각 2종류씩 구성하였으며, 점검오차는 한국도로공사의 점검오차 평가결과를 반영하는 1종류의 모델을 구성하였다.

교량의 사용수명은 Fig. 2과 같이 상태예측모델의 변수 T_{as} 의 10% 증감을 통해 고려되었다.

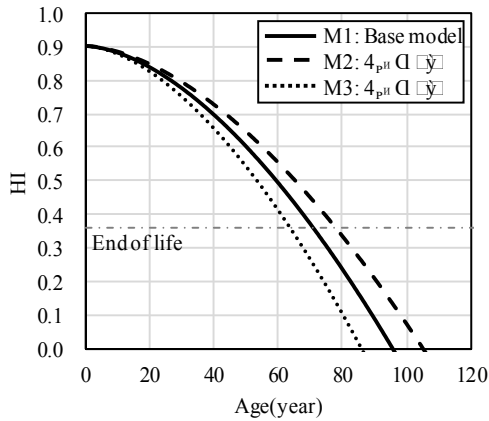


Fig. 2. Condition prediction models considering the difference in service life

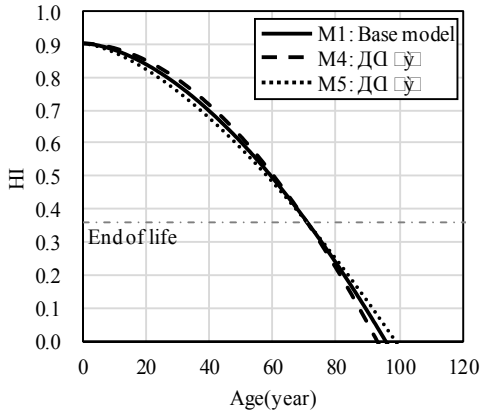


Fig. 3. Condition prediction models considering the difference in deterioration rate

열화속도는 사용수명과 높은 상관성을 지니는 변수로서 함께 조정되는 것이 합리적이지만, 개별 변수의 영향을 분석하기 위하여 수명중요시점은 고정하고 시간에 따른 열화속도의 변화만을 조정하였다. 상태예측모델에서는 형상계수를 통해 조정하였으며, Fig. 3과 같이 형상계수 β 의 10% 증감을 통해 모델을 구성하였다.

점검이 어려운 부재 위치, 점검자의 숙련도 차이 등의 이유로 실제 교량의 상태와는 다른 점검결과를 도출하기도 한다. 한국도로공사[2]는 점검오차의 수준을 평가하고 상태예측모델에 반영하였다. 정기(정밀)점검과 정밀안전진단의 결과 차이를 활용하여 점검오차를 평가하였다. 정기(정밀)점검보다 면밀히 수행되는 정밀안전진단에서 주로 건전도지수가 낮게 나오는 경향을 확인하였으며, 이를 상태예측모델에 반영했을 때 조정된 교량 평균수명은 66.2년이며 상세모델은 Fig. 4와 같다.

한국도로공사가 개발한 상태예측모델의 기본형과 매개변수 연구를 위하여 구성된 5종류의 상태예측모델의 주요 변수는 Table 1과 같다.

Table 1. Variables in condition prediction model

Variables	M1	M2	M3	M4	M5	M6
I	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.842
T_{as} (year)	70.8	77.9	63.7	70.8	70.8	70.8
β	1.706	1.706	1.706	2.047	1.365	1.706

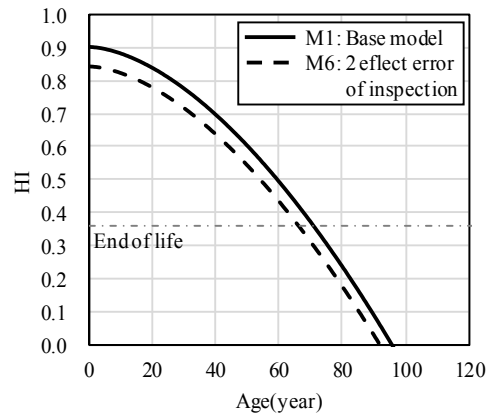


Fig. 4. Condition prediction model considering the error of inspection

3.3 극단 상태 분석 시나리오

교량의 건전도지수는 Fig. 1과 같이 상당히 큰 분포를 가지는 것을 알 수 있다. 교량에 따라 열화환경, 교통량,

부재의 재료특성 등의 차이로 다양한 상태와 수명을 가지게 된다. 이러한 차이는 준공부터 존재하며 시간에 따라 점차 차이가 증가하게 된다. 상태예측모델의 기본형으로는 평균을 벗어난 교량의 상태를 예측할 수 없으므로, 시간에 따른 교량 상태의 대략적인 상하한을 확인하며 이에 따른 생애주기비용의 편차를 확인하기 위하여 두 가지 모델을 구성하였다.

상태예측모델의 세 가지 변수를 조정하여 건전도지수 분포의 상하한을 모사하였다. 상세한 모사를 위해서는 약 6만 개의 건전도지수에 대한 통계분석이 필요하지만, 원본 데이터가 없는 관계로 Fig. 1의 분포형상을 토대로 모사를 수행하였다. 이때 평균수명과 형상계수를 동일한 비율로 조정하였으며, 하한선의 경우 점검오차를 반영하였다. 조정 결과 Fig. 5와 같이 50%의 증감을 주었을 경우 실제 분포의 상하한과 유사한 모사가 가능함을 확인하였다. 하한선을 나타내는 M8의 경우, 형상계수가 1보다 낮아지면서 열화속도가 시간에 따라 점차 느려지는 형상을 가지게 되었는데, 이는 일반적인 열화속도 곡선과는 반대의 형상을 나타낸다. 다만, 해당 모델은 상태저하 매커니즘을 규명하거나 교량상태를 정밀하게 예측하기 위한 모델이 아니라 건전도지수의 하한선을 모사하여 생애주기 비용 산정에 활용하기 위해 개발되었으므로 추가적인 변수 조정을 수행하지 않았다. 상하한을 모사하기 위하여 구성된 상태예측모델의 주요 변수는 Table 2와 같다.

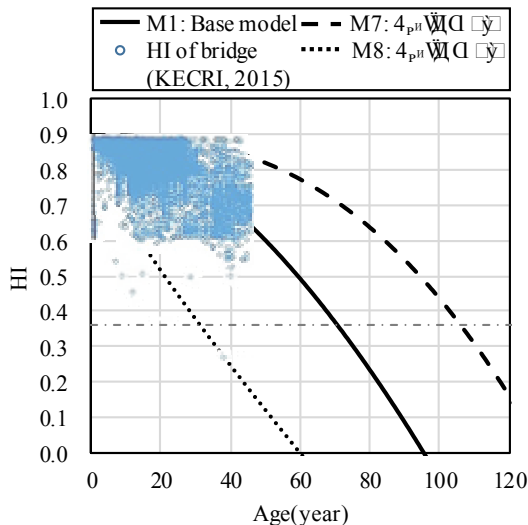


Fig. 5. Condition prediction models considering extreme condition

Table 2. Variables in condition prediction model

Variables	M1	M7	M8
I	0.900	0.900	0.842
T_{as} (year)	70.8	106.2	35.4
β	1.706	2.559	0.853

4. 생애주기비용 분석

4.1 생애주기비용 산정 절차

생애주기비용은 유지관리 단계에서 유지관리 전략에 따른 관리 교량 전체의 필요 예산을 추정하기 위함이나, 개별 유지관리 활동의 시점과 공법 등을 조정하여 최적 유지관리를 위한 분석을 위해 주로 활용된다. 생애주기비용은 교량 건설을 위한 초기비용, 유지관리비용, 수명종료에 따른 개축비용으로 분류된다. 교량 건설을 위한 초기비용과 개축비용은 교량 상태와 유지관리 수준에 따라 달라지는 비용이 아니므로 분석에서 제외하였다. 그리고 유지관리비용은 진단·점검 비용과 보수·보강 비용으로 나뉘게 되며, 진단·점검은 안전등급에 따라 정해진 주기대로 실시되므로 상태에 따른 생애주기비용의 영향이 매우 적다. 따라서 교량의 생애주기 동안 발생하는 보수보강 비용을 생애주기비용으로 가정하고 분석하였다.

생애주기비용을 평가하기 위해 한국도로공사가 개발한 Fig. 6의 교량 건전도지수에 따른 평균 보수·보강 비용모델을 활용하였다. 이는 FHWA가 제안한 교량 상태등급에 따른 평균 보수·보강 비용을 국내 고속도로 교량의 평균 건전도지수와 보수보강비용에 맞추어 환산한 그래프이다.

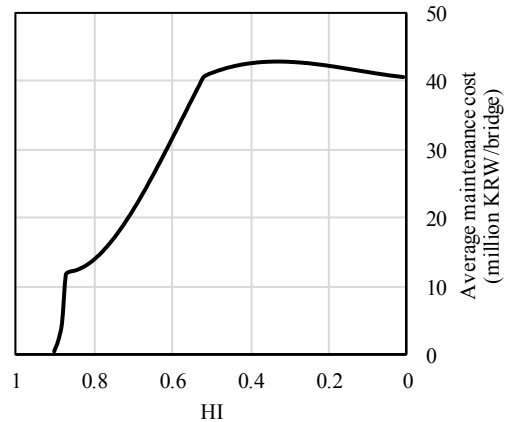


Fig. 6. Average maintenance cost according to condition of bridge

상태예측모델과 보수보강 비용모델을 활용하여 Fig. 7의 절차대로 교량 상태에 따른 생애주기비용을 산정하였다. 준공시점부터 매년 상태를 예측하고 상태에 따른 보수보강비용을 산정하며, 이를 교량의 수명종료 시점까지 반복하게 된다. 수명종료 시점에서 누적 보수보강비용을 계산하여 생애주기비용으로 활용하였다.

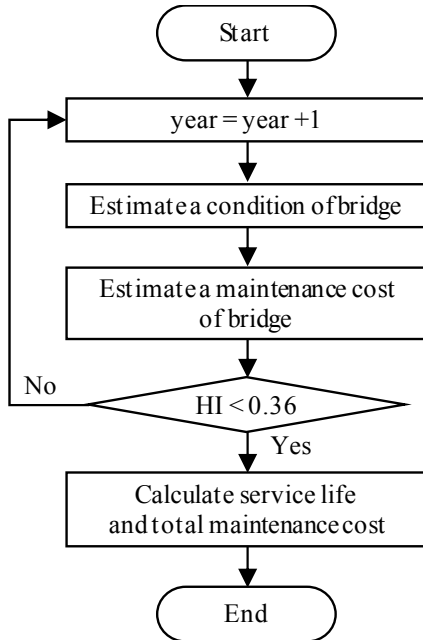


Fig. 7. Procedure for calculating service life and total maintenance cost

4.2 매개변수에 따른 생애주기비용 분석

매개변수 영향을 확인하기 위해 구성된 6종류의 상태 예측모델을 활용하여 생애주기비용을 산정하였다. 여섯 종류 모델에서 분석된 사용수명이 64~78년으로 다양한 값을 지니기 때문에 생애주기비용의 비교를 위하여 동일한 시점인 60년을 기준으로 검토하였다. Table 3은 공용년수 60년 기준으로 평가된 생애주기비용을 나타낸다.

Table 3. Life cycle cost from M1 to M6

Model	Life cycle cost (billion KRW/bridge)	Ratio to M1
M1	1.09	-
M2	0.95	0.88
M3	1.23	1.13
M4	1.01	0.93
M5	1.17	1.08
M6	1.42	1.31

Fig. 8은 평균수명에 따른 생애주기비용 산정결과이며, 평균수명 10%가 바뀔 경우 약 13%의 비용차이가 발생한다. 이는 열화환경은 동일하지만 재료 특성 등으로 인해 수명이 길어질 경우의 비용효과를 나타낸다.

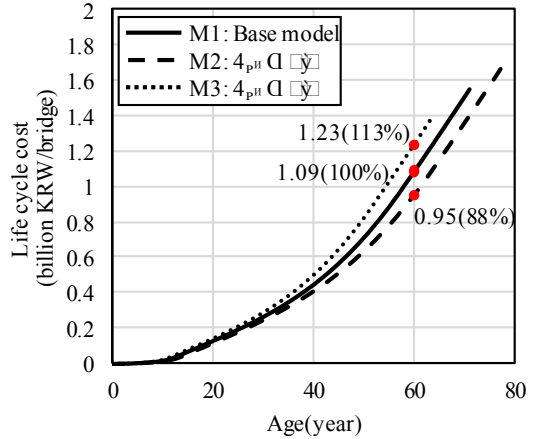


Fig. 8. Life cycle cost according to service life

Fig. 9는 형상계수에 따른 생애주기비용 산정결과이며, 시간에 따른 열화속도가 10% 바뀔 경우는 약 8%의 비용차이가 발생한다. 일반적으로 열화환경이 바뀌면 열화속도와 수명이 함께 영향 받으므로 실제로는 열화환경이 바뀔 경우 수명까지 바뀌게 되므로 비용 차이는 더욱 크게 발생할 것이다.

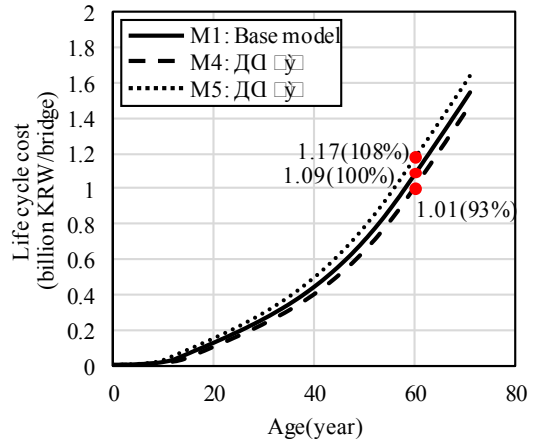


Fig. 9. Life cycle cost according to deterioration rate

Fig. 10은 점검오차 반영에 따른 생애주기비용 산정결과이다. 정밀하게 점검할수록 건진도지수가 낮게 평가되

는 경향을 반영하면 비용이 31% 증가된다. 이 수치는 평균수명의 경우 약 30%가 조정되어야 발생 가능한 비용 차이로서, 비용측면에서 점검오차가 상당히 중요한 변수임을 알 수 있다. 또한, 실제로 많은 교량들이 높게 평가된 건전도지수로 인해 적시에 유지관리 활동이 이루어지지 않을 뿐만 아니라, 적절한 예산배정이 되지 않을 수 있음을 의미한다.

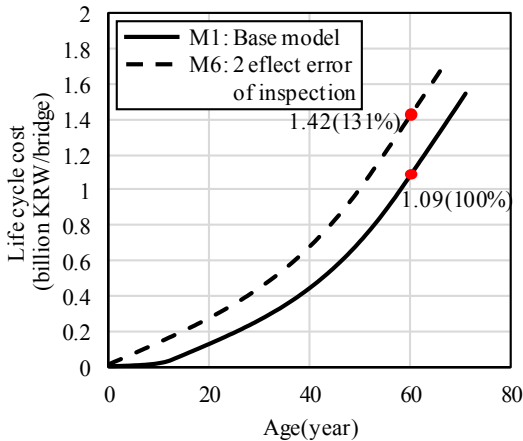


Fig. 10. Life cycle cost according to error of inspection

4.3 극단 상태의 생애주기비용 분석

고속도로 교량이 가지는 건전도지수 분포의 상하한을 모사한 모델을 활용하여 생애주기비용을 산정하였다. Fig. 11과 같이 생애주기비용과 사용수명이 평균과 비교하여 상당한 차이가 발생함을 알 수 있다. M8의 사용수

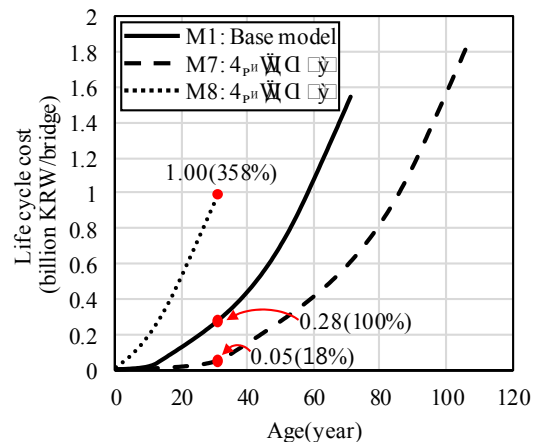


Fig. 11. Life cycle cost according to deterioration rate of bridge

명이 31년에 종료되므로 이 시점에서 생애주기비용을 비교하면, M7은 높은 건전도지수를 유지하고 있는 관계로 평균모델인 M1에 비하여 18% 수준임을 알 수 있다. 그러나 M8은 생애주기비용이 M1의 358% 수준으로 짧은 기간에 상당히 많은 비용이 소요됨을 알 수 있다. 이처럼 부재의 재료특성, 열화환경 등에 따라 생애주기비용은 극단적으로 차이가 발생할 수 있으므로, 교량의 상태를 정확히 파악하고 예측하는 것이 생애주기비용 평가의 신뢰도를 결정하는 중요한 절차이다.

5. 결론

노후화로 인해 급증하는 유지관리비용에 대응하기 위해 자산관리적 관점에서 교량 유지관리 비용 예측이 필수적이다. 본 논문에서는 교량 상태에 따라 산정되는 생애주기비용을 평가하기 위하여 비용 산정에 활용되는 주요 변수들에 대한 영향 분석을 수행하였다. 검토된 변수 중에서 특히 점검오차는 영향이 크기 때문에 시설물 유지관리 및 자산관리 측면에서 점검신뢰도의 향상이 중요할 것이다.

실제 고속도로 교량의 건전도지수 분포를 기반으로 개별 교량에서 발생가능한 생애주기비용의 상하한 값을 추정하였다. 분석 결과, 교량의 상태에 따라 생애주기비용의 차이가 상당히 크게 발생하므로 유지관리 우선순위 산정 등의 의사결정에 있어서 개별 교량의 유지관리 비용 예측신뢰도가 중요하게 작용할 것이다. 또한 기존의 평균을 모사하는 단일모델로는 효율적 관리가 어려울 수 있으므로, 다양한 종류의 상태예측모델을 구축하여 교량에 따라 적합한 모델을 적용하는 등의 개별 교량 유지관리 비용 예측신뢰도를 높이기 위한 연구가 필요하다.

References

- [1] Cheol-Min Kim, Severe deterioration of major urban infrastructure in Seoul [Internet], Blog [cited 2020 Oct], Available From: <https://blog.naver.com/kcm8764/221383104834>
- [2] KECRI, Bridge Maintenance Strategies for Service Life 100 years (Final Report), Korea Expressway Corporation Research Institute, 2015.
- [3] Yo-Seok Jeong, Woo-Seok Kim, Il-Keun Lee, Jae-Ha Lee, "Bridge Life Cycle Cost Analysis of Preventive Maintenance", Journal of the Korea Institute for

Structural Maintenance and Inspection, Vol. 20, No. 6, pp.001-009, 2016.

DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.6.001>

- [4] Jong-Wan Sun, Huseok Lee, Kyung-Hoon Park, "Development of maintenance cost estimation method considering bridge performance changes", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 12, pp.717-724, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.717>
- [5] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT), Operation of bridge management system in 2016, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017.
- [6] KECRI, Maintenance & Management of Expressway Bridges Deteriorated by De-icing Agent & Water Leakage, Korea Expressway Corporation Research Institute, 2016.
- [7] MnDOT(2019), Transportation Asset Management Plan, Minnesota Department of Transportation, 2019.
- [8] D. Macek and V. Snižek, "Innovation in Bridge Life-cycle Cost Assessment.", Procedia Engineering, 196, pp.441-446, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.222>
- [9] Y. Dong, "Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts.", Construction and Building Materials, 167, pp.414-425, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.037>
- [10] Y. Yang, X. Wang, Z. Wu, "Life cycle cost analysis of FRP cables for long-span cable supported bridges.", Structures, 25, pp.24-34, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.019>
- [11] Asadi, P., Nikfar, D., Hajirasouliha, I., "Life-cycle cost based design of bridge lead-rubber isolators in seismic regions.", Structures, 27, pp.383-395, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.056>
- [12] O. Habibzadeh-Bigdarvish, X. Yu, G. Lei, T. Li, A. Puppala, "Life-Cycle cost-benefit analysis of Bridge deck de-icing using geothermal heat pump system: A case study of North Texas.", Sustainable Cities and Society, 47, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101492>
- [13] Yo-Seok Jeong, Woo-Seok Kim, Il-Keun Lee, Jae-Ha Lee, Jin-Kwang Kim, "Definition, End-of-life Criterion and Prediction of Service Life for Bridge Maintenance", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 20, No. 4, pp.68-76, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.4.068>

박 준 용(Jun-Yong Park)

[정회원]



- 2019년 2월 : 서울대학교 대학원 건설환경공학부 (구조공학박사)
- 2019년 6월 ~ 현재 : 서울기술연구원 도시인프라연구실 전임연구원

<관심분야>

피로평가, 구조 안전성평가, 스마트 유지관리

이 기 세(Keesei Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (구조공학박사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : 서울기술연구원 도시인프라연구실 연구위원

<관심분야>

좌굴, 구조해석 및 설계, 시설물 유지관리