

# 콘크리트 교량의 생애주기비용 민감도 분석

## A Study on Sensitivity Analysis of Life-Cycle Cost of Concrete Bridges

구본민\*      변근주\*\*      송하원\*\*\*  
Koo, Bon Min    Byun, kuen Joo    Song, Ha Won

### ABSTRACT

The so-called Life Cycle Cost (LCC) analysis on reinforced concrete bridge can provide useful information for initial design and maintenance plan of the RC bridge. This paper proposes an LCC prediction equation and a sensitivity analysis method for RC bridges. An LCC equation for the RC bridge which includes initial investment cost, maintenance cost, and demolition cost was derived and verified from the data for design and construction of an RC slab bridge. In order to solve uncertainty problem on actual discount rate and material characteristics in the analysis of LCC of concrete bridges, a sensitivity analysis method on the LCC using the Monte Carlo simulation technique was suggested.

#### 1. 서론

콘크리트 교량의 생애주기비용(Life Cycle Cost; LCC)을 예측하기 위하여, 생애주기(Life Cycle; LC) 동안의 각 단계 즉, 초기투자단계, 유지관리단계, 해체 및 폐기단계에서 발생하는 비용의 항목을 설정하였다. 콘크리트 교량을 구성하는 각 부재의 보수 및 보강의 주기를 결정한 후, 실질할인율을 4.17%, 분석기간을 100년으로 가정하여, RC 슬래브교의 생애주기비용을 예측하였다. 예측된 결과의 민감도 분석을 실시하기 위하여 Monte Carlo simulation(몬테카를로 모사법)을 사용하였고, 실질할인율을 0.5%에서부터 10.0%까지 0.5%씩 할인율을 증감시켜 이에 따른 분석대상 교량의 LCC 변화를 예측하였다. 재료특성을 고려하기 위하여 고성능콘크리트와 일반콘크리트로 구분하여 연구를 수행하였으며 그 결과 일반적으로 고성능콘크리트가 일반콘크리트보다 경제적인 것으로 예측되었다.

#### 2. LCC 분석을 위한 기본가정

교량의 LCC 분석을 위해서는 반드시 할인율과 분석기간이 필요하며, 할인율은 과거의 예금금리와 물가상승률을 고려한 실질할인율을 사용하는 것으로 가정하였고, 분석기간은 현행 설계추세와 목표설계

\*정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 박사과정

\*\*정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 교수

\*\*\*정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 교수

수명을 바탕으로 가정하였다. 실질할인을 4.17%, 현재 적용되고 있는 설계기준의 기본 내구기간이 약 50년이므로 본 연구에서는 콘크리트 교량의 전체공용수명을 100년으로 설정하였다.

### 3. 분석대상 교량 형식 및 제원

분석대상 교량의 상부구조는 RC 슬래브교 형식이며, 구주식(RP) 교각과 역T형식(RTA) 교대의 하부 구조로 되어있다. 또한 고속도로상에 DB-24 설계하중으로 설계된 왕복 4차로, 총 연장 48.0m, 총 폭 원 28.0m의 교량이며, 콘크리트 강도는 270kgf/cm<sup>2</sup> 이다. 분석대상 RC 슬래브교의 상세도면은 그림 1 과 같다.

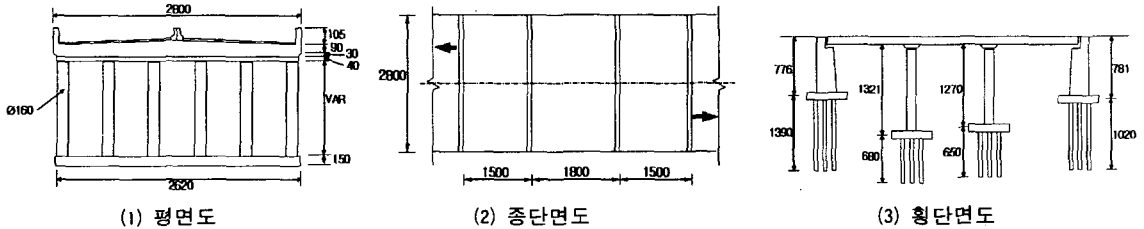


그림 1 분석대상 RC 슬래브교의 상세도면 (단위:cm)

### 4. 생애주기비용 함수식의 제안

분석대상 RC 슬래브교의 시공비용을 이용하여 초기투자비용, 유지관리비용, 해체 및 폐기비용을 본 논문에서 제안한 함수식인 식 (1)에 의하여 계산하였고, 이 값들을 생애주기비용 예측 프로그램 (BridgeLCC 1.0)의 입력자료로 사용하였다. 아래의 식 (1)에서  $C_{ID}$ 는 설계비용,  $C_{IS}$ 는 감리비용,  $C_{IC}$ 는 시공비용을 포함하는 초기투자비용을 의미하며,  $C_{MI}$ 는 일반관리비용,  $C_{MN}$ 은 점검 및 진단 비용,  $C_{MR}$ 은 보수비용,  $C_{MC}$ 는 교체비용,  $C_{ME}$ 는 보강비용,  $C_{MS}$ 는 사용자비용을 포함하는 유지관리비용을 의미한다.  $C_{WD}$ 는 해체비용,  $C_W$ 는 폐기비용,  $C_{RCY}$ 는 잔존가치비용을 포함하는 해체 및 폐기비용을 의미한다. 이러한 생애주기동안 발생하는 유지관리비용과 해체 및 폐기비용은 미래에 발생하는 비용이므로 현재의 시간가치로 변환해야 하며,  $1/(1+r)^n$ 은 Clifford L. Freyermuth(2001)이 제안한 현재가치계수 이다.

$$LCC_{RCB}^n = (C_{ID} + C_{IS} + C_{IC}) + \{ (C_{MI} + C_{MN} + C_{MR} + C_{MC} + C_{ME} + C_{MS}) + (C_{WD} + C_W - C_{RCY}) \cdot 1/(1+r)^n \} \quad (1)$$

### 5. 생애주기비용 예측 결과 및 민감도 분석

분석기간을 100년, 실질할인을 4.17%를 적용하여 생애주기비용을 예측하기위하여 미국의 기술표준국(National Institute of Standards and Technology;NIST)에 의해 개발된 BridgeLCC 1.0을 사용하였다. 실질할인율에 따른 민감도 분석을 실시하기 위하여 할인율 4.17%를 중심으로 0.5%에서부터 10.0%까지 0.5%씩 할인율을 증감시켜 이에 따른 분석대상 교량의 LCC 변화를 예측하였다. 그림 2는 분석

대상 교량에 대해 강도  $f'c=270\text{kgf/cm}^2$ 의 일반콘크리트를 사용한 경우와  $f'c=560\text{kgf/cm}^2$ 의 고성능콘크리트를 사용한 경우로 나누어 할인율의 변화에 따른 생애주기비용값의 차이에 따른 손실비용의 변화를 나타낸 것이다.

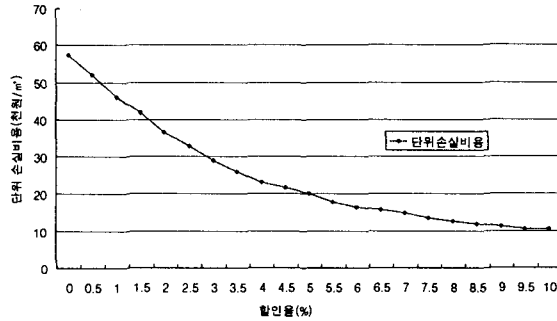


그림 2 할인율에 따른 손실비용의 민감도 분석

그림 2에서 실질할인율이 4.17%일 경우에는  $f'c=270\text{kgf/cm}^2$ 의 일반콘크리트를 사용한 경우에  $f'c=560\text{kgf/cm}^2$ 의 고성능콘크리트를 사용한 경우보다 23,066원/m<sup>3</sup>의 경제성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 할인율이 증가할수록 이 폭은 점차로 줄어들어 9.5%이상의 할인율에서는 일반콘크리트를 사용하는 경우와 고성능콘크리트를 사용하는 경우의 단위손실비용이 10,000원/m<sup>3</sup>으로 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 분석대상 교량에 고성능콘크리트를 적용할 경우, 실질할인율이 커질수록 손실비용이 감소하는 것을 알 수 있다.

재료특성에 따른 민감도 분석은 표 1의 배합조건과 재료특성을 고려하여 일반콘크리트와 고성능콘크리트로 나누어 산정한 각각의 생애주기비용에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 민감도 분석을 실시하기 위해, 먼저 다음의 그림 3과 같이 생애주기비용이 가지는 불확실성에 대한 정규분포확률곡선을 구하였다. 정규분포확률곡선을 이용하여 대상 교량에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였다. 비용발생 범위는 5%를 적용하였으며, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 민감도 분석을 수행한 결과는 그림 4와 같이 나타났다.

표 1. 배합조건 및 재료특성

구분	일반콘크리트 (270kgf/cm <sup>2</sup> )	일반콘크리트 (350kgf/cm <sup>2</sup> )	HPC (560kgf/cm <sup>2</sup> )	HPC (700kgf/cm <sup>2</sup> )
물(kg/m <sup>3</sup> )	505	505	551	517
시멘트(kg/m <sup>3</sup> )	960	1,161	2,056	1,973
굵은골재(kg/m <sup>3</sup> )	3,328	3,328	3,413	3,413
잔골재(kg/m <sup>3</sup> )	2017	1,848	974	1,166
공기량(%)	5.50	5.50	-	-
피복두께(mm)	30	30	30	30
표면연화물량(kg/m <sup>3</sup> )	5.05	5.05	5.05	5.05
한계초기부식량(kg/m <sup>3</sup> )	1.7801	1.7801	1.7801	1.7801
확산계수(10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /sec)	0.0155	0.0067	0.0123	0.0104

배합조건 및 재료특성을 고려한 생애주기비용 산정결과는 일반콘크리트  $f'c=270\text{kgf/cm}^2$ 일 때 2,262,000,000원,  $f'c=350\text{kgf/cm}^2$ 일 때 2,157,000,000원, 고성능콘크리트  $f'c=560\text{kgf/cm}^2$ 일 때 2,231,000,000

원,  $f'c=700\text{kgf/cm}^2$ 일 때 2,190,000,000원으로 예측되었다.

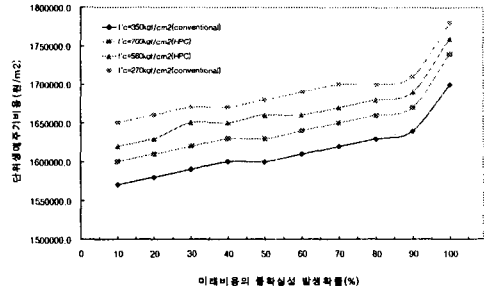
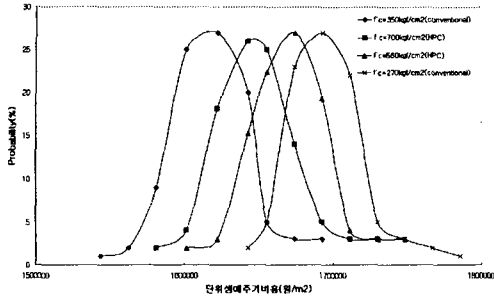


그림 3 생애주기비용 산정시 발생하는 불확실성에 대한 정규분포곡선 그림 4 재료특성에 따른 민감도 분석 결과

분석대상교량에 대해 대부분의 경우는 일반콘크리트를 사용하는 경우보다는 고성능콘크리트를 사용하는 것이 경제적으로 유리할 것으로 판단할 수 있다. 하지만, 일반콘크리트 270kgf/cm<sup>2</sup>의 경우가 가장 비경제적이고, 고성능콘크리트 560kgf/cm<sup>2</sup>, 700kgf/cm<sup>2</sup>보다 일반콘크리트 350kgf/cm<sup>2</sup>이 보다 경제적인 것으로 나타났다. 따라서, 고성능콘크리트가 일반콘크리트에 비하여 항상 경제적인 것은 아니며, 구조물의 내구수명, 내구환경, 구조성능, 재료특성 등을 종합적으로 고려한다면, 강도를 높인 일반콘크리트가 고성능콘크리트보다 높은 경제성을 나타낼 수도 있음을 알 수 있다.

## 7. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) RC 슬래브교의 생애주기비용을 보다 합리적으로 예측하기 위해 할인율과 분석기간을 고려한 민감도 분석을 실시하였다.
- (2) 재료특성에 따른 고성능콘크리트와 일반콘크리트를 사용한 생애주기비용 예측 결과, 일반콘크리트  $f'c=350\text{kgf/cm}^2$ 를 사용한 경우에 가장 경제적이고, 고성능콘크리트  $f'c=700\text{kgf/cm}^2$ ,  $f'c=560\text{kgf/cm}^2$ 순서로 경제성을 나타내었다. 또한, 일반콘크리트  $f'c=270\text{kgf/cm}^2$ 를 사용한 경우에 가장 경제성이 떨어지는 것으로 예측되었다.
- (3) 실질할인율을 4.17%를 중심으로 0.5%에서 10.0%까지 0.5%씩 증감시키고, 분석대상 교량에 대해 강도  $f'c=270\text{kgf/cm}^2$ 의 일반콘크리트를 사용한 경우와  $f'c=560\text{kgf/cm}^2$ 의 고성능콘크리트를 사용한 경우로 나누어 실질할인율 변화에 따른 생애주기비용값의 차이에 따른 손실비용의 변화를 예측한 결과, 실질할인율이 4.17%일 경우에는 일반콘크리트  $f'c=270\text{kgf/cm}^2$ 를 사용한 경우보다 고성능콘크리트  $f'c=560\text{kgf/cm}^2$ 를 사용하는 것이 23,066원/m<sup>2</sup>의 경제성이 있는 것으로 나타났다. 그러나, 할인율이 증가할수록 손실비용은 줄어들어 9.5% 이상의 실질할인율에서는 일반콘크리트를 사용한 경우와 고성능콘크리트를 사용한 경우의 손실비용이 10,000원/m<sup>2</sup>으로 수렴하였다.

## 참고문헌

1. Freyermuth, C. L. (2001), "Life-Cycle Cost Analysis for Large Bridges," Concrete International, ACI, Vol. 23, No. 2
2. Nishikawa, K. (1997), "A Concept of Minimized Maintenance Bridges," 橋梁と基礎, 97-8月号, pp. 64-72
3. Piringer, S. (1993), "Whole-Life Costing of Steel Bridges," Bridge Management 2, Thomas Telford, London, pp. 584-593
4. Tilly, G. P. (1997), "Principles of Whole Life Cycle Costing," The Safety of Bridges, the Institution of Civil Engineers and Highway Agency, Thomas Telford, pp. 138-144