한국전산구조공학회
2004년도 가을 학술발표회 논문집

지하도로시설물의 LCC예측 모델 및 시스템 개발
Developments of Life Cycle Cost Model & System of the Road Tunnel

조효남* 선종완** 김충완*** 민대홍****
Cho, Hyo-Nam Sun, Jong-Wan Kim, Chung-Wan Min, Dae-Hong

ABSTRACT

Recently, Life Cycle Cost (LCC) for civil infrastructures, such as pavements, bridges, and dams, has been emphasized. However there are few cost models for road tunnel especially for maintenance phase. The road network is composed of highways, bridges, and road tunnels. Thus it is as important as for road tunnels to keep safe for traffic. The maintenance strategies for road tunnels can be achieved based on the minimization of LCC in maintenance phase. For this purpose, in this paper, cost model and cost classification for road tunnel in maintenance phase are suggested.

1. 서 론

최근 국내에서 발생했던 성수대교의 붕괴사고, 당산철교의 교체, 기타 많은 유지관리상의 문제점 등으로 인하여 이들 교량이 재건설되거나 공용수명을 다하지 못하고 교체되는 점을 감안하면 사회기반시설물의 공용수명 동안 소요되는 실질적인 손실은 실로 막대하다 할 수 있다. 이러한 붕괴사고로 인한 손실이외에도 현재 시설물의 신설 및 개·보수나 교체를 하기에는 충분한 예산을 확보하고 있지 못하므로 투자비용의 효율성을 극대화하는 노력이 필요하다. 이러한 노력에는 여러 가지가 있을 수 있겠지만, 우선 기설 시설물의 안전을 충분히 확보하면서 수명을 최대한 연장하기 위해 비용은 최소한으로 하고 투자의 효과는 최대화할 수 있도록 하는 기술개발과 관련 정책이 필요하다. 이러한 기술 및 정책에 있어서 미국 등 이 분야의 기술 선진국에서는 미래의 유지 보수비의 급격한 상승을 미연에 방지하기 위한 생애주기비용(Life-Cycle Cost : 이하 LCC)기법을 이용한 유지관리 의사결정체계를 실무에 활용하고 있다. 그러나 국내에서는 국가의 기간시설물인 도로시설물의 유지관리에 대해 LCC에 근거한 의사결정을 위한 연구가 활발히 진행 중이지만, 아직 교량 및 포장에 대한 연구만이 진행되고 있는 실정이며, 지하도로시설물에 대한 LCC분석 시스템 개발은 미진한 상황이다. 사회기반시설의 효율적인 유지관리를 위해서는 전체도로망에 근거한 전반적인 도로시설물에 대한 LCC분석 시스템이 필수적임으로 교량, 포장뿐만 아니라 지하지설물의 LCC분석 기술이 동시에 필요하다. 즉, 도로망은 교량, 터널, 지하차도 등의 도로시설물이 하나로 연결된 시스템이므로 각각의 시설물에 대한 LCC 분석 시스템을 기반으로 도로시설물 전체의 실질적인 네트워크 수준의 유지관리체제가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 국가 차원에서 막대한 경제적 이익을 가져다주는 자산관리체계 도입에 필요한 요소기술 개발로서 생애주기비용(LCC)분석 모델 및 시스템 개발의 모델을 제시하고자 한다

* 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 교수
** 한양대학교 토목환경공학과 박사과정
*** 한양대학교 토목환경공학과 석사과정
**** 정회원, 시설안전기술공단 기술개발부 연구원

2. 터널의 유지관리 단계의 LCC 분석

2.1 터널의 유지관리 단계의 LCC 분석 체계

경제적인 유지관리 대안 선정을 위한 유지관리 단계에서의 LCC 산정 절차를 그림 1에 나타내었다. 각 절차에 대한 설명은 다음과 같다.

1) 터널 정보 입력

LCC 분석을 위해 고려되는 대상 터널에 대한 정보를 입력한다. 여기서 입력되는 항목은 LCC 분석을 위해 필요한 자료항목으로서 터널 위치(산악지대, 도심지, 해안가, 일반지역으로 구분), 터널 형식, 길이, 사용년수, 차선수, 통행량, 우회도로 정보, 분석시점에서의 상태점검 조사자료, 기대 공용수명(즉, 분석기간) 등을 입력한다.

2) 손상정보

터널의 보수·보강 공법대안을 비교하기 위해 손상에 대한 상태점검 자료인 손상정보를 입력한다. 즉 손상종류, 손상부위, 보수·보강 물량 등을 입력한다. 이러한 손상정보에 따라 적용 가능한 보수·보강 공법을 선정할 수 있도록 한다.

3) 유지관리 공법 대안 선정

위 단계에서 정의된 손상정보에 따라 적용 가능한 유지관리 대안을 입력한다. 본 연구에서는 터널의 성능 평가에 의해 잔존수명이 결정된 경우 유지관리 대안은 향후 잔존수명 동안의 기간을 5년 단위로 구분하여 첫 유지관리조치를 수행하고 분석기간 동안 그 조치를 계속 수행하는 것이다.

4) 해석을 위한 변수 입력

이 단계에서는 각종 해석을 위한 변수를 입력한다. 프로그램에서는 할인율, 교통량 산정 모델, 직접비용 모델, 간접비용 모델 등에 필요한 각종 변수들이 정의된다.

5) 비용분석 및 현재 가치화

각각의 보수·보강공법은 직접비용과 간접비용을 유발한다. 입력변수를 확정적인 값을 사용하면 비용분석 결과는 하나의 값으로 산출되지만, 변수가 확률분포를 통해 확률적으로 입력되면 결과 역시 확률분포를 가지고 산출된다. 이러한 경우 가장 최확값을 사용하여 비교할 수 있다. 각 유지관리 행위에 따른 비용의 산출은 미래의 가치로 산정 된다. 따라서 비교를 위해 현재 가치로 변환시킨다.

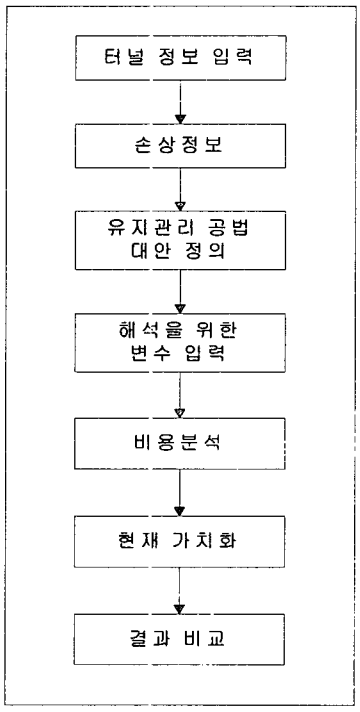

그림 1 유지관리 단계 LCC 산정절차

6) 결과 고찰 및 보고서 작성

LCC 산출 결과에 대한 분석을 위해 현재 가치의 분포로 산출된 LCC에 대해 경험적 판단을 하여야 한다. 확정값을 사용하여 LCC를 산출한 경우에는 결과 비교시 민감도 분석을 수행해야 하며, 각 비용부담 주체별로 차지하는 비용이 얼마나 되는지에 대해서 검토를 한다. 이와 같은 분석을 바탕으로 보고서를 작성한다. 본 연구를 통해 최종적으로 개발하게 될 프로그램은 보고서 작성을 지원하기 위한 여러 모듈개발 및 비용분

석 산출 결과들을 다양한 형태로 출력할 수 있도록 구성한다.

2.2 비용 분류 구조

유지관리단계에서는 점검/진단, 보수·보강, 교체 등의 유지관리행위로 인해 관리자 비용, 도로이용자비용 및 사회경제손실비용 등이 발생한다. 그러나 많은 이론 연구에서는 이러한 비용 항목 중에서 비교적 취급이 간단한 직접비용만을 고려하여 연구를 수행하였다 (Li 2003, Kong 2001, Miyamoto 2001, Fragopol 2003, Estes 1997, Lin 1995). 따라서 관리자 측면에서의 비용만을 고려할 뿐 도로이용자나 주위의 지역적 사회경제에 미치는 비용에 대해서는 고려하지 않았다. 그러나 일반적으로 전체 생애주기비용에서 직접비용보다는 간접비용의 비율이 훨씬 높으므로 간접비용을 고려하여야만 한다 (Cho 2003).

유지관리단계에서의 비용의 발생은 유지관리행위에 의해 발생하며, 유지관리행위는 터널의 점검항목에 대해 행해지므로 터널의 점검항목의 수가 n개이고, 각각의 구성요소에 대해 k개의 유지관리행위 조치가 가능할 때 다음 식 1 및 2와 같이 정식화 할 수 있다.

$$E[LCC_M(X, T)] = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{k}\frac{1}{(1+q)^t}E[C_{ij}(X, t)] \quad (1)$$

$$C_{ij}(X, t) = C_{ij}^{agency}(X, t) + C_{ij}^{indirect}(X, t) \quad (2)$$

여기서, LCC_M = 유지관리 단계에서의 총 생애주기비용

C_{ij} = 기대수명동안의 임의 시간 t와 사용재료, 재원, 사용환경 등의 설계변수 X의 함수로 구성된 i 요소에 대한 j 유지관리행위로 인한 비용

C_{ij}^{agency} = i 요소에 대한 j 유지관리행위로 인한 관리주체가 부담하는 직접비용

$C_{ij}^{indirect}$ = i 요소에 대한 j 유지관리행위로 인한 간접 손실비용

q = 할인율

T= 생애주기비용분석에 고려된 기대수명이다.

위의 정식화에 근거하여 각 유지관리 행위별 비용 산정은 다음과 같이 세부적으로 구분할 수 있다.

(1) 직접 비용

1) 관리 행위

터널에 대한 유지관리 공법 대안 선정을 위한 LCC 분석에서는 일반적인 관리행위와 관련하여 발생하는 비용은 유지관리 대안의 결정에 영향을 미치지는 않는다. 그러나 공용중 한 시점에서 향후 터널에 대한 전체적인 유지관리 비용을 산출하고자 할 때는 포함되어야 한다. 관리비용에 대한 입력자료의 구성은 인건비, 장비비 및 기타 경비 등이 있다. 따라서 관리행위로 인한 직접비용은 다음 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

실제 대상 터널에 대한 과거 관리행위로 인한 비용 지출 자료가 있으면 이 값을 사용하면 되나, 이러한 자료가 없는 경우에는 일반적으로 조사된 통계 값을 사용할 수 있다.

$$C_{PMAI} = C_{PMAI}^{lab} + C_{PMAI}^{equ} + C_{PMAI}^{exp} \quad (3)$$

여기서, C_{PMAI}^{lab} = 터널 관리를 위한 인건비

C_{PMAI}^{equ} = 터널 관리를 위한 시설비

C_{PMAI}^{exp} = 터널 관리를 위한 일반 경비이다.

2) 진단/점검 행위

「시설물의 안전관리에 관한 특별법」(건설교통부/한국시설안전기술공단 2003)에 의하면 정기점검은 시설물의 준공일 또는 사용승인일(임시사용 포함) 다음 반기부터 반기별 1회 이상 실시하여야 하며 정밀점검, 긴급점검 및 정밀안전진단의 현장조사 기간과 중복되는 반기에는 생략할 수 있다고 규정되어 있다. 또한 최초의 정밀점검인 초기점검은 시설물의 준공일 또는 사용승인일(임시사용 포함)을 기준으로 산정하여 6개월 이내에 완료하여야 하며 차회의 정밀점검은 전회의 정밀점검 또는 정밀안전진단 완료일을 기준으로 산정하여 2년에 1회 이상 실시 완료하여야 한다고 규정되어 있다.

정밀안전진단은 안전점검을 실시한 결과 시설문의 재해 및 재난예방과 안전성 확보 등을 위하여 필요하다고 인정하는 경우에 실시하며, 정기적으로 실시하는 정밀안전진단은 완공후 10년이 경과된 1종시설물에 대해 시설물의 준공일 또는 사용승인일(임시사용 포함)을 기준으로 산정하여 5년에 1회 이상 정기적으로 실시 완료하여야 한다고 규정되어 있다.

따라서 한 터널에 대한 유지관리 공법 대안 선정에 있어 진단/점검비용은 모든 대안에 대해 동일하므로 대안 선정결과에는 영향을 미치지 않는다. 그러나 대상 터널에 대한 향후 유지관리단계 총비용을 산정하는 데는 포함되어야 하며, 통상적인 비용은 한국시설안전기술공단의 안전점검 및 정밀안전진단대가(비용산정)기준(건설교통부/한국시설안전기술공단 2003)에 따라 산정이 가능하다. 대상 터널에 대한 과거의 긴급점검, 점검/진단 주기나 비용에 대한 이력 자료가 있으면 이를 사용할 수도 있다. 진단/점검에 대한 관리주체 비용은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{INS} = C_{INS}^{ins} + C_{INS}^{pins} + C_{INS}^{dins} + C_{INS}^{ddia} \quad (4)$$

여기서, C_{INS} = 진단/점검에 의한 관리주체 비용 및 간접비용

$C_{INS}^{pins}, C_{INS}^{dins}, C_{INS}^{ddia}$ = 정기점검, 정밀점검, 정밀안전진단에 따른 관리주체가 부담하는 직접비용

3) 보수·보강 및 교체 행위

유지관리행위 중 보수·보강 및 교체 행위로 인한 관리주체 비용은 이러한 유지관리 행위를 위해 직접 소요되는 비용으로서 각 행위를 필요로 하는 물량과 각 적용공법 공사단가의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{EMAI}^{agency}(X, t) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} Q_i^{mai}(t) \cdot U_j^{mai}(X, t) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} Q_i^{str}(t) \cdot U_j^{str}(X, t) \quad (5)$$

여기서, n = 터널 점검요소 수, k : 터널 보수·보강 공법 수

Q_i^{mai}, Q_i^{str} = 터널 보수, 보강을 위한 소요 물량

U_j^{mai}, U_j^{str} = 보수, 보강 각 공법에 따른 공사단가

X = 터널에 사용된 재료, 구조요소 및 비구조요소를 포함한 물량 및 유지보수공사조건 등과 관련된 제반 변수

t = 기대수명동안의 임의 시간

위의 식 (5)에서 보수·보강으로 인한 관리주체의 직접 비용을 산정하기 위해서는 각 공법별로 공사단가를 구하여야 한다. 또한 공사단가는 터널의 형식에 따라 달라지므로 이에 대한 데이터베이스가 요구된다.

(2) 간접비용

간접비용은 유지보수공사 시 공사구간 조건으로 인해 교통흐름의 장애가 생기는 경우(교통 서행, 우회 등),

즉 당초에 의도된 터널의 기능을 발휘하지 못하는 경우 터널이 속해있는 도로의 이용자비용과 그로 인한 사회-경제적인 손실을 의미한다.
간접비용의 항목 중에서 특히 도로이용자비용은 터널의 LCC분석 시 매우 중요한 항목이다. 실제 사례로서 미국의 Oakland Bay 교량은 1994년 Northridge 지진에 의해 교량 상판일부가 낙교 함으로서 구조물 보수비용이나 인명손실비용보다 훨씬 더 막대한 이용자비용을 지불한 바 있다. 한편 사회-경제 손실비용이라 함은 성수대교 붕괴나 당산철교 재시공 등에서 알 수 있듯이 교량붕괴, 대규모 공사 등으로 인한 해당 지역의 여가, 쇼핑, 지가하락 등으로 인한 간접적인 경제적 손실을 말한다.
본 연구에서는 유지관리 행위에 따른 간접비용 구분 항목은 유지관리 행위로 인한 시간지연 비용, 차량 운행비용 및 교통사고 비용으로 구분할 수 있다. 따라서 간접비용에 대한 정식화는 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[C_{MAI}^{indirect}(W,t)] = C_{MAI}^{delay}(W,t) + C_{MAI}^{operate}(W,t) + C_{MAI}^{accident}(W,t) + C_{MAI}^{soc}(W,t) \quad (6)$$

여기서, $C_{MAI}^{delay}, C_{MAI}^{operate}, C_{MAI}^{accident}$ = 유지관리 행위시 터널 사용상의 제약으로 인해 발생하는 시간지연비용, 차량운행비용 및 교통사고비용

$C_{MAI}^{soc}(W,t)$ = 사회경제손실비용

W = 검검 및 진단, 유지보수공사에 따른 작업존 조건

t = 점검 및 진단, 유지보수공사 소요일 수

유지관리행위별로 발생할 수 있는 간접비용의 가정사항 및 각각의 행위별 세부내용은 다음과 같다.

1) 관리 행위

관리행위는 관리주체의 일상적인 점검을 의미하므로 이와 관련한 간접비용은 발생하지 않는다고 가정하였다.

2) 진단/점검 행위

일상적인 점검 행위에 의해서는 간접비용이 발생하지 않는다. 그러나 터널의 위치나 터널 형식의 특수성으로 인해 점검차량을 이용하는 경우에는 점검차량에 의해 차로가 통제되므로 간접비용이 발생한다. 또한 홍수나 지진 등의 자연재해나 터널에 충격을 가하는 교통사고 후에 시행하는 긴급점검의 경우 육안이나, 간단한 장비에 의한 일차점검 시에는 간접비용이 발생하지 않지만, 일차점검 후 보다 정밀한 진단을 시행해야 할 필요가 있을 경우에는 간접비용이 발생할 수도 있다.

3) 보수·보강 행위

터널에 대한 유지관리 행위 중 보수·보강 행위는 적용하는 공법의 종류에 따라, 대상 부재에 따라 간접비용의 발생여부가 다르다. 예를 들면, 바닥부의 균열에 대한 보수의 경우 에폭시 주입 공법을 사용하는 경우에는 차량 흐름의 통제 없이도 보수가 가능하다. 그러나 대부분의 유지관리조치공법에서는 차량 통제가 필요하며, 따라서 보수·보강 및 교체 행위로 인한 간접비용을 산정하기 위해서는 각 부재에 대한 보수·보강 공법에 따른 차량 흐름 통제 등 작업조건에 대한 자료를 필요로 한다.

앞선 정식화를 기반으로 다음 그림 2와 같은 비용분류체계를 정의할 수 있다.

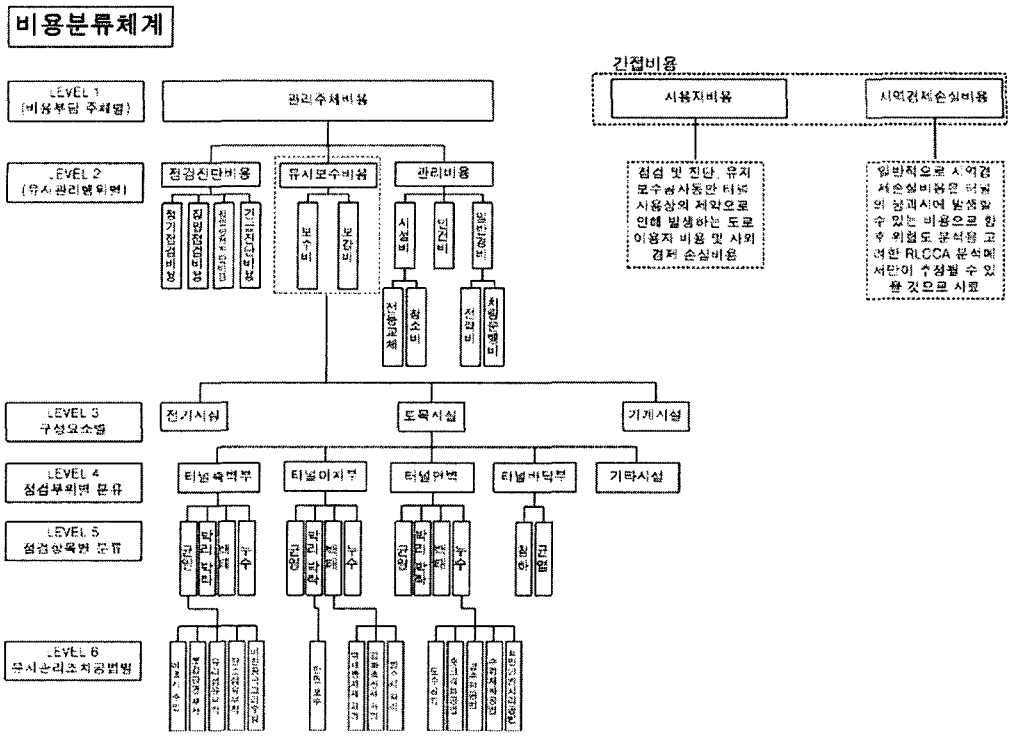

그림 2 지하차도시설물의 비용분류체계

3. 결론

본 연구는 지하도로시설물(터널, 지하차도)의 LCC예측 모델 및 시스템 개발하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 지하도로시설물의 비용분류체계를 구성하였으며, 이를 바탕으로 정식화 모델을 개발하였다. 현재 LCC예측 모델 산정을 위한 연구에 기반하여 실제 LCC 산정 작업에 적용하기 위한 데이터를 수집하고 있으며, 이를 바탕으로 체계적인 DB를 구축하기 위해 연구가 진행중이다.

참고문헌

1. 강경우 · 국우각, 『도로투자에 대한 지역의 직 · 간접적 경제적 효과", 「국토계획」 제36권 제5호』, 2001
2. 건설교통부/한국시설안전기술공단 (2000), "도로교의 공용수명 연장방안 연구, 한국시설안전기술공단 연구보고서 BR-2000-R1-37"
3. 건설교통부/한국시설안전기술공단 (2001), "LCC개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화방안 연구", 한국시설안전기술공단 연구보고서 TS-2001-R3-001
4. 건설교통부/한국시설안전기술공단(2003), "시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침, 제2003-170호".
5. 건설교통부/한국시설안전기술공단 (2002), "교량의 LCC 분석모델 개발 및 DB구축방안 연구"
6. 건설교통부, 2003 도로백서, 2003.
7. 건설교통부, 건설교통통계연보, 2003.