

교량의 생애주기비용 분석을 위한 비용함수 모델 및 시스템 개발

Development of System and Cost Function Model for Life Cycle Cost Analysis of Bridge

박미연* 선종완** 엄인수*** 조효남****
Park, Mi-Yun Sun, Jong-Wan Eom, In-Soo Cho, Hyo-Nam

ABSTRACT

Recently Life Cycle Cost Analysis for civil infrastructures such as pavements, bridges, and dams has been emphasized. However, so far, there are few systems available for life cycle cost analysis of bridges at design stage. Therefore, the objective of this paper is to develop a user-friendly life-cycle cost analysis system for LCC-effective optimal design decision making at design stage. The program is based on the proposed LCC model, formulation, analysis modules and systematic procedure that suit Korean construction conditions. It is expected that the developed system can be effectively utilized for more LCC-effective design of bridges. It is applied to an actual bridge design project in order to demonstrate its effectiveness and applicability.

1. 서 론

정부는 부실공사를 근원적으로 막아보고자 2000년 9월부터 대규모 공공사업에 있어서 초기투자비용 뿐만 아니라 시설물의 생애주기(Life Cycle)동안 발생 가능한 유지관리비용까지를 고려한 생애주기비용(Life Cycle Cost : LCC)을 토대로 설계, 계획을 의무화하는 정책을 도입한 바 있다. 하지만 아직까지도 국내의 경우는 LCC 분석을 위한 세부지침이나 프로그램이 없어 LCC 분석이 턱기에 적용하기 위한 요식행위로 수행되고 있는 것이 지금의 실정이다. 또한 국내에서는 LCC 분석을 국외에서 개발된 LCC분석 프로그램에 주로 의존하고 있는 실정인데, 이러한 국외 프로그램은 국내의 여건과 다른 기반에서 만들어진 프로그램어서 국내 적용에는 다소 무리가 따를 것으로 판단되며, 대부분의 프로그램들이 LCC분석을 위한 데이터를 사용자가 직접 구해서 입력해야 하므로 분석자에 따라 일관성이 없을 수 있다. 이에 본 연구에서는 국내 여건을 고려한 LCC분석 프로그램을 개발하였다. 이를 위해 본 연구에서는 국내 실정에 맞는 현실적인 LCC비용분류체계 및 정식화 모델을 제안하였고, 이를 실무에서 실용적으로 활용할 수 있도록 하기 위한 각종 데이터를 수집하였다. 또한 본 연구에서는 정식화

* 정회원 · 유니콘스(주) 분석평가실 실장
** 한양대학교 토목환경공학과 박사과정
*** (주) 포스코건설 토목기술팀 차장
**** 정회원 · 한양대학교 교수

모델을 바탕으로 하여 설계단계에서 LCC분석을 수행할 수 있는 POSBLCC(POSCO Bridge Life-Cycle Cost)를 개발하였으며, POSBLCC는 기존의 LCC분석 프로그램에서 사용되어온 확정적인 LCC분석 뿐 아니라 LCC분석을 위한 각종 불확실량을 시뮬레이션 하여 확률적으로 LCC분석을 수행할 수 있는 특징이 있다. 이와 같이 본 연구에서 개발된 POSBLCC를 교량의 형식선정을 위한 실제 문제에 적용하였고, 이를 통해 프로그램의 적용성을 검토해 보았다.

2. 교량의 설계단계 LCC 분석 모델

2.1 설계단계 LCC 분석을 위한 비용분류체계

설계단계 LCC 분석이란 교량 설계단계에서 기대수명동안에 발생 가능한 모든 직·간접비용에 대한 경제성 평가로서 정의할 수 있다. 일반적으로 교량의 경우는 신설교량의 계획·설계, 시공, 시공 후 감리비용과 같은 초기비용과 공용기간동안 발생가능한 점검비용, 관리비용, 유지보수비용(보수·보강·교체비용), 그리고 교량의 수명이 다하는 시점에서 발생하는 해체·폐기비용 등의 직접비용과 공용기간동안 교량이 재기능을 발휘하지 못함으로서 발생할 수 있는 도로이용자비용, 사회-경제손실비용과 같은 간접비용들을 들 수 있다. LCC분석을 위한 모델을 개발함에 있어 우선적으로 이러한 비용들에 대해 체계적인 비용분류가 필요하며, 이에 본 연구에서는 Ehlen과Marshall(1996)의 기본적인 아이디어를 이용하여 교량의 LCC분석에 적합하도록 구체화하였고, 이는 그림 1과 같다.

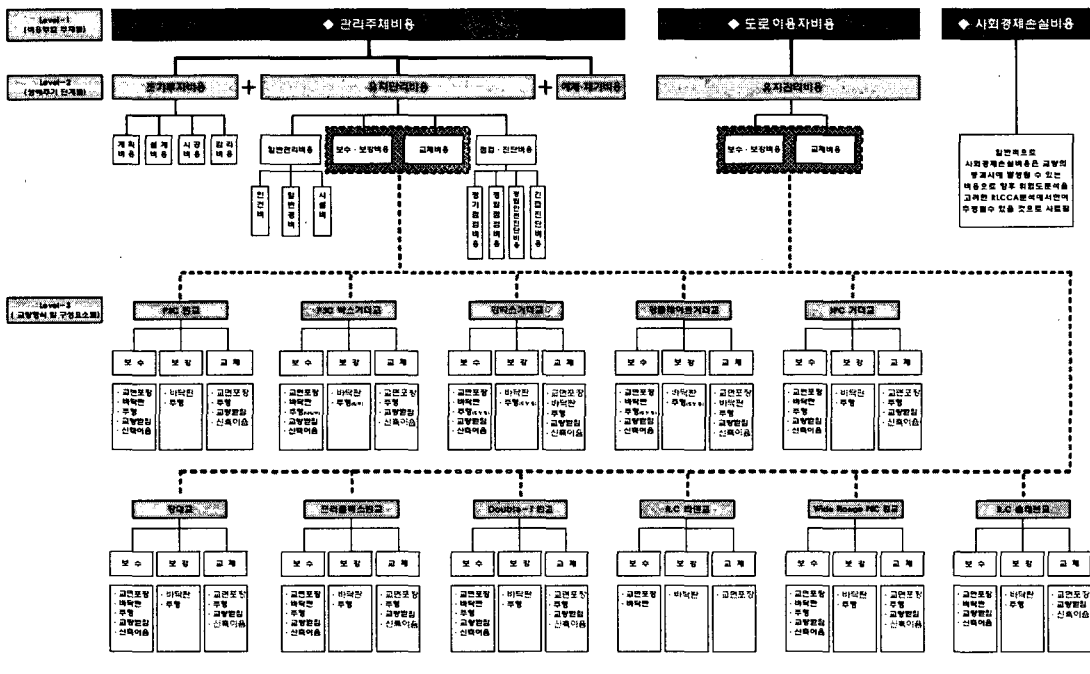


그림 1 본 연구에 적용된 교량의 설계단계 LCC분석을 위한 비용분류체계

그림 1에 제시된 바와 같이 본 연구에서는 관리주체비용, 도로이용자비용, 사회-경제손실비용으로 구성되는 비용부담 주체별 비용을 최상위 분류체계로 하였고, 그 하위의 분류는 생애주기 단계별로 발생하는 초기투자비

용, 유지관리비용, 해체·폐기비용으로 분류하였으며, 최하위는 교량의 형식별 구성요소로 하였다. 이상의 각 비용분류체계의 구성요소에 대한 구체적인 사항은 참고문헌(포스코건설, 2004)에서 구체적으로 찾아 볼 수 있다.

2.2 설계단계 LCC 분석을 위한 정식화 모델

앞서 비용분류체계에서 언급한 바와 같이 총 생애주기비용은 기대수명(설계수명 혹은 내구연한)동안 기대되는 초기건설비용, 유지관리비용과 해체·폐기비용의 합으로 다음 식 (1)과 같이 정식화할 수 있다.

$$E[C_{TOT}(X, T)] = C_{INI}(X, t) + \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+q)^t} E[C_{MAI}(X, t)] + E[C_{DIS}(X, t)] \quad (1a)$$

$$C_{MAI}(X, t) = C_{MAI}^{agency}(X, t) + C_{MAI}^{indirect}(X, t) \quad (1b)$$

여기서, C_{TOT} =총 생애주기비용, C_{INI} , C_{MAI} , C_{DIS} = 기대수명동안의 임의 시간 t 와 사용재료, 자원, 사용환경 등의 설계변수 X 의 함수로 구성된 초기건설비용, 유지관리비용 및 해체·폐기비용; C_{MAI}^{agency} = 관리자주체가 부담하는 유지관리비용; $C_{MAI}^{indirect}$ =관리자주체가 부담하는 간접유지관리비용; q = 할인율; T = LCC분석에 고려된 기대수명

식 (1)에서 각 비용항목에 대한 정식화는 표 1과 같으며, 구체적인 사항은 참고문헌(포스코건설, 2004)에서 찾아 볼 수 있다.

2.3 설계단계 LCC 분석 프로그램

2.1절의 비용분류체계와 2.2절의 정식화를 이용하여 본 연구에서는 설계단계 LCC분석 프로그램인 POSBLCC를 개발하였다. POSBLCC는 사용자의 옵션에 따라 확정적 혹은 확률적 LCC분석을 수행할 수 있도록 개발하였다. 확률적 LCC분석을 위해서는 시뮬레이션 기법이 필요한데, POSBLCC에서는 Monte Carlo 시뮬레이션(이하 MCS) 기법이 사용되었다. 또한 POSBLCC에는 교량시스템의 열화를 고려한 유지보수조치 시기를 고려할 수 있도록 하였다. 일반적으로 유지보수의 발생주기는 공용수명에 따라 가속화되는 것이 일반적이기 때문에 첫 번째 발생주기에 비해 차후 발생주기가 빠를 수 있다. 이러한 사항을 반영하기 위해 사건수기법(Event Tree Analysis)을 적용하였으며, 그림 2와 3은 사건수기법에 대한 예를 나타나고 있다. 예를 들어 임의의 3가지의 유지관리조치에 대한 절대시간 좌표계에서의 확률분포가 그림 2와 같을 때, 두 번째 유지보수조치 시기에 대한 확률분포는 첫 번째 유지보수조치가 발생할 수 있는 시기에 대한 분포를 이용하여 구할 수 있으며, 세 번째 유지보수조치 시기에 대한 확률분포도 유사한 방법으로 구할 수 있다. 이와 같이 구해진 각 확률들은 특정시기에 대해 중첩함으로써 얻을 수 있고, 이는 그림 3과 같다.

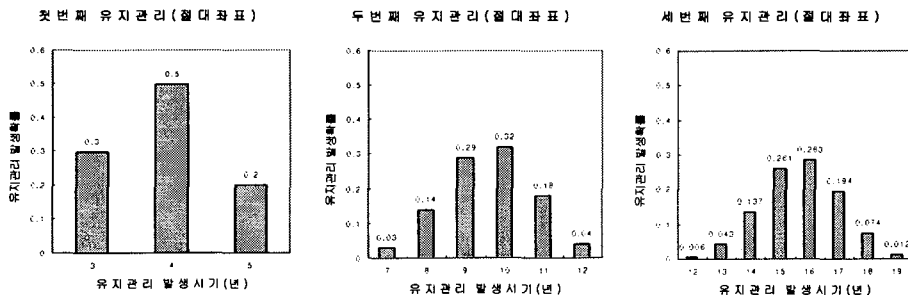


그림 2 각 유지관리 활동의 시행시기에 대한 확률분포(절대좌표)

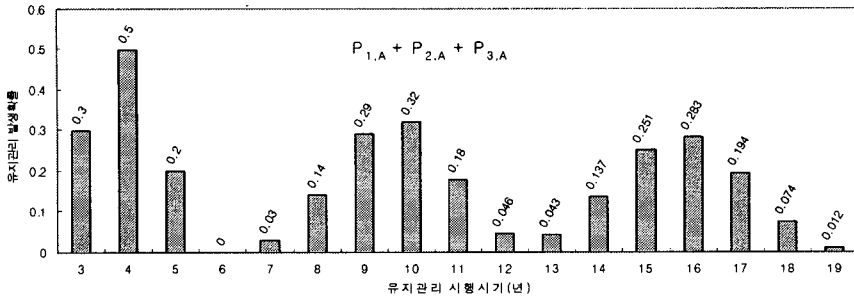


그림 3 전체 유지관리 활동의 발생확률

표 1 비용분류체계 정식화

대분류	소분류	정식화
초기건설비용 (C_{INI})	계획비용	초기건설비용(C_{INI})은 계획비용, 설계비용, 건설비용 및 감리비용 합으로 구성 $C_{INI}(X) = C_{PLA}(X) + C_{DES}(X) + C_{CON}(X) + C_{TES}(X)$ 여기서, $C_{PLA}, C_{DES}, C_{CON}, C_{TES}$ = 계획비용, 설계비용, 건설비용 및 감리비용; X =교량 건설에 사용되는 재료, 구조요소 및 비구조요소를 포함한 물량 및 건설조건 등과 관련된 제반 설계변수로 구성되며, 일반적으로 교량이 완공되기 전까지 발생하는 비용으로 관리주체가 최초로 투자하는 기본적인 매개변수를 의미
	설계비용	
	건설비용	
	감리비용	
유지관리비용 (C_{MAI})	관리주체가 부담하는 유지관리비용 (C_{MAI}^{agency})	관리주체에 의해 부담되는 유지관리비용은 관리비용, 점검 및 진단비용과 교량이 손상되어 보수, 보강 및 교체에 소요되는 유지보수비용의 합으로 구성됨 $C_{MAI}^{agency}(X, t) = C_{PMAI}(X, t) + \sum_{k=1}^K [C_{INS}^*(X, t) + C_{EMAI}^*]$ 여기서, k =교량의 구성요소와 관련한 인덱스; $C_{PMAI}, C_{INS}, C_{EMAI}$ =관리비용, 점검 및 진단비용, 유지보수비용; X =교량에 사용된 재료에 대한 물량 및 유지보수공사조건 등과 관련된 제반 변수; t = 기대수명 동안의 임의 시간
	관리주체가 부담하는 간접유지관리비용 ($C_{MAI}^{indirect}$)	간접유지관리비용은 교량의 손상이나 유지보수공사로 인해 재기능을 발휘하지 못하는 경우 발생하는 손실비용 $C_{MAI}^{indirect}(W, X, t) = C_{MAI}^{User}(W, X, t) + C_{MAI}^{ISE}(W, X, t)$ 여기서, $C_{MAI}^{User}, C_{MAI}^{ISE}$ = 점검 및 진단, 유지보수공사동안 교량 사용상의 제약으로 인해 발생하는 도로이용자비용 및 사회경제 손실비용; W =점검 및 진단, 유지보수공사에 따른 공사구간 조건; t =점검 및 진단, 유지보수공사 소요일 수; X =교량의 차선 수 및 길이와 관련된 설계변수이며 도로이용자비용은 시간지연비용(운전자·탑승자 및 화물의 시간손실에 대한 비용 등: time delay cost), 차량운영비용(연료사용비용 등: vehicle operating cost)으로 구성되며, 본 연구에 적용된 Ehlen/Marshall(1996)의 함수 중 우회도로를 고려한 수정모델을 사용 교량의 유지관리로 인한 사회-경제손실비용은 도로이용자비용의 비율로 고려 $C_{MAI}^{ISE} = \gamma_{MAI} \cdot C_{MAI}^{USER}$ 여기서, γ_{MAI} = 신설교량의 가설위치별, 지역의 교통량별로 범주화된 조건에 따른 사회-경제 손실비용의 도로이용자 비용에 대한 비율
해체·폐기비용 (C_{DIS})	해체·폐기비용 (C_{DIS})	교량의 구성요소에 대한 해체·폐기비용은 다음과 같이 표현될 수 있다. $C_{DIS}(X, t) = \sum_{k=1}^K [C_{DSP}^*(X, t) + C_{REC}^*(X, t)]$ 여기서, k =교량의 구성요소와 관련한 인덱스; C_{DSP} =철거비용; C_{REC} =재활용비용; X =교량에 사용된 재료에 대한 물량 및 유지보수공사조건 등과 관련된 제반 변수; t = 기대수명동안의 임의 시간

프로그램은 총 13개 서브루틴으로 구성된 4개의 모듈로 구성되었다. 먼저 단위비용산정모듈은 본 연구에서 제안된 정식화를 기본으로 초기비용과 1회 시행에 따른 단위관리비용, 단위점검비용, 단위유지보수비용, 단위해체폐기비용의 산정, 그리고 공사구간 조건에 따른 1일 도로이용자비용을 산정한다. 생애주기간비용산정모듈은 adt_regression서브루틴을 이용하여 특정 년도에 대해 입력된 교통량을 보간하여 생애주기간 연도별 교통량을 구하고, 단위비용산정모듈에서 계산된 비용을 이용하여 연간발생비용 산정하기 위한 discount_r서브루틴을 이용하여 현재가치화된 비용을 구하게 된다.

한편 확률적 LCC분석을 위한 모듈은 크게 4개의 서브루틴으로 구성되어 있는데, 사건수기법에 기초한 생애주기 동안 유지관리활동의 발생확률은 maintenance_cycle 서브루틴에서 산정하게 되고, 기타 랜덤변수에 대해서는 MCS를 이용해 산정된다.

이를 바탕으로 구성한 POSBLCC v.1.0의 시스템의 구성도는 그림 5~10과 같다.

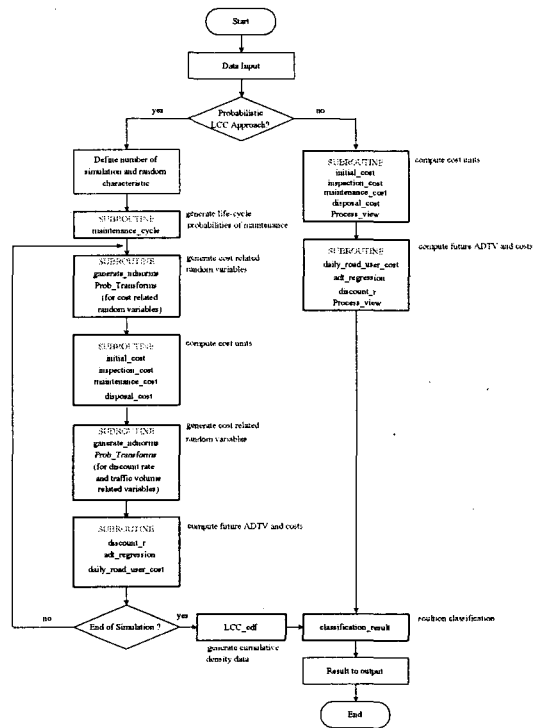


그림 4 POSBLCC의 원시프로그램 흐름도

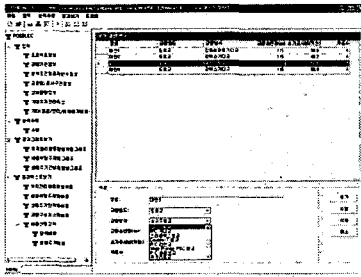


그림 5 메인화면입력창

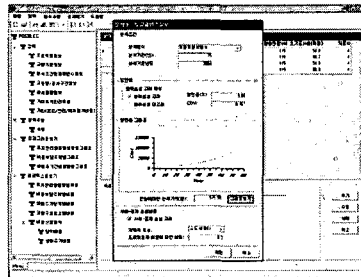


그림 6 분석조건 및 경제변수 정보

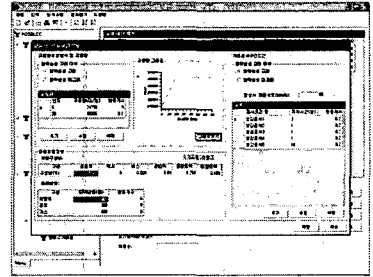


그림 7 교통량 및 공사구간 정보 입력창

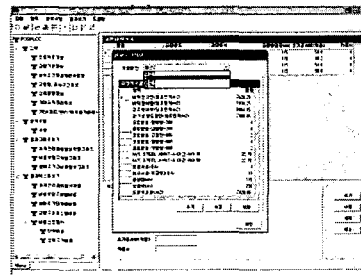


그림 8 교량상세물량 정보 입력창

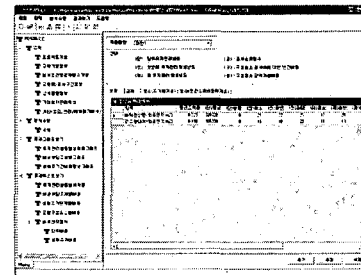


그림 9 기대 유지관리 특성 입력창

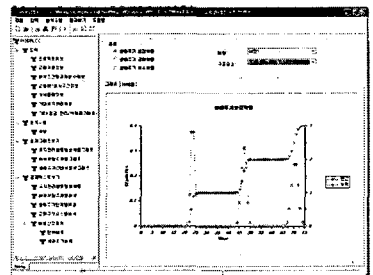


그림 10 생애주기간 유지관리발생확률 그래프

3. LCC 분석 적용 예

3.1 일반사항

교량설계단계 최적의 교량형식의 선정을 위한 적용 예로 국도상에서 전형적으로 건설되어 온 강교의 형식인 판형교와 강박스형교, 그리고 최근 Turn-Key에서 강교형식으로 고려되어지고 있는 소수주형교를 대상으로 하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 본 교량의 차선수는 왕복 4차로이고, 폭원은 14.0m 이며 교량의 총 연장은 모두 3경간 연속 115.0m (=35m+45m+35m)이다.

표 2 LCC분석에 적용된 대안의 일반사항

교량형식		연장 및 폭원	대안의 횡단면도
대안-1	판형교	3경간 연속 (35m+45m+35m=115m) / 4차로 (14.0m)	
대안-2	강박스교 (4주형)		
대안-3	소수주형교		

LCC분석에 필요한 주요경제변수인 할인율과 분석기간은 본 연구에서 제안된 값인 4.0%(변동계수=0.163)와 75년을 각각 적용하였고, 교통량과 차량구성은 국가교통DB자료 (www.ktdb.go.kr)에서 중간정도의 일교통량을 부담하고 있는 서광주 IC.의 일교통량을 적용하였다. 그리고 본 적용 예에서는 표 3과 같은 불확실량을 확률적 LCC분석 시에 각 대안별로 동등하게 적용하였다. 표에 나타난 바와 같이 재주기의 경우는 처음 유지관리발생주기와 비교할 때 미래에 발생하는 데이터이므로 좀 더 큰 불확실성을 부여하여 분석을 수행하였으며, 할인율의 경우는 통계자료가 불충분하여 3.88의 ± 0.5 범위(3.38~4.38)에서 99%의 난수가 발생하도록 조정하여 사용하였다.

표 3 확률적 LCC분석에 적용된 불확실 특성치

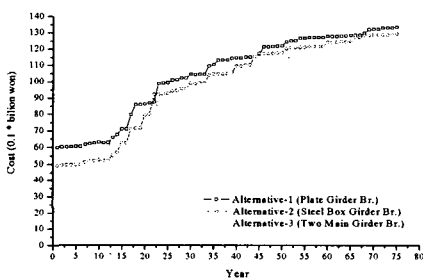
데이터	분포형태	불확실 특성치 (COV=편차/평균)	근거	데이터	분포형태	불확실 특성치 (평균과 최대/ 최소간의 비율)	근거
할인율	정규분포	0.1667 (할인율의 ± 0.5 의 범위에서 난수가 발생하도록 조정)	통계자료	유지관리 주기/재주기	삼각형	$\pm 10\% / \pm 15\%$	설문조사
20년 후 교통량	정규분포	0.100	설문조사	유지관리 단위비용	삼각형	$\pm 5\%$	설문조사
공사 시 지체시간	정규분포	0.200	설문조사	유지관리 공사일수	삼각형	$\pm 20\%$	설문조사

3.2 생애주기비용 분석결과

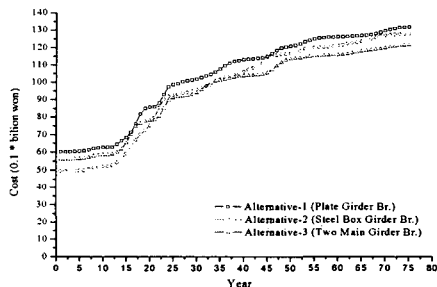
표 4 에는 확정적 방법과 확률적 방법에 의한 LCC분석결과를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 확정적 방법이 확률적 방법에 비해 약간 큰 결과를 나타내고 있으며, 모두 대안-3인 소수주형교가 타 대안에 비해 경제적으로 우수한 것으로 나타났다.

표 4 A교의 확정적, 확률적 LCC분석 결과

구분		대안-1	대안-2	대안-3		
초기비용	확정적분석	58.80	48.20	54.80		
	확률적분석	58.80	48.20	54.80		
유지관리비용	확정적분석	관리비용	1.429	1.171	1.331	
		점검비용	1.364	1.364	1.364	
		유지보수비용	보수비용	29.128	31.601	24.134
			보강비용	17.509	21.138	15.045
			교체비용	24.200	24.956	25.363
	소계	73.630	80.230	67.237		
	확률적분석	관리비용	1.447	1.186	1.349	
		점검비용	1.346	1.346	1.346	
		유지보수비용	보수비용	28.906	31.333	24.049
			보강비용	16.659	20.397	14.364
교체비용			23.712	24.436	24.561	
소계	72.070	78.698	65.669			
해체/폐기비용	확정적분석	1.001	1.001	1.001		
	확률적분석	1.102	1.102	1.102		
총생애주기 비용 (LCC)	확정적분석	133.431	129.430	123.038		
	확률적분석	131.972	128.000	121.571		
	최적안에 대한 상대비율	1.084~1.086	1.052~1.053	최적안		



(a) 확정적 방법

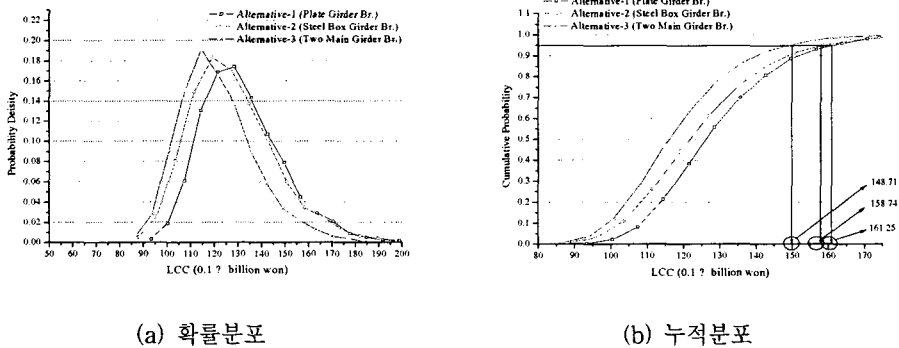


(b) 확률적 방법

그림 4. A교 분석방법에 따른 생애주기 LCC 비교

그림 5는 확률적방법에 의한 생애주기비용의 확률분포와 누적 분포를 나타내고 있다. 표 4에 나타난 바와 같이 확률적 방법에 의한 LCC를 산정하기 위해 적용된 불확실량이 각 대안에 동일한 정도의 값을 적용하여 분석을 수행하였기 때문에, 그림 5의 (a)에 나타난 바와 같이 각 대안의 생애주기비용의 확률분포는 대략 유사한 정

도의 분산정도를 가지는 것으로 나타났음을 알 수 있다. 한편 그림 5의 (b)는 각 대안에 대한 생애주기비용의 누적분포를 나타내고 있는데 그림에 나타난바와 같이 신뢰수준 95%에 대한 각 대안 1, 2, 3의 LCC는 각각 146.058, 141.668, 133.798억 원으로 불확실성을 고려한다 하더라도 역시 대안-3인 소수주형교가 경제적인 교량임을 분석을 통해 알 수 있다. 이러한 결과는 확정적인 분석의 경우와 같지만 확정적인 분석에서는 각 대안별 LCC의 차이가 별로 크지 않아 의사결정이 이루어지기 힘들거나 잘못 내려질 수 있다. 하지만 확률적 방법은 소수주형교가 타 대안에 비해 몇 % 이상 더 우수한 대안이라는 정보를 제공하므로 대안결 정권자의 의사결정 측면에서 좀 더 유용한 방법이라 할 수 있다.



(a) 확률분포 (b) 누적분포
 그림 5. 확률적방법에 의한 A교의 생애주기비용의 확률분포와 누적 분포

4. 결 론

본 연구에서는 교량의 건설계획단계에서 제시된 여러 가지 대안에 대하여 계획, 설계, 시공, 유지관리, 해체 폐기 단계에 이르기까지의 생애주기동안 발생 가능한 비용항목을 고려하여 LCC 분석 프로그램인 POSBLCC를 개발하였으며, 개발된 LCC 분석 시스템을 이용하여 건설계획과정에 있는 교량에 적용하는 사례연구를 통해 그 적용성을 검토하였다. 또한 국내에 가용중인 모든 교량 형식에 대해 LCC 분석시 필요한 비용분류구조를 제안하였으며, 프로그램 자체에서 추천 값을 제공함으로써 사용자가 입력을 따로 준비하지 못하였을 때에도 개략적인 해석을 할 수 있도록 구성되었다.

참고문헌

1. 건설교통부/한국시설안전기술공단 (2000), “도로교의 공용수명 연장방안 연구”, 한국시설안전기술공단 연구 보고서 BR-2000-R1-37”
2. 건설교통부/한국시설안전기술공단 (2002), “교량의 LCC 분석모델 개발 및 DB구축방안 연구”
3. 포스코건설 (2004), “교량의 최적유지관리를 위한 모니터링 시스템 및 LCC분석 프로그램 개발”
4. Ehlen, M. A. and Marshall, H. E., (1996) “The Economic of New Technology Naterials: A Case Study of FRP Bridge Decking”, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.
5. Hawk, G., Brkdge Life Cycle Cost Analysis - Final Report, NCHRP Project 12-43, National Cooperative Highwa Research Program, Transportation Research Board, National Research Council