

## 철도용 SCP합성거더교의 LCC 분석에 관한 연구

### Life Cycle Cost Analysis of SCP Composite Girder Bridge for Railroad

최영민\* · 김대성\* · 조선규\*\* · 권 책\*\*\*

Young-Min Choi · Dae-Sung Kim · Sun-Kyu Cho · Chek Kwon

#### Abstract

Recently, the SCP(Steel Confined Prestressed concrete) composite girders are developed to improve the characteristic such as displacement, vibration, and heavy dead load due to influence of self weight, and inefficiency of steel section of exiting girder-type railroad bridges. It is needed to verify the economical efficiency of newly developed SCP composite girder bridge compared with the conventional girder-type bridges. In this paper, LCC analysis for alternative railroad bridges is performed and its technique based on level of risk(probability of failure) is suggested. From the results, it may be stated that SCP composite girder bridge is more economical than a conventional one.

**Keywords** : SCP composite girder(합성거더), LCC(생애주기 비용), failure probability(파괴확률), risk assessment(위험도 평가), railroad bridges(철도교)

#### 1. 서론

최근 교량 건설과 관련된 국내·외의 기술동향을 살펴보면 다양한 구조용 재료의 개발과 더불어 새로운 형식의 교량을 개발하고자 하는 노력이 경주되고 있다. 특히, 기존의 건설재료인 콘크리트와 강재(강판, 철근, PS강재 등)의 재료적 장점을 극대화하여 기존 중·장경간 합성거더교의 주요형식인 강박스, 프리플렉스의 취약점으로 거론되는 처짐, 진동, 강재단면의 저효율성 등과 같은 문제점을 개선하여 경간을 장대화하려는 목적으로 새롭게 개발된 합성거더교인 SCP거더교(Steel Confined Prestressed Concrete Girder Bridge)가 그 일예이다. SCP합성거더교의 SCP거더는 기존의 PSC거더를 강재가 둘러싸는 형태의 합성거더로서, 외피의 강재는 시공시 거푸집으로 사용할 뿐만 아니라 철근을 대체하여 철근량을 감소시켜 현장시공성을 극대화하고 취성인 콘크리트를 외부에서 구속함으로써 콘크리트의 효율을 증가시킬 수 있는 구조형식이다.

SCP거더에 대한 이론적, 실증적인 검증은 정부출연기관인 한국건설기술연구원을 통해 이미 완료되었으며, 이를 바탕으로 건설신기술을 취득하여 국내 도로교의 구조형식으로 실제 활용하고 있다. 최근에는 도로교뿐만 아니라 철도교에 이 신기술을 적용하고자 한국건설기술연구원과 한국철도기술연구원의 공동연구를 통해 철도교의 특성 및 설계기준에 적합하도록 SCP합성거더교를 개발하였다(2005).

이와 같이 SCP합성거더교는 구조적 안전성 및 사용성과 건설재료 활용의 효율성이 뛰어나 새로운 교량형식으로 널리 활용되려는 현 시점에서 교량의 가치를 평가함에 있어 중요한 평가기준의 하나인 경제적 우수성을 검증할 필요가 있다. 경제성의 평가시 단순 재료의 물량과 초기건설비 중심의 평가가 아닌 구조물의 전 수명 동안 비용을 고려하는 총생애주기비용(LCC : Life Cycle Cost)에 기초하여 기존 교량형식과 비교, 평가하는 것은 매우 중요하다. 또한 총생애주기비용 중에서 유지관리비용 고려시 구조물의 파손/파괴에 따라 유지관리비용은 다르게 되는데 이를 합리적으로 반영하기 위해서는 대안간 구조물의 파괴확률 즉, 위험도(risk)를 산정하여 이를 바탕으로 유지관리비용이 재평가되어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 각 대안 구조형식에 대한 파괴확률을 구하고 이를 유지관리비용에 고려하는 방법을 제시하였다.

† 책임저자 : 정회원, 자람기술(주), 대표이사, 공학박사  
E-mail : choijaram@jaram-tech.com  
TEL : (02)2103-2481 FAX : (02)2103-2489

\* 자람기술(주), 분석평가사업부, 팀장

\*\* 서울산업대학교 철도전문대학원, 교수

\*\*\* 신성건설(주) 토목본부장, 전무이사

## 2. LCC 분석기법

### 2.1 정식화

일반적으로 교량구조물에 적용되는 LCC 모델은 미국의 NIST(Ehlen & Marshall, 1996)에서 제시한 표 1과 같은 모델로서 본 연구에서도 이 모델을 적용하였다.

### 2.2 할인율(Discount Rate)

할인율은 LCC 분석을 위해서 예상되는 미래의 소요비용을 현재비용으로 환산하기위해 사용되며, 이를 위해 사용되는 개념에는 명목할인율과 실질할인율이 있다. 할인율 산정식은 식 (1)과 같다.

$$i_r = \frac{(1+i_n)}{(1+f)} - 1 \quad (1)$$

여기서,  $i_r$ 은 실질할인율(인플레이션과 물가상승률을 고려한 할인율)을 나타내며 일반적인 LCC 분석시 사용된다.  $i_n$ 은 명목할인율(인플레이션과 물가상승률을 고려하지 않은 할인율) 즉 은행금리를 나타내며,  $f$ 는 인플레이션을 의미한다. 표 2는 금리자유화 이후 할인율 변화추이를 보여주고 있다. 본 연구에서는 할인율을 표 2에서 제시한 값을 사용하였다.

특히 본 연구에서는 LCC 산정에 있어서 각 변수의 확정

표 1. NIST 모델식

PVLCC = IC + PVOMR + PVD	
PVLCC : 현재가치의 총기대비용	PVOMR : 유지보수비용
IC : 초기비용	PVD : 해체 및 폐기비용

표 2. 할인율 변화추이(1993~2004)

년 도	시중은행 정기예금금리	인플레이션		실질할인율
		소비자물가지수	물가상승율	
1993년	8.50%	74.2	4.80%	3.53%
1994년	9.30%	78.8	6.20%	2.92%
1995년	8.80%	82.3	4.44%	4.17%
1996년	9.00%	86.4	4.98%	3.83%
1997년	10.59%	90.2	4.40%	5.93%
1998년	13.39%	97.0	7.54%	5.44%
1999년	7.05%	97.8	0.82%	6.17%
2000년	7.08%	100.0	2.25%	4.72%
2001년	5.46%	104.1	4.10%	1.31%
2002년	4.71%	106.9	2.69%	1.97%
2003년	4.15%	110.7	3.55%	0.57%
2004년	3.75%	114.7	3.63%	0.13%
평 균	-	-	4.12%	3.39%

값을 이용하는 확정적 방법이 아닌 추정값의 불확실성을 고려하는 확률론적 방법에 의해 LCC를 산정하므로 할인율의 변동계수를 적용하게 되는데, 금리자유화 이후(1993~2004년)의 은행금리와 인플레이션을 고려하면 변동계수가 0.5로 매우 높게 산정되는 문제점이 있으며 이는 IMF 당시 금리의 급등 등으로 인해 발생한 것이다. 따라서 할인율의 변동계수를 적용함에 있어 향후 국내 경제수준이 선진국의 경제수준에 접근할 것을 감안하여 변동계수 0.05를 사용하였다.

### 2.3 분석기간

분석기간 다시 말해, 내구연한이란 구조물 시스템이나 주요 구성요소가 손상되거나 파손되어 더 이상 그 기능을 발휘하지 못하게 되는데 까지 걸리는 시간을 말하며, 구조물의 내구연한은 구조물의 수명으로 정해지며, 구조물의 수명에는 물리적 수명, 기능적 수명, 경제적 수명 등이 있다. 일반적인 의미에서 구조물의 수명은 물리적 수명을 의미한다. 그러나 LCC 분석에 적용하는 내구연한은 구조물의 물리적 수명, 기능적 수명 및 경제적 수명 중 가장 짧은 수명을 의미한다. 본 연구에서는 표 3과 같이 철도투자편람(2003)에서 제시된 철도시설물의 공용수명 중 교량부분의 60년을 적용하였다.

### 2.4 LCC 구성항목

LCC의 분석 시 단일안(대안이 없는 경우)은 분석기간 동안에 발생하는 모든 비용을 파악해야하지만, 여러 개의 대

표 3. 철도시설물의 공용수명

구분	시 설						
	노 반				궤도	건물	신호
	토공	교량	터널	정거장			
공용수명	80	60	60	60	25	60	20

표 4. 교량의 LCC 구성항목 및 세부항목

대분류	중분류	소분류
초기비용	기획·설계비	기본·실시설계비
	시공비	직접·간접공사비
		일반관리비 및 이윤
유지관리비용	감리·감독비	공사감리비, 감독비
	일반관리비	인건비
	점점 및 진단비용	정가정밀점검비
		정밀안전진단비
	유지보수비용	보수, 보강, 교체비
	사용자비용	차량운행비
시간지연비		
사회간접손실비용	직접·간접손실	
	해체·폐기비용	해체·폐기처분비

인별 비교를 위한 분석에서는 공통되거나 중요도가 낮은 비용은 제외하고 각 대안에서 요구성능을 유지하기 위해 발생하는 의미 있는 비용만을 분석한다. 본 연구는 후자에 속한다. 또한, LCC를 구성하는 비용항목은 대안의 계획, 설계, 건설, 유지 및 보수·보강과 해체·폐기단계의 전체 생애에서 발생하는 순서로 구분하여 구성요소를 분류하고 분석의 수준을 결정하였다. 교량에 대한 LCC 분석시 요구되는 구성항목 및 세부항목은 표 4와 같다.

**2.4.1 유지관리비용(유지보수비)**

비용항목은 설계수명 동안 해당 요소에 대해 유지관리 및 보수·보강의 생애주기, 유지관리비용 및 보수·보강비용이 각각 합리적으로 반영되어야

하는데, 이는 장기간에 걸쳐 축적된 유지관리 데이터를 기초로 하나 자료가 부족할 때는 전문가의 판단에 기초한다. 그러나 철도교량에 대한 LCC 분석 관점에서의 유지관리비용에 대한 관련 자료가 상당히 부족한 실정이며, 체계적인 연구 역시 부족한 상태이다. 따라서 조속한 시일 안에 관련 연구가 유관기관의 협조와 지원 하에 반드시 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 현재 유사 구조형식에 대해 가용한 자료로 도로교의 연구결과를 활용하였다. 이는 본 연구가 각 대안의 절대 LCC를 구하고자 하는 것이 아니고 몇몇 대안간 상대적 LCC에 기초한 경제성의 비교를 수행하고자 하므로 적용가능하리라 판단된다. 교량의 LCC 분석결과에 상당히 영향을 주는 각 구성요소의 보수보강율, 수명 및 주기, 비용에 대해서는 철도교와 관련한 자료가 부족한 실정으므로 한국도로공사(2002)의 「고속도로 교량 구성요소별 생애주기비용 분석연구」와 한국시설안전기술공단(2000)의 「도로교의 공용수명 연장방안 연구」의 국토 통계조사에 대한 추세선에 의한 분석결과를 활용하였다.

**2.4.2 사용자비용**

사용자비용(User Cost)은 시설물의 시공, 보수·보강(바닥판 교체 등), 재시공 등을 위하여 시설물의 일시적인 교통통제 및 우회 시 시설물의 이용자에게 부담되는 비용을 말한다. 다시 말해, 사용자 비용은 광범위한 의미를 갖기 때문에 교량의 이용자가 교량을 정상적으로 통행을 하지 못하게 되어 추가로 지拂되는 비용을 의미한다. 이 비용은 주로 초기 건설시, 보수보강 및 성능개선 개축 시 발생한다.

이와 같은 일반적 정의는 도로교의 사용자비용을 말하며, 철도교의 경우는 다소 다르게 고려되어야 할 것이다. 즉, 철도교의 통상적인 보수보강은 물류집중시간을 피하여 심야

시간을 이용하고 또한 철도는 우회 개념이 상당히 어려운 점이 있다. 이는 철도교의 경우 가능하면 유지관리를 최소화할 수 있는 개념의 설계(maintenance-free)가 필요한 이유이다. 본 연구에서 철도교의 사용자비용 산정 시 시간지연비용은 열차지연에 따른 손실비용을 말하며(철도학회, 2004), 1984년~2002년 동안에 총 지연건수는 590건으로 연평균 약 31건이며, 낙석에 의한 열차지연시간은 연평균 30시간이 발생한 것으로 나타났다(철도통계연보, 2002). 따라서 본 연구에서는 이 자료를 기준으로 철도교에 미치는 열차지연비용을 산정하였다.

철도교의 사용자비용의 정식화에 대한 연구 및 관련 데이터는 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 도로교 사용자비용의 수식에 기초하여 철도교의 특성에 따른 개념을 반영해서 표 5와 같이 정식화 하였다.

**2.4.3 사회간접손실비용**

사회간접손실비용이라 함은 성수대교 붕괴나 당산철교 재시공 등에서 알 수 있듯이 교량붕괴 등으로 인한 해당 지역의 여가, 쇼핑, 지가하락 등의 간접적인 경제적 손실을 의미한다. Seskin(1990)은 간접적 지역경제 편익은 표 6과 같이 제안하였으며, 그 산정식은 식 (2)와 같다.

$$C_e = \phi C_u \tag{2}$$

여기서,  $C_e$  : 제3집단비용,  $\phi$  : 손실비용계수,  $C_u$  : 사용자비용

**3. 위험도 분석**

LCC 분석은 재래적인 경제성평가에서 초기공사비와 감

표 5. 열차지연비용 산정식

여객열차지연비용	◆ 여객열차지연비용 = 연간업무용 시간가치(C1) + 연간 비업무용 시간가치(C2) 여기서, C1 = 업무 시간가치 × 업무통행비율 × 연간이용인원 × 연간지연시간 C2 = 비업무 시간가치 × 비업무통행비율 × 연간이용인원 × 연간지연시간
화물열차지연비용	화물열차지연비용 = 화물시간가치 × 연간수송량 × 연간지연시간

표 6. 열차지연비용 산정식

구분	대도시	중소도시	소도시
손실비용계수	1.5	1.0	0.5

가상각비에 의해 결정되는 개념이 아닌 총생애주기비용 특히, 유지관리비용을 고려한다는 것이 핵심이다. 이때 유지관리비용은 구조물의 파손/파괴에 따라 다르게 되는데 이를 합리적으로 반영하기 위해서는 대안간 구조물의 파괴확률 즉, 위험도(risk)를 산정하여 이를 바탕으로 유지관리비용이 평가되어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 각 대안 구조형식에 대한 파괴확률을 구하고 이를 유지관리비용에 고려하는 방법을 제시하였다.

확률적인 개념에 의한 구조물의 위험도는 파괴확률(failure probability)  $P_f$ 에 의해 정의되어진다. 각각 작용외력  $S$ 와 저항  $R$ 은 기지의 확률밀도함수  $f_S(\cdot)$ 와  $f_R(\cdot)$ 로 표시되어진다.  $S$ 는 결정론적 또는 확률론적 구조해석을 통하여 작용한 하중  $Q$ 로부터 얻을 수 있다.  $R$ 과  $S$ 는 같은 단위로 표시되어진다. 여기서 구조요소의 안전도는 역시 무작위변량인 안전여유(safety margin)  $Z=R-S$ 에 의해 좌우되며,  $Z \leq 0$ 일 때 안전성을 상실한 파손 또는 파괴상태가 된다. 즉, 구조요소는 저항  $R$ 이 작용외력  $S$ 보다 작을 때 파손되어진다고 고려한다. 따라서 구조요소의 파괴확률  $P_f$ 는 식 (3)과 같이 표시된다.

$$P_f = P(R \leq S) = P(R - S \leq 0) \quad (3)$$

#### 4. 대안별 LCC 분석

본 연구에서는 SCP합성거더의 LCC에 기초한 경제성을 검토하기 위해 철도교의 비교 경간장에 대해 기존 공법으로서 대표적인 Preflex 거더와 Steel Box 거더에 대해 LCC 분석을 수행하였다. LCC 분석을 수행함에 있어 앞에서 기술한 바와 같이 철도교에 대해서는 체계적인 연구결과나 기존 데이터의 정립이 부족하므로 적용할 데이터가 없는 경우 일부 도로교에서 적용한 데이터를 사용하였다. 이는 각 거더에 대한 절대적인 LCC를 구하고자 하는 것이 아니고 대안별 상대적 LCC를 통해 경제성에 대한 비교우위를 검증하고자 하는 것이므로 비록 도로교의 데이터라 할지라도 대안거더별로 같은 기준에 의해 적용한다면 목적을 합리적으로 달성할 수 있다고 사료된다.

##### 4.1 대안별 현황

대안별 제원은 그림 1과 같다.

##### 4.2 LCC 분석결과

내구연동안간 초기건설비용, 유지관리비용, 해체·폐기비용을 포함한 확률적 방법에 의한 LCC 분석을 수행하였다.

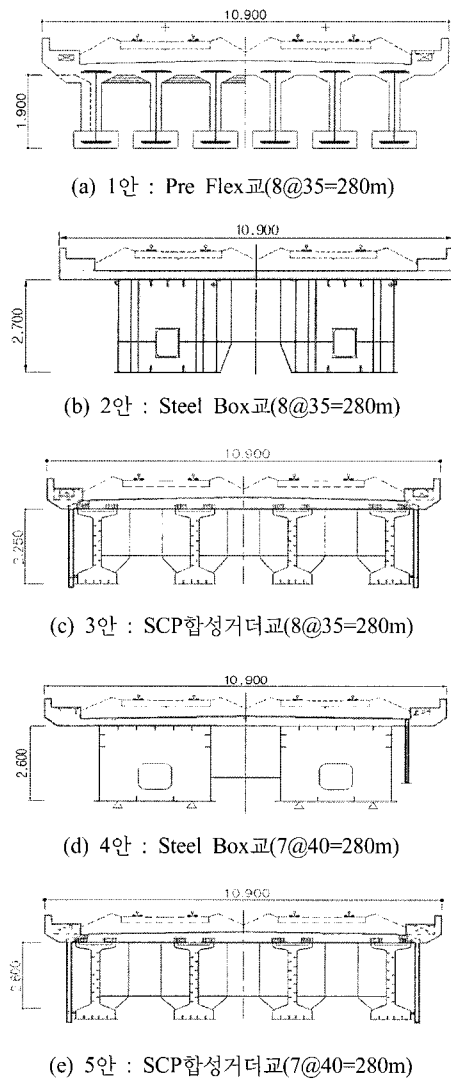


그림 1. 대안교량 단면도

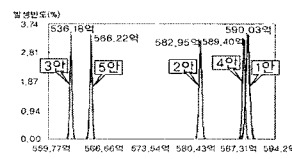


그림 2. 확률밀도(PDF)

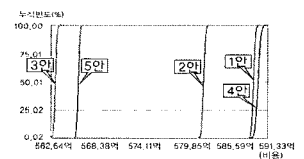


그림 3. 누적분포(CDF)

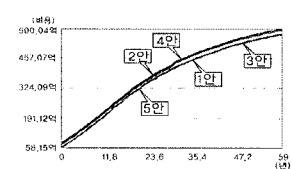


그림 4. 공용연수별 추이곡선

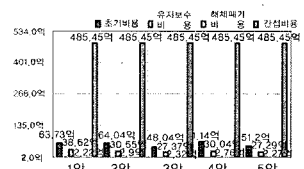


그림 5. LCC 항목별 비용

그림 2~그림 3은 MCS(Monte-Carlo Simulation)를 이용한 확률적 LCC 분석결과 중 각각 비용분포형태, 누적빈도분포

표 7. LCC 세부내용 및 상대 LCC 산정

구 분	1안	2안	3안	4안	5안		
초기비용	63.73	64.04	48.04	71.14	51.20		
직접비용	유지 관리 비용	관리비용	0.53	0.79	0.79	0.79	
		점검비용	6.09	6.41	6.08	6.40	6.06
		보수비용	10.76	3.40	4.26	3.33	4.20
		보강비용	14.96	4.66	8.33	5.19	8.95
		교체비용	6.29	15.30	7.91	14.34	7.30
해체폐기비용	2.22	2.90	2.32	2.76	2.27		
소 계	104.58	97.50	77.73	103.95	80.77		
간접비용	사용자비용	242.73	242.73	242.73	242.73	242.73	
	사회손실비용	242.73	242.73	242.73	242.73	242.73	
	소 계	485.46	485.46	485.46	485.46	485.46	
LCC(직접+간접)	590.03	582.95	563.18	589.40	566.22		
상대 LCC	1.047	1.035	1.000	1.046	1.005		

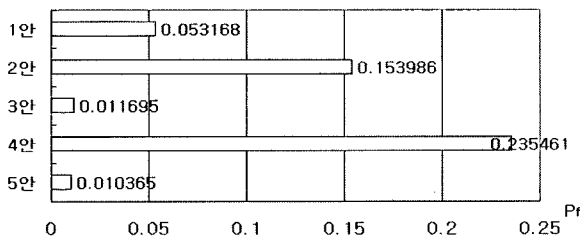


그림 6. 대안별 파괴확률

를 나타낸 것이고, 그림 4~그림 5는 각각 공용연수별, 항목별 LCC 비용을 나타낸 것이며, 표 7은 LCC 분석결과와 세부내용 및 상대 LCC를 나타낸 것이다.

### 4.3 위험도를 고려한 사용자비용 산정

재래적인 LCC 분석기법에 기초하여 철도교의 LCC를 분석하게 되면 구체적인 철도교의 구조형식에 따른 특성이 반영되지 못하는 단점을 가지고 있다. 다시 말해, 각 구조형식의 간접비용이 동일한 값을 가짐을 알 수가 있다. 이는 일괄적인 철도노선의 연평균지연시간을 기초로 하여 간접비용을 추정하기 때문에 구조형식별로 차별화하기 위해서는 본 연구에서 제안하는 철도교의 위험도(파괴확률)에 기초한 LCC 분석을 수행하는 것이 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 각 형식별 대안에 대해 지배적인 파괴확률을 계산하였으며 이를 각 대안별 간접비용에 곱하여 차등 간접비용을 추정하였다. 그림 6은 대안별 파괴확률을 산출한 결과이고, 표 8은 파괴확률을 적용하여 차등 간접비용을 추정한 결과이다.

표 8. 파괴확률에 따른 간접비용 산정

구 분	1안	2안	3안	4안	5안	
파괴 확률 미고려	사용자비용	242.73	242.73	242.73	242.73	242.73
	사회손실비용	242.73	242.73	242.73	242.73	242.73
소 계	485.46	485.46	485.46	485.46	485.46	
파괴 확률 고려	사용자비용	12.91	37.38	2.84	57.15	2.16
	사회손실비용	12.91	37.38	2.84	57.15	2.16
소 계	25.82	74.76	5.68	114.30	4.32	

표 9. 위험도에 기초한 LCC 분석결과

구 분	1안	2안	3안	4안	5안	
직접비용	104.58	97.50	77.73	103.95	80.77	
간 접 비 용	사용자비용	12.91	37.38	2.84	57.15	2.16
	사회손실비용	12.91	37.38	2.84	57.15	2.16
	소 계	25.82	74.76	5.68	114.30	4.32
LCC(직접+간접)	130.40	172.26	83.41	218.25	85.09	
상대 LCC	1.563	2.065	1.000	2.616	1.020	

### 4.4 위험도에 기초한 LCC 분석결과

파괴확률을 고려한 차등 간접비용 산정으로 총 생애주기 비용을 다시 정리하면 표 9와 같다.

## 5. 결론

본 연구에서는 철도교용 SCP합성거더교와 이미 철도교에 사용되어오던 Preflex 거더교 및 Steel Box 거더교를 비교대안으로 선정하고 재래적 LCC 분석기법과 본 연구에서 제안하는 위험도에 기초한 LCC 분석기법을 적용하여 총생애주기비용 차원의 경제성 분석을 실시하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 파괴확률을 고려하지 않은 재래적 LCC 분석기법과 파괴확률을 고려하는 위험도에 기초한 LCC 분석기법에 따라 다소 정도의 차이는 있지만 SCP합성거더교가 Preflex 거더교나 Steel Box 거더교에 비해 LCC 측면의 경제성은 우수한 것으로 판정되었다.
- (2) 재래적 LCC 분석기법에서는 모든 경간장에 대해 간접비용의 산정시 각 안별로 같은 비용으로 산정되고 있는데, 이는 재래적 철도교의 사용자 비용을 추정할 때 현재의 주어진 정보를 가지고는 교량형식에 대한 특성을 반영할 수 없기 때문이며 따라서 교량의 상대적 특성을

반영할 수 있는 위험도에 기초한 LCC 분석이 요구된다. 이는 위험도(파괴확률)에 따른 차등 간접비용의 산정결과로부터 확인할 수가 있다.

- (3) 철도시설물에 대한 VE/LCC 평가를 수행하기 위해서 필요한 기본적인 데이터와 체계적인 연구가 상당히 미흡한 부분이 많으므로 추후 관련 연구가 철도 관련 전문가들을 중심으로 활발히 이루어져야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 신성건설(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

### 참고 문헌

1. 서울산업대학교 (2005), 철도용 SCP합성거더교의 VE/LCC분석 프로그램 개발.
2. 한국도로공사 (2003), 고속도로 교량형식별 생애주기비용(LCC) 분석 연구.
3. 최길대 (2001), 수명주기비용분석기법을 적용한 교량유지관리 방안에 관한 연구.
4. 안장원 (2001), Life Cycle Cost 기법을 이용한 교량의 경제성 분석.
5. 한국건설기술연구원 (2005), SCP합성거더를 이용한 연속합성도로교 및 단순합성 철도교의 개발.
6. 한국시설안전기술공단 (2000), 도로교의 공용수명 연장방안 연구.
7. 한국개발연구원 (2001), 2001년도 예비타당성조사 연구보고서 철도부분사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판).
8. 조효남 (1998), 체계 신뢰성방법에 기초한 강사장교의 안전도평가.
9. 김유식 (1992), 하중-저항계수 설계법의 목표 신뢰성지수 결정방법.