

# 강교의 도장방식에 따른 안전수명간 생애주기비용분석

조선규<sup>†</sup> · 한상철 · 김은겸

서울산업대학교 토목공학과

(2002. 1. 22. 접수 / 2002. 5. 23. 채택)

## Life Cycle Cost Analysis of Steel Bridges on Its Paint System during Safe Life Under

Sun-kyu Cho<sup>†</sup> · Sang-Chul Han · Eun-Kyun Kim

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Technology

(Received January 22, 2002 / Accepted May 23, 2002)

**Abstract :** Life Cycle Cost analysis technique is introduced to evaluate cost-effectiveness of two paint systems of steel bridges. The systems are a conventional paint system and a galvanized paint system. The all costs during safe life such as initial cost, repainting costs, disposal costs are considered for the life cycle cost analysis. The NIST model is used and BridgeLCC 1.0 developed by the NIST is utilized as the life cycle cost analysis tool. It is concluded that, in spite of expensive initial cost, the durable paint system may be cost-effective compared with conventional paint system.

**Key Words :** life cycle cost, painting, corrosion, steel bridges, service life

### 1. 서 론

#### 1.1. 연구의 필요성과 목적

교량은 계속적으로 변하는 하중환경에 의해서 다른 구조물에 비해 비교적 빨리 노후화 되기 때문에 교량의 성능, 안전, 서비스, 비용과 수명에 큰 영향을 주는 계획, 내구성재료의 선택, 유지관리 단계에서의 개·보수(rehabilitation) 또는 교체(replacement) 등에 대한 최적 의사결정이 매우 중요하다. 최근 부실공사와 유지관리소홀 등으로 인하여 공용수명을 다하지 못하고 교량이 교체되는 점을 감안하면, 건설에 따른 초기공사비 뿐만 아니라 구조물의 경제적인 수명 전반에 걸친 생애주기비용(Life Cycle Cost : 이하 LCC)적인 관점에서 안전과 경제성이 고려되어야 한다. 그러나, 국내의 실정은 교량의 건설 이후에 중·장기적으로 소요되는 추가비용보다는 일반적으로 건설당시 소요되는 초기비용을 기준으로 교량을 계획하는 경우가 대부분이다.

최근 건설교통부(김용수, 김훈, 1999)에서 발간된

『공공건설사업 효율화 종합대책 정책자료집』에서 는 비효율적 설계, 시공, 유지관리에 대한 건설전반의 문제점을 지적하고 있다. 특히 계획단계에서의 형식적인 타당성 조사평가 수준을 탈피하여 진정한 의미의 경제적 타당성조사를 수행해야 함을 제시하였으며, 그 핵심적인 사항으로서 안전도 확보 수준의 LCC분석을 요구사항으로 제시하고 있다.

이와 같이 공공사업에 대한 시설물 안전합리화 방안을 도모하고자 기본계획 및 설계시 안전을 고려한 LCC분석이 필요한 실정이다. 그러나 시설물 안전도 확보의 LCC분석 절차 및 평가기준이 아직도 마련되지 않고 있어 어려움이 많다. 본 연구는 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 부식영향과 관련된 강교의 안전수명간 LCC를 분석하였다.

### II. LCC 분석모델과 해석

#### 2.1. LCC분석 정식화

본 연구에서 생애주기비용 분석을 위하여 다음과 같이 정식화하였다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
skcho@snut.ac.kr

$$PVLCC = IC + PVOMR + PVD \quad (1)$$

여기서,  $PVLCC$ =현재가치의 총기대비용

$IC = \text{초기비용}$

*PVOMR*=유지관리비용

*PVD=처리비용*

이때, 현재가치의 총기대비용은 식(2)와 같다.

$$PVLCC = \sum_{k=0}^N \frac{C_k}{(1+i)^k} \quad (2)$$

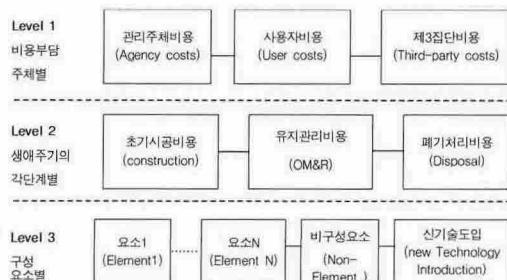
여기서,  $C_k = k$  년에 발생하는 모든 비용(초기비용, 유지관리비용, 처리비용 포함)

$i$  = 할인율

$N$  = 생애주기비용 고려시 공용기간

## 2.2. 비용항목의 적용

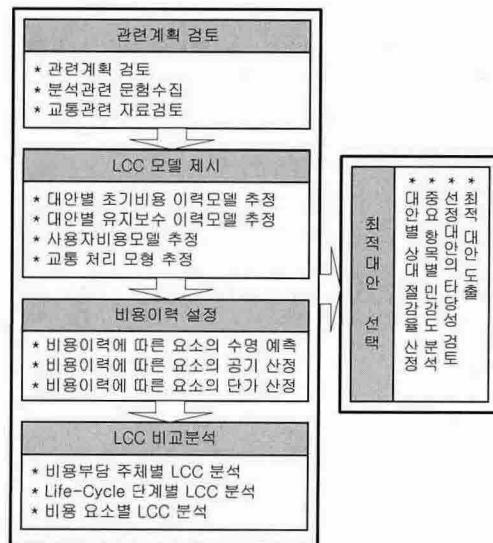
LCC 분석과정에서 적용한 비용분류체계는 Fig. 1과 같이 3단계로 구분하였다. 분류체계 중 비용부담주체에 관하여는 관리주체와 이용자 그리고 제3집단으로 구분하였다. 이때 제3집단 비용은 교량이 차단됨으로서 이용자의 접근이 봉쇄되는 경제적 손실 또는 환경문제 발생으로 인해 인간이 피해를 입게 되는 환경비용 등의 간접비용으로서 아직 정식화된 모델이 존재하지 않아 고려하지 않았다. 그리고 구성요소별 항목의 신기술 도입 비용은 신기술과 관련된 재료 또는 공법의 성능과 예측된 안전도 확보의 공용 수명을 만족시키기 위하여 제공되는 제반설험, 검증, 평가등의 비용이다.



**Fig. 1.** Classification of LCC

### 2.3. LCC 분석의 단계 및 해석

LCC 분석의 단계는 일반적으로 다음과 같은 단계로 이루어지며, 그 흐름은 NIST에서 개발한 Bri-



**Fig. 2.** Procedure for LCC Analysis

dge LCC 1.0프로그램을 기준으로 수치해석에 적용하였다. Fig. 2는 Bridge LCC 1.0프로그램(Ehlen, 1996)을 이용한 LCC 분석절차를 보여주고 있다.

수치해석시 사용한 단계는 사업목표와 효율적 수행을 위한 요구사항 결정, 목표달성을 위한 대안 파악, LCC분석을 위한 기본가정 설정, 비용항목과 관련된 발생시기 비용의 크기 등의 추정 및 결정, 각 대안의 LCC 계산, 민감도 해석, 각 대안의 LCC 비교, 각 대안이 프로젝트에 미치는 영향, 최적대안 선택 등이다.

LCC 분석을 위한 해석도구로서는 최근 Ehlen이 교량의 비용 효율적 설계와 안전도 확보의 유지관리를 위해 개발한 Bridge LCC 1.0 프로그램을 이용하였다.

### III. 대안교량의 LCC 분석 및 고찰

### 3.1. LCC 분석을 위한 가정

우리나라의 경우 시설물 유지관리에 대한 중요성이 성수대교의 붕괴이후부터 본격적으로 대두되었기 때문에 유지관리에 대한 이력데이터, 자료의 정리가 현재 충실히 되어있지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 기본자료가 없는 다음과 같은 사항에 대하여 전문가적 판단에 기초한 합리적인 수준으로 가정하여 LCC를 분석하였다.

- 1) 강교의 물리적 안전수명은 피로, 부식에 의한

요인이 주요 영향인자이다. 최근 강교의 피로문제는 실험 등을 통해 거의 해결이 된 상태이므로 중요한 문제는 부식의 영향이다. 따라서 안전과 관련한 강교의 수명은 주기적인 도장으로 유지관리 할 경우 100년 정도는 보장할 수 있다고 판단되며, 또한 일반적으로 강교의 내구년한을 100년 기준으로 계획하고 있으므로 본 연구에서는 LCC 분석기간을 100년으로 설정하였다.

2) 도장방식에 따른 내구년한 관련자료는 현재 없으며, 일반적인 방법의 내후성 중방식도장방식은 내구년한을 15년정도로 보고 있다. 본 연구에서는 습한 지역의 열악한 부식환경 기준으로 평가하여 통상 내후성 중방식도장의 기대수명인 15년 정도보다 작은 10년으로 가정하였다.

3) 갈바륨용사 방식으로 도장할 경우 내구년한을 100년 정도로 추정(Nishikawa, 1995)하고 있으나 이 역시 부식에 열악한 환경조건의 안전측으로 50년을 적용하였다.

4) 비용계산에 적용한 할인율은 우리나라가 선진국에 진입할 것을 감안하여 선진국에서 적용하는 할인율의 상위 범위인 5%를 사용하였다.

5) 신기술 도입비용은 고려하지 않았으며, 교량의 교통처리기능 특성상 모든 대안에 대한 여행자의 시간지연에 따른 사용자비용은 발생하지 않는다고 가정하였다.

6) 정기점검비용(일상점검비용 포함)은 1년에 한번씩 발생하며 초기공사비의 0.5%로 가정하였다. 그리고 정밀안전진단은 5년에 한번씩 발생하며 초기공사비의 5%로 가정하였다.(사단법인 한국강구조학회, 1998)

### 3.2. 설계대안과 해석조건

상부구조형식의 대안교량으로서는 다음 Table 1 과 같이 3가지 대안, 즉 소수주형 판형교, 중로아치 강상형교, 강트러스교를 비교 검토하였다.

강교는 재료의 특성상 부식에 의한 강도저하요인 이 발생하므로 내하력 유지를 위한 안전도 확보를 위하여 부식방지 처리가 필요하다. 강교 부식방지를

Table 1. Type of Superstructure

설계대안	상부구조형식	경간장구성
제1안	소수주형 판형교	65+6@90+65=670m
제2안	중로아치+강상형교	3@70+70+120+70+3@70=680m
제3안	강트러스교	3@70+70+120+70+3@70=680m

위한 도장방식에 대하여는 Table 1의 3가지 대안에 대하여 각각 일반 중방식 도장과 갈바륨용사(Galvalume Metalizing)를 적용하여 다음 Table 2와 같이 총 6가지 대안에 대한 LCC분석을 실시하였다.

Table 2. Descriptions for Design Alternatives

설계대안	대안의 구성
제1안	소수주형 판형교 형식, 일반중방식도장방식 채용
제2안	중로아치 + ST BOX 형식, 일반중방식도장방식 채용
제3안	ST TRUSS 형식, 일반중방식도장방식 채용
제4안	소수주형 판형교 형식, 갈바륨용사 도장방식 채용
제5안	중로아치 + ST BOX 형식, 갈바륨용사 도장방식 채용
제6안	ST TRUSS 형식, 갈바륨용사 도장방식 채용

Table 3. Quantities

항 목	설계 대안					
	제1안	제2안	제3안	제4안	제5안	제6안
강재(tonf)	7,400	7,134	6,691	7,400	7,134	6,691
콘크리트( $m^3$ )	3,648	3,702	3,702	3,648	3,702	3,702
도장( $m^2$ )	일반중방식 43,934	134,012	183,868	-	-	-
	갈바륨용사	-	-	43,934	134,012	183,868
도장보수( $m^2$ )	일반중방식 43,934×9	134,012×9	183,868×9	-	-	-
	갈바륨용사	-	-	43,934	134,012	183,868
점검(회)	100	100	100	100	100	100
정밀안전진단(회)	19	19	19	19	19	19
처리비-콘크리트( $m^3$ )	3,648	3,702	3,702	3,648	3,702	3,702
처리비-강재(tonf)	7,400	7,134	6,691	7,400	7,134	6,691

Table 4. Unit Costs and Frequencies

항 목	단위 비용		시작년도	종료년도	발생주기
	단위	금액(천원)			
강재	원/tonf	1,449	1	1	1
콘크리트	원/ $m^3$	360	1	1	1
도장	일반중방식 원/ $m^2$	18	1	1	1
	갈바륨용사 원/ $m^2$	30	1	1	1
도장보수	일반중방식 원/ $m^2$	75	10	90	10
	갈바륨용사 원/ $m^2$	28	50	50	50
점검	원/회	205.5	1	99	1
정밀안전진단	원/회	2,055	5	95	5
처리비-콘크리트	원/ $m^3$	56	100	100	100
처리비-강재	원/tonf	31	100	100	100

갈바륨용사는 초기비용이 비싼 관계로 현재 교량 공사에의 적용 사례는 부진하지만 그 내식성으로 인하여 도장 수명을 극대화할 수 있는 장점이 있다. 따라서 초기공사비 증가분에 대응할 수 있는 교량 안전도 확보의 유지관리비 최소화로 인해 LCC를 저감할 수 있다. 본 연구에서 정량적인 분석을 위하여 적용한 설계단면 수량은 Table 3과 같으며 단위 비용 등 세부 해석조건은 Table 4와 같다.

### 3.3. 해석결과 및 고찰

Table 5는 각 대안에 대한 LCC와 비용항목을 정리 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 안전수명간 LCC는 제 4안이 가장 경제적이다. 제 4안, 즉 소수 주형을 사용하며 갈바륨용사 도장방식을 채택하는 경우 초기비용은 제 5안보다 3.81억원정도 더 소요되지만 LCC 측면에서는 6억원정도 절감효과가 있음을 알 수 있으며, 제 3안에 비해서는 341.23억원 정도의 큰 절감효과가 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 제 3안의 일반중방식 도장방식은 LCC측면에서 재도장 비용의 구성비가 증가하게 되지만 제 4안의 갈바륨용사 도장방식은 안전수명간의 유지관리비가 절감된 원인임을 알 수 있다.

Table 5에 나타난 바와 같이 강교는 재도장 비용의 구성비가 LCC에 상당히 민감한 변수임을 알 수 있다. 제 3안의 경우 초기비용은 가장 적지만 할인율 5%에 의한 현재가치의 재도장 비용이 216.56억 원(전체 LCC 947.04억원의 22.9%, 유지관리비용 549.80억원의 39.4%)이 되어 LCC 평가에서 6개의 비교대안 중 가장 불리하게 분석되었다. 한편 제 4안의 경우는 소수주형교를 사용하여 갈바륨용사 방식을 채택한 경우로서 안전수명을 확보할 수 있는 재

도장 비용이 LCC에 0.6%(1.07억원)에 불과한 결과를 나타내고 있다. 이와 같이 강교의 부식영향에 따른 안전도 확보를 위하여 도장을 어떠한 방식으로 채택하는가 그리고 어떠한 교량형식을 채택하는가에 따라 전체 LCC에 주는 영향은 크게 변동할 수 있으므로 계획, 설계시 이러한 도장에 대해 보다 장기적인 유지관리의 특성을 고려하여야 함을 알 수 있다.

Fig. 3은 6가지 대안에 대한 연도별 LCC의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 일반중방식 도장을 사용하였을 경우에 대한 연도별 LCC의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 10년 후부터 제 1안 즉, 초기비용에 비해 유지관리비가 적게드는 소수주형 판형교가 경제성이 있음을 보여주고 있다. 한편 갈바륨용사 도장방식을 사용하였을 경우에도 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 초기비용이 비싼 소수주형 판형교가 50년후부터는 구조물의 안전도를 확보하는 범위 내에서 상대적으로 경제성이 있음을 알 수 있다.

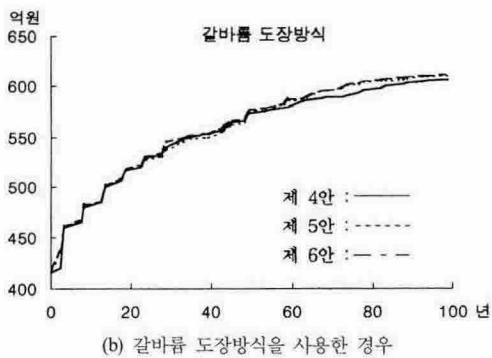
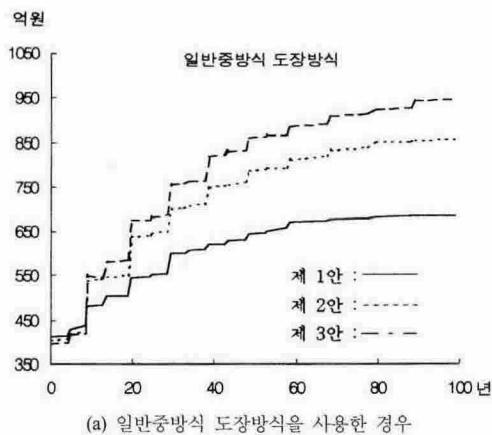


Table 5. LCC of Alternative Designs (Analysis Periods=100 years)  
(단위 : 억원)

대안	LCC (A)	제3안 대비 상대절 감액	초기 비용 (B)	유지관리비용				처리 비용 (E)	
				유지 관리 비용 (C)	재도장비용				
					재도장 비용 (D)	LCC 대비 구성비 (%D/A)	유지관리 비 대비 구성비 (%D/C)		
제1안	686.16	260.88	411.03	274.77	51.74	7.5	18.8	0.36	
제2안	856.97	90.07	404.03	452.73	157.82	18.4	35.9	0.21	
제3안	947.04	-	397.03	549.80	216.56	22.9	39.4	0.20	
제4안	605.81	341.23	416.30	189.14	1.07	0.2	0.6	0.36	
제5안	611.86	335.18	420.11	191.54	3.27	0.5	1.7	0.21	
제6안	610.74	336.30	419.09	191.44	4.49	0.7	2.3	0.20	

Fig. 3. Variation of LCC for Time (discount rate = 5%)

교량형식에 있어 안전수명간 최소비용의 LCC분석결과를 나타내는 소수주형 판형교는 구조의 단순화로 인하여 주형의 표면적, 보강재 및 2차부재의 감소, 브레이싱 및 용접부의 감소 등으로 LCC측면에서 유리한 결과를 나타내고 있다.

#### IV. 결 론

본 연구는 강교의 부식 영향에 따른 안전수명간 LCC분석을 통해 초기비용과 유지관리비의 영향 그리고 구조물형식의 합리화를 평가하였다. LCC분석의 주요항목은 안전상 강도손실이 발생할 수 있는 부식 영향인자를 대상으로 하였으며, 교량형식에 따라 재래적인 방식인 중방식 도장과 신재료인 갈바륨 도장방식의 효과를 검토, 분석하였다.

구조물이 안전도를 확보하는 안전수명간의 LCC분석 결과 그 결론은 다음과 같다.

1) 강교는 안전도를 확보하는 범위의 재도장비용 구성비가 LCC에 대해 0.2%~22.9%, 유지관리비에 대해 0.6%~39.4%로서 상당히 민감한 변수임을 확인할 수 있었다.

2) 부식환경의 비교대상 강교에서, 신재료인 갈바륨용사는 안전수명 기준의 LCC가 605.81억원~611.86억원으로서 일반 중방식 도장의 686.16억원~947.04억원에 비해 11.7%~35.4%의 LCC 저감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

3) 비교대안 중 초기비용이 397.03억원으로서 가장 적게드는 제3안은 구조물 안전유지와 관련한 재도장 면적과 횟수의 과다로 할인율 5%를 적용하였을 때 현재가치의 재도장 비용이 216.56억원으로 LCC(947.04억원)대비 22.9%, 유지관리비(549.80억원)대비 39.4%로 나타나 부식환경에 따른 안전도 확보의 LCC 평가에서 가장 불리하게 분석되었다.

4) 구조물의 수명을 100년으로 하였을 때, 초기 투자비가 과다하더라도 유지관리비가 적게드는 소수주형 판형교가 일반 중방식 도장의 경우는 10년 후부터, 갈바륨용사의 경우는 50년 후부터 구조물 안전도 확보 범위의 LCC가 경제적인 결과로 분석되었다.

5) 해석결과 구조의 단순화로 유지관리비의 절감 효과가 있는 교량형식과 도장방식이 초기비용은 과다하더라도 안전수명간 총 비용은 최소가 되는 LCC분석 결과를 나타내었다. 본 연구의 생애주기비용 분석절차 및 방법은 차후 다양한 기간시설물의

생애주기비용 분석을 위한 기초자료로 활용이 기대된다.

**감사의 글 :** 본 연구는 서울산업대학교의 연구비 지원에 의하여 수행하였으며, 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 건설교통부/시설안전기술공단(2000), 국내외 시설물에 대한 유지관리기술의 동향파악 및 기술 발전방향 설정을 위한 연구, 시설안전기술공단 기술보고서 TS-2000-R5-001, pp. 356-363.
- 2) 김용수, 김훈 (1999), “공공 건설사업 효율화 종합대책에서의 LCC분석,” 시설안전, 1999년 가을호, pp. 48-55.
- 3) 사단법인 한국강구조학회(1998), 고속철도 강합성교량의 적용성에 관한 연구.
- 4) 임종권(1999), 구조수명간 최소기대비용에 기초한 교량의 최적내진안전수준의 결정을 위한 신뢰성해석기법, 한양대학교 박사학위논문.
- 5) Ang, A. H-S., Frangopol, D., Ciampoli, M., Das, P. C., and Kanda, J.(1997b). "Summary of Panel Discussion : Life-Cycle Cost Evaluation and Target Reliability for Design," Proceedings of the 7th International Conference on Structural Safety and Reliability, A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 77-78.
- 6) Chang, S. E. and Shinozuka, M.(1996). "Life-Cycle Cost Analysis with Natural Hazard Risk," Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol. 2, No. 3, pp. 118-126.
- 7) De Brito, J. And Branco, F. A.(1998). Road Bridges Functional Failure Costs And Benefits, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 25, pp. 261-270
- 8) Ehlen, M. A.(1999), BridgeLCC 1.0 Users Manual -Life-Cycle Costing Software for Preliminary Bridge Design, Office of Applied Economics, Building And Fire Research Laboratory, NIST.
- 9) Ehlen, M. A. and Marshall, H. E.(1996), The Economics of New-Technology Materials : A Case Study of FRP Bridge Decking, Office of Applied Economics, NIST.
- 10) Goldbaum, J.(2000), "Life Cycle Cost Analysis State-Of-The-Practice," Final Report Cdott-R1-R-00

- 3, Colorado D.O.T.
- 11) Goodwin, F. E. And Weyers, R.(1999), "Life-Cycle Cost Analysis for Zinc And Other Protective Coatings for Steel Structures, Transportation Research Record 1680, Transportation Research Board, pp. 63-73.
  - 12) Jobes, R. A.(1996), "Evaluation of Unpainted Weathering Steel Bridges In Idaho," Fhwa-Itd-Rp117, Final Report, Federal Highway Administration
  - 13) Leeming, M. B.(1993). "The Application of Life-Cycle Costing to Bridges," Bridge Management 2, Thomas Telford, London, U.K., pp. 574-583.
  - 14) Nishikawa, K.(1997), "A Concept of Minimized Maintenance Bridges," 橋梁と基礎, 97-8月号, pp. 64-72.(In Japanese)
  - 15) Piringer, S.(1993), "Whole-Life Costing of Steel Bridges. Bridge Management 2, Thomas Telford, London, U.K., pp. 584-593.
  - 16) Smith, M. R. And Walls, J.(1998), "Life-Cycle Cost Analysis In Pavement Design-Interim Technical Bulletin," Fhwa-Sa-98-079, Research Report, Federal Highway Administration.