

강철도교의 부식영향에 따른 생애주기비용분석

Life Cycle Cost Analysis of Steel Railroad Bridges Under Corrosive Environment

이종수*, 유선미**, 조선규***, 김만철****

Lee, Jong-soo You, Sun-mi Cho, Sun-Kyu Kim, Man Cheol

Abstract

This paper represents the life-cycle cost(LCC) of steel bridges which are located on the train-network. Corrosion problems are mainly considered in the steel members such as steel plate girder, box girder, truss and arch. Based on the current value, initial construction cost, maintenance cost and demolition cost are calculated and life-cycle costs are formulated for the several types of bridges. From the comparison on each LCC, an effective painting method is recommended for reducing the LCC of steel bridges. Even though the initial cost of Super Weather Resistance Heavy Duty Paintings (Resin Fluoride) is expensive, because of the long endurance, the LCC of steel bridges painted with Super Weather Resistance Heavy Duty Paintings (Resin Fluoride) is less than that painted with General Heavy Duty (Rubber Chloride).

1. 서론

철도교는 활하중에 의한 동적 효과 등에 의해서 다른 구조물에 비해 비교적 빨리 노후화 되기 때문에 교량의 성능, 안전, 비용과 수명에 관한 효과적인 계획, 내구성재료의 선택, 유지관리 단계에서의 개·보수(rehabilitation) 또는 교체(replacement) 등에 대한 최적 의사결정이 매우 중요하다. 따라서 건설에 따른 초기 공사비 뿐만 아니라 구조물의 경제적인 수명 전반에 걸친 생애주기비용적인 관점에서 안전과 경제성이 고려되어야 한다. 그러나 최근까지 국내의 교량건설에 있어서 건설이후의 추가적으로 발생하는 비용보다는 설계, 시공 등의 초기비용에 국한된 비용을 교량 계획에 적용하여 왔다. 이에 본 연구는 강교에서 문제가 되고 있는 부식의 영향에 대한 강철도교에서 안전수명간 생애주기 비용을 분석하였다.

비용항목 분류체계는 초기비용, 유지관리비용, 폐기처리 비용으로 구성하였으며 총기대비용은 현재가치 기준으로 정식화하였다. 해석시 고려된 분석대상교량 형식은 판형교, 강상자형교, 소수주형교, 트러스교, 아치교 등이며, 도장방식은 증방식도장과, 내후성증방식도장 그리고 초내후성증방식도장 방법등으로서 해석결과로부터 강철도교에 대한 효과적인 도장방식을 제안하였다.

* 서울산업대학교 석사과정, 02-460-7017, chongslee@netian.com

** 서울산업대학교 석사과정, 02-970-6512, muzero@msn.com

*** 서울산업대학교, 조교수, 공학박사, 02-970-6512, skcho@snut.ac.kr

**** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 02-3149-3669 kimmc@krrri.re.kr

2. 강철도교의 부식과 도장방식

2.1 강철도교의 부식

강교에 있어서 부식이 발생하면 부재 단면이 감소하여 강도 및 강성이 저하하게 된다. 부식이 진행되고 있는 환경하에서 철도교와 같이 반복응력이 작용하는 경우에는 일반적으로 피로파괴응력보다 낮은 응력에서 파괴되는 부식피로 현상이 발생하게 되는데 이와 같은 부식은 부재의 강도뿐만 아니라 교량 전체의 내하성능을 저하시키기도 한다. 따라서 강철도교량은 주기적인 도장, 보수 등의 유지관리로 교량의 부식에 대한 안전성을 확보하는 것이 중요하다.

2.2 도장방식별 특징

(1) 일반 중방식 도장

일반 중방식 도장은 중,상도가 1액형도료로 작업성이 용이하며, 도막층간의 박리의 위험성이 적다. 그리고 상대적으로 가격이 저렴하며, 보수도장이 용이하다는 장점이 있는 반면 색상 및 광택 보지력이 매우 떨어지고 내구년수가 짧아 유지보수비가 증가하며, 내용제성, 도막강도 및 기타물성이 상대적으로 떨어진 다. 또한 생산 및 도막열화 과정에서 공해물질(염소)의 발생으로 외국에서는 V.O.C 규제대상 도료이며 최근 국내 강교에 적용사례가 축소되고 있는 실정이다.

(2) 내후성 중방식 도장

내후성 중방식 도장은 부착력, 내약품성 및 도료의 기타물성이 우수하며, 색상 보지력 또한 우수하여 다양한 색상과 미려한 외관도막 형성 및 우수한 내후성을 가지고 있다. 그러나 불소사양에 비하여 색상 및 광택 보지능력이 떨어져 장기 무보수 사양으로는 부적합하다. 또한 상도 도장시 습기에 민감하여 도막 박리의 우려가 높으며 2액형 도료로서 1액형 도료에 비하여 작업성이 난이하며 온도에 따라 경화건조시간에 제한이 있다.

(3) 초내후성 중방식 도장

초내후성 중방식 도장은 부착력이 우수하고 강인한 도막을 형성하며 내수성 및 내약품성 등 현존 도료 중 가장 우수한 물성을 가지고 있어 장기 무보수의 사양을 가지고 있다. 또한 다양한 색상을 가지고 있어 외관이 미려하다. 반면에 상대적으로 고가이며 2액형 도료로서 1액형 도료에 비하여 작업성이 난이하고 온도에 따라 경화건조시간 제한이 있다.

3. LCC 분석의 정식화

3.1 비용항목의 분류

LCC 구성항목은 초기투자비용, 관리주체비용, 사용자 비용 및 해체/폐기처리비용 등으로 분류할 수 있다. 이를 좀더 세부적으로 분류하면 그림 1.에 나타난바와 같이 최상위의 Level 1은 비용의 부담 주체가 된다. 즉 비용의 부담주체별로 관리주체비용(agency costs), 사용자비용(user costs) 및 제3집단비용(third-party costs)으로 나눌 수 있다. 비용항목의 두번째 레벨인 Level 2는 구조물의 생애주기동안의 각 단계 즉, 시공

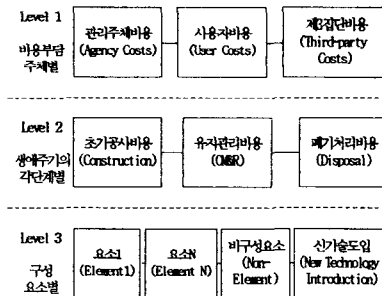


그림 1. LCC 비용분류

(construction costs), 유지관리단계(OM&R costs) 및 폐기처분단계(disposal)로 다시 세분화될 수 있다. 비용항목의 마지막 최하위 레벨인 Level 3는 Level 1 - Level 2에 해당되는 구조물의 구성/비구성 요소별 비용 또는 신기술도입비용 등에 해당되는 보다 구체적인 비용이 될 수 있다. 이때 제3집단 비용은 교량이 차단됨으로서 이용자의 접근이 봉쇄되는 경제적 손실 또는 환경문제 발생으로 인해 피해를 입게되는 환경비용 등의 간접비용으로서 아직 정식화된 모델이 존재하지 않아 고려하지 않았다.

3.2 할인율

할인율의 적용은 LCC 분석시 매우 민감한 요소로 다양한 연구결과에 의해 중요성이 강조된 바 있으며(Leeming,1993 ; Tilly,1997), 본 연구에서는 표 1.에서 보여지는 바와 같이 시설안전관리공단에서 금리자유화가 시작된 이후의 과거 7년 간 (1993~1999) 소비자 물가지수 및 시중은행 일반대출금리를 조사하여 도출한 수치인 실질할인율의 평균값 4.51%를 적용하였다

표 1. 실질 할인율의 변화 추이 (1993-1999)

년도	명목 이자율	소비자 물가지수	인플레이션율	실질 할인율
1993	8.5%	90.1	4.8%	3.58%
1994	9.3%	95.7	6.2%	2.88%
1995	8.8%	100	4.5%	4.07%
1996	9.8%	104.9	4.9%	4.67%
1997	12.6%	109.6	4.5%	7.78%
1998	9.1%	117.8	7.5%	1.47%
1999	7.98%	118.8	0.8%	7.12%
평균	9.44%	105.3	4.74%	4.51%

3.3 LCC 분석의 정식화

본 연구에서는 생애주기비용 분석을 위하여 Ehlen/Marshall이 제안한 NIST 모델을 사용하여 다음과 같이 정식화하였다.

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

여기서, $PVLCC$ = 현재가치의 총기대비용, IC = 초기비용, $PVOMR$ = 유지관리비용, PVD = 처리비용

이때, 현재가치의 총기대비용은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, C_k = k 년에 발생하는 모든 비용(초기비용, 유지관리비용, 처리비용포함)

i = 할인율, N = 생애주기비용 고려시 공용기간

4. 강철도 교량의 도장방식별 LCC분석 및 고찰

4.1 LCC분석 조건

본 연구에서 LCC 분석을 위한 대상 교량은 판형교, 강상자형교, 소수주형교, 트러스교, 아치교 등을 설정하였으며, 각 교량별로 일반중방식도장, 내후성중방식도장, 초내후성중방식도장의 방식을 분석조건으로 설정하였다. 그리고 강교의 물리적 안전수명은 피로, 부식에 의한 요인이 주요 요소이다. 이중 피로에 대

표 2. 도장방식별 도장주기와 비용

도장방식	도장주기 (년)		비 용 (원/m ²)	
	일반환경	부식환경	초기비용	보수비용
일반중방식도장	5	3	13,500	47,250
내후성중방식도장	10	5	14,800	51,800
초내후성중방식도장	15	10	19,200	67,200

하여는 최근 연구가 충분히 이루어져있으며 또한 설계기준에서 엄격하게 규정하고 있으므로 내구수명에 영향을 미치는 인자로서 부식조건을 대상으로 하였다. 이때 부식에 대한 영향은 주기적인 도장으로 그 내구년

한을 100년 정도 보장할 수 있다고 판단할 수 있으므로 본 연구에서는 100년을 기준으로 LCC 분석기간을 설정하였다.

표 2는 각 도장방식별 도장주기와 비용을 환경조건에 따라 나타낸 것으로 LCC 분석 시 적용된 수치이다.

4.2 각교량 형식별 단위수량 및 단가

본 연구에서 신기술 도입비용과 사용자 비용은 고려하지 않았으며, 정기점검비용은 1년에 한번 발생하는 것으로 가정하였으며, 정밀안전진단은 5년에 한번 발생하는 것으로 가정하여 분석을 수행하였다. 다음 표 3은 세부해석 조건으로 각 교량형식에 대한 주요 공종별 단위수량 및 비용을 나타낸 것이다.

(단위:천원)

공종	단위기준 수량	단 위		소수주형교		관형교		트러스교		강상자형교		아치교	
		수량	단가	수량	단가	수량	단가	수량	단가	수량	단가	수량	단가
강재	교량평면 1m ² 당	tonf/m ²	원/tonf	0.46	1,820	0.40	1,850	0.72	1,750	0.52	1,870	0.90	1,720
콘크리트	교량평면 1m ² 당	m ³ /m ²	원/m ³	0.45	50	0.36	50	0.33	50	0.34	50	0.33	50
철근	콘크리트 1m ² 당	tonf/m ³	원/tonf	0.33	560	0.28	560	0.33	560	0.30	560	0.33	560
거푸집	교량평면 1m ² 당	m ² /m ²	원/m ²	1.35	20	1.75	20	1.65	20	0.78	20	1.64	20
동바리	교축방향 1m당	공m ³ /m	원/공m ³	18.50	20	15.20	20	7.50	20	10.40	20	7.45	20
단위도장면적		m ² /tonf		8.0		9.8		11.1		12.5		14.6	

4.3 해석 및 결과고찰

LCC 분석을 위해 Fortran을 이용해 자체 개발한 프로그램을 이용하였다.

그림 2는 도장방식에 의한 각 교량별 LCC 분석 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 각 교량별 초기비용은 그 차이가 크지 않음을 알 수 있으나 총 비용은 각 도장방식과 환경조건별로 그 차이가 현저히 나타남을 알 수 있다.

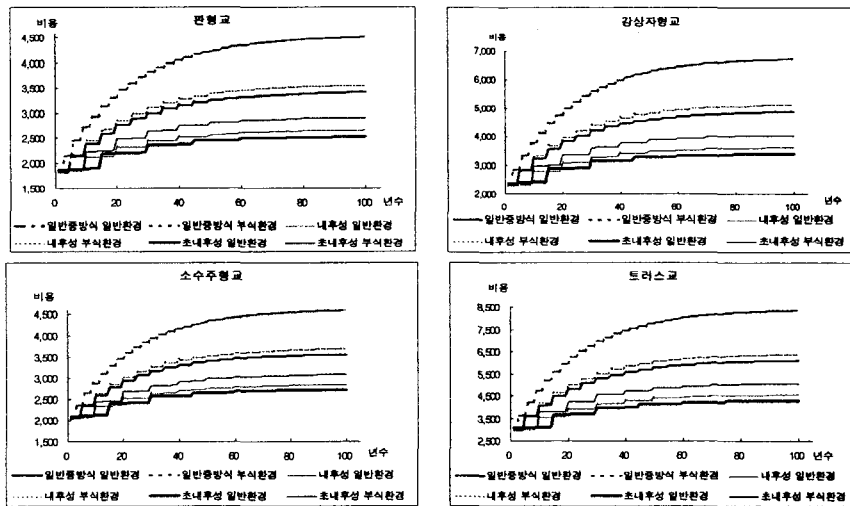


그림 2. 교량별 도장방식에 따른 LCC

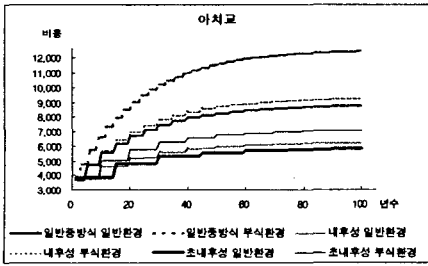


그림 2. 교량별 도장방식에 따른 LCC(계속)

보이고 있다. 또한 일반 중방식 도장방식보다 내후성 중방식 도장방식의 경사가 완만하며 이보다 초내후성 중방식 도장방식에서의 경사가 더 완만함을 나타내고 있는데 이는 초기도장비용이 고가이더라도 보수도장 주기가 길기 때문에 LCC비용에 있어 초내후성 중방식 도장방식이 더 경제적인을 나타내는 결과이다. 표 5. 는 초기비용에 대한 초기도장비용 증가에 따른 LCC 증가율을 나타낸 것이다.

표 4. LCC 분석결과

구분	판형교				아치교			
	초기비		생애주기총비용		초기비		생애주기총비용	
	①	②	①	②	①	②	①	②
일반환경	1.01	1.02	0.78	0.74	1.01	1.04	0.71	0.66
부식환경	1.01	1.02	0.79	0.64	1.01	1.04	0.74	0.57

- ① : $\frac{\text{내후성 중방식 도장}}{\text{일반 중방식 도장}}$
 ② : $\frac{\text{초내후성 중방식 도장}}{\text{일반 중방식 도장}}$

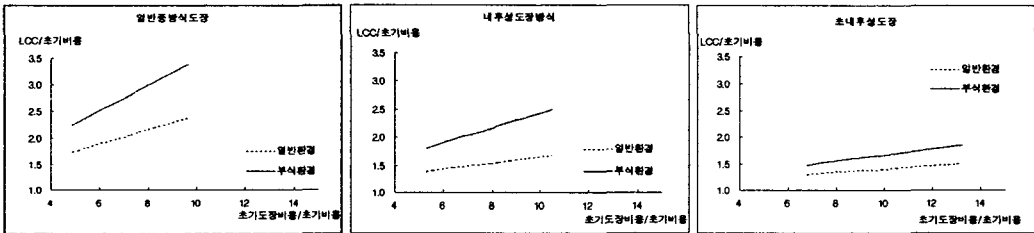


그림 3. 도장비용에 대한 LCC

5. 결론

본 연구는 강철도교에서의 부식의 영향에 대한 각 교량별 효과적인 도장방식을 제안하고자 하였으며 이를 위해 대상 교량별로 일반 중방식도장, 내후성 중방식도장, 초내후성 중방식도장 등으로 LCC분석을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 초기비가 일반 중방식 도장보다 상대적으로 고가인 내후성 중방식 도장과 초내후성 중방식 도장이 일정기간 경과 후에는 일반중방식 도장에 비해 총비용이 오히려 경제적으로 나타났으며 시간의 경과에 따라 그 차이가 더욱 커짐을 알 수 있었다.

(2) 초기비용에 대한 초기도장 비용이 클수록 초기비용에 대한 LCC 비용은 증가하게되는데 증가율은 일

표 5 초기도장비용 증가에 따른 LCC 증가율

구분	일반환경	부식환경
일반 중방식도장	0.194	0.239
내후성 중방식도장	0.057	0.134
초내후성 중방식도장	0.033	0.058

반환경과 부식환경에서 모두 직선적으로 변화함을 알 수 있었다. 이때 증가율은 일반환경에 비해서 부식환경이 더욱 크게 나타나며, 도장방식별로는 초내후성 중방식 도장이 가장 완만하고, 일반 중방식 도장이 가장 큰 변화율을 보여주고 있다.

(3) 해석결과 LCC 분석을 수행한 모든 교량에서 도장방식에 따른 초기비용이 고가이더라도 보수도장주기가 길게되면 생애주기 비용은 경제적이 됨을 알 수 있었으며, 이러한 현상은 보수도장주기가 짧은 부식환경에서 더욱 두드러지게 나타났다.

참고문헌

- (1) 건설교통부/시설안전기술공단 (2000), 국내외 시설물에 대한 유지관리기술의 동향파악 및 기술발전방향 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) 조선규, 한상철, 김은겸 (2002), "강교의 도장방식에 따른 안전수명간 생애주기비용분석" 한국산업안전진단학회
- (6) 경갑수, 이준석, 최일윤, 홍성욱(2002), "국내 강철도교의 열화손상 사례분석", 한국강구조학회 학술발표회 논문집, pp. 32-40
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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
- (10) 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.
- (11) 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
- (12) Goldbaum, J. (2000), "Life Cycle Cost Analysis State-Of-The-Practice", Final Report Cdot-R1-R-00-3, Colorado D.O.T.
- (13) 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.
- (14) Jobs, R. A. (1996), "Evaluation of Unpainted Weathering Steel Bridges In Idaho", Fhwa-ItD-Rp117, Final Report, Federal Highway Administration
- (15) Leeming, M. B. (1993). "The Application of Life Cycle Costing to Bridges", Bridge Management 2, Thomas Telford, London, U.K., pp. 574-583.
- (16) Nishikawa, K. (1997), "A Concept of Minimized Maintenance Bridges", 橋梁と基礎, 97-8月号, pp. 64-72. (In Japanese)
- (17) Piringer, S. (1993), "Whole-Life Costing of Steel Bridges. Bridge Management 2, Thomas Telford, London, U.K., pp. 584-593.