

고속철도 강교량의 총기대비용 최적설계

Optimum Life Cycle Cost Design of High-Speed Railway Steel Bridges

조효남* 민대홍** 조준석***

Cho, Hyo-Nam Min, Dae-Hong Cho, Jun-Seok

ABSTRACT

In this paper, an optimum design model for minimizing the life-cycle cost (LCC) of high-speed railway steel bridges is proposed. The point is that it takes into account service life process as a whole, and thus the life-cycle costs include initial (design, testing, and construction) costs, maintenance costs, expected strength failure costs and expected serviceability failure costs. The problem is formulated as that of minimization of expected total life-cycle cost with respect to the design variables. By processing the optimum LCC design the effective and rational basis is proposed for calculating the total LCC and the sensitivity analysis of LCC is performed. Based on a numerical example, it may be positively stated that the optimum LCC design of high-speed railway steel bridges proposed in this study provides a lot more rational and economical design, and thus the proposed approach will expedite the development of new concepts and design methodologies that may have important implications in the next generation performance-based design codes and standards.

1. 서 론

근래까지는 일반적인 도로교량에 대한 건설계획을 세울 때에 건설이후에 수반되는 중·장기적인 추가비용보다는 설계 및 건설 등의 초기비용에 국한해서 고려하는 경우가 많았다. 그러나 고속철도 교량과 같이 건설비용뿐만 아니라 장기적인 유지관리가 매우 중요한 구조물에 대해 초기비용 이외에도 교량의 유지관리, 교통의 원활한 소통 또는 적체 등에 따른 비용, 교량의 손상에 따른 보수보강 및 교량의 해체·재건설 등 추가적인 비용에 대한 이해가 날로 커지고 있으며 이러한 일련의 공동안 총기대비용(Life Cycle Cost : LCC)을 설계단계에서부터 체계적이고 합리적으로 고려하고 있는 추세이다. 본 연구의 목적은 고속철도 강교량의 전 공용과정의 초기비용(설계비용, 개통전 검증재하시험비용, 건설비용) 및 유지보수비용과 기대파괴비용 등을 포함하는 LCC에 근거한 최적의 비용함수모형을 이용하여 고속철도 강교의 최적설계에 적용·분석하는 것이다. 즉 LCC에 근거하여 설계기준을 결정하기 위한 모델과 방법을 제시하고, 이를 각기 다른 파괴비용 적용비율에 따라 최적설계를 수행함으로써 최적의 LCC를 제시하며, 구조물 파괴비용에 관한 민감도 분석을 통하여 효율적이고 합리적인 비용산정의 근거를 제시하고자 한다. 고속철도 강교의 기대파괴비용을 결정하는 파괴확률을 구하기 위한 체계 신뢰성 기법으로는 Ditlevsen 구간해법을 이용하여 극한강도 한계상태 파괴확률을 구하였고, 여기에 교량의 전 공동안 파괴비용을 예측·적용함으로써, 구조물의 LCC를 설계단계에서 효율적으로 최소화하는 모형을 제시하고자 한다.

* 정회원 · 한양대학교 토목 · 환경공학과 교수

** 학생회원 · 한양대학교 토목 · 환경공학과 박사과정

*** 한양대학교 토목 · 환경공학과 석사과정

2. 고속철도 강교의 LCC 최적설계 문제의 정식화

2.1 설계변수

고속철도 강교의 구조요소에는 주형, 바닥판, 가로보 등이 있다. 이 중에서 바닥판과 가로보는 국부적인 하중에 지배적이며, 주형은 시스템해석을 통해서 설계되어지고 상부구조 공비에 지배적인 요소이다. 따라서, 본 연구에서는 가장 지배적인 구조요소인 주형에 대해서 설계변수를 취하였으며 기타 부재는 설계 상수로 정하였다. 주형의 설계변수는 그림 1과 같이 변단면을 고려한 고속철도 강교의 상부구조 건설공비에 직접영향을 주는 플랜지와 웨브의 두께, 폭 및 높이를 설계변수로 정하였다.

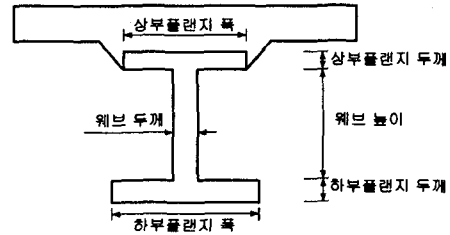


그림 1. 주형의 설계변수

2.2 목적함수

구조물의 설계에 있어 비용해석에 관계된 결과값들이 비용의 가치항으로 표현될 때 기대비용이라 할 수 있으며, 이러한 LCC를 최소화하는 것이 바람직하다[Melchers, 1987]. 따라서, LCC 최적설계를 위해 공용간 총기대비용(Expected Total LCC)을 최소화하기 위한 비용함수는 이러한 모든 사항을 고려하여야 하나 본 연구에서는 안전에 가장 지배적인 극한강도에 대한 파괴기대비용, 고속으로 주행하는 열차에 의한 동적처짐에 대한 사용성에 대한 보강기대비용, 유지관리비용 그리고 초기비용에 국한하여 식 (1)과 같은 목적함수로 정식화하였다.

$$C_T = C_I + C_M + P_{fu}C_{fu} + P_B C_B \quad (1)$$

여기서,

C_T = 총기대비용(LCC), C_I = 초기비용, C_M = 유지관리비용

C_{fu}, C_B = 극한강도 파괴비용, 동적처짐에 의한 사용성 보강비용

P_{fu}, P_B = 극한강도 시스템 파괴확률, 동적처짐에 의한 사용성 보강확률

교량설계시 고려할 수 있는 초기비용(C_I)은 구조물 파괴확률에 직접적으로 영향을 주는 주형건설비용만 고려하여 정식화하였다. 또한 교량의 공용간 한계상태로 모형화한 파괴확률(P_{fu}, P_B)과 한계상태에 따른 교량의 파괴 및 교체비용, 인명손실, 기능손실, 사회적 손실 등 교량의 환경과 조건에 적합한 기대비용을 평가하여 파괴비용(C_{fu}, C_B)을 산출한다[Koskito & Ellingwood, 1997]. 교량의 유지관리비용(C_M)은 국내의 교량의 건설계획 시 검토한 경제성분석 보고서 자료와 적용대상교량에 적합한 사례 등을 참조하여 산출하면 되지만[시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령, 1995]에 따라 초기비용의 10%로 정식화하였다.

2.3 한계상태 모형

LCC 함수에 정의된 구조물의 파괴확률을 고려하기 위하여 각 구조요소의 극한 한계상태모형을 휨모멘트에 의한 플랜지의 파괴와 전단력에 의한 웨브의 파괴로 정의하였다. 전체구조시스템 파괴확률을 구하기 위하여 각각의 요소파괴확률을 직·병렬시스템으로 정의하고, 구조물의 일부 또는 전체가 구조적 파손을 일으키는 극한강도 한계상태모형을 제안하였다. 휨모멘트 및 전단을 고려한 각각의 파괴모드에 대한 한계상태함수를 식(2),

(3)과 같이 선형한계상태함수로 정의하였다. 열차가 고속으로 주행할 때 발생하는 동적처짐에 대한 사용성 한계 상태모형은 식(4)와 같이 정의하였다.

$$g(\cdot) = \sigma_{MR} - (\sigma_{MD} + \sigma_{ML}) \quad (2)$$

$$g(\cdot) = \tau_{SR} - (\tau_{SD} + \tau_{SL}) \quad (3)$$

$$g(\cdot) = \delta_{all} - \delta_d \quad (4)$$

여기서,

σ_{MR} : 실공칭 휨응력, τ_{SR} : 실공칭 전단응력

σ_{MD}, σ_{ML} : 실작용 사하중/활하중에 의한 휨응력

τ_{SD}, τ_{SL} : 실작용 사하중/활하중에 의한 전단응력

δ_{all} : 동적 허용처짐(L/1700)

δ_d : 주행 열차에 의한 동적처짐(열차속도: 350Km/h)

2.4 제약조건

고속철도 강교의 최적설계에 사용되는 제약조건은 거동에 대하여 실무에서 주로 사용하는 허용응력설계법 (ASD)에 의한 제약조건으로 식 (5),(6),(7),(8),(9),(10)과 같이 정식화하였고 각각의 하중조합에 대해 변단면마다 아래의 제약조건을 고려하였다.

$$g_1 = \sigma_{upper} - \sigma_{sa} \leq 0 \quad (5)$$

$$g_2 = \sigma_{lower} - \sigma_{sa} \leq 0 \quad (6)$$

$$g_3 = \tau_s - \tau_{sa} \leq 0 \quad (7)$$

$$g_4 = \left(\frac{\sigma_{upper}}{\sigma_{sa}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sa}} \right)^2 \leq 1.2 \quad (8)$$

$$g_5 = \left(\frac{\sigma_{lower}}{\sigma_{sa}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sa}} \right)^2 \leq 1.2 \quad (9)$$

$$g_6 = \left(\frac{\delta}{L} \right) - \left(\frac{1}{1,700} \right)^2 \leq 0 \quad (10)$$

여기서,

하중조합1 = 합성전 사하중

하중조합2 = 합성전 사하중 + 합성후 사 · 활하중

하중조합3 = 합성전 사하중 + 합성후 사 · 활하중 + 크리이프하중

하중조합4 = 합성전 사하중 + 합성후 사 · 활하중 + 크리이프하중 + 건조수축하중

하중조합5 = 합성전 사하중 + 합성후 사 · 활하중 + 크리이프하중 + 온도차하중

하중조합6 = 합성전 사하중 + 합성후 사 · 활하중 + 크리이프하중 - 온도차하중

3. 신뢰성 해석 및 최적화 방법

3.1 신뢰성 해석

본 연구에서는 제안한 한계상태함수의 요소신뢰성해석을 위하여, 랜덤변수의 추정, 평균과 분산 또는 공분산에 의해 표준화된 공간에서 파괴면 경계역까지의 최소거리인 신뢰성지수 β 를 구하는 개선된 1계2차 모멘트법

(AFOSM)을 사용하였다. 또한 요소신뢰성 해석결과를 이용해 교량의 주요요소의 파괴모드로 구성된 직·병렬 시스템 해석시, 대상 교량의 파괴확률을 산정하기 위하여 Ditlevsen 구간해법을 적용하였다. 그림 2는 본 연구에서 적용된 2경간 연속보 경우의 파괴메카니즘과 직·병렬시스템 모델을 보여주고 있다.

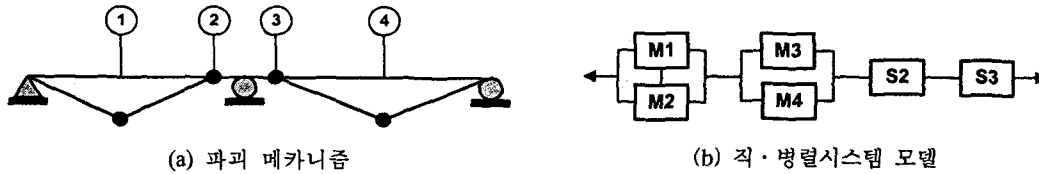


그림 2. 체계 신뢰성 해석모델

3.2 최적화 기법

최적설계에 사용된 최적화 방법은 ALM(Augmented Lagrange Method)을 이용하였고 무제약 최소화기법으로는 Variable Metric중 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno)방법을 사용하였으며 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 최적화에 사용된 프로그램은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS(Automated Design Synthesis) [G. N. Vanderplaats, 1985]를 이용하여 수행하였다.

4. 적용에 및 고찰

4.1 대상구조물의 일반사항

본 연구에서 제안한 LCC 함수와 허용응력설계 시방기준에 의해 정식화된 제약조건을 이용하여 고속철도 강교의 비용최적설계를 수행하였다. 이를 위하여 실제적인 2경간 연속 고속철도 강교를 선정하였으며 지점부는 영향선을 고려하여 2개의 변단면을 갖도록 설계하였다. 대상교량의 일반사항과 사용재료는 표 1, 2에 나타내었고 대표적인 횡단면도와 종단면도를 각각 그림 3, 4에 제시하였다.

표 1. 대상구조물의 일반사항

교량형식	형식	2경간 연속 합성판형교 (복선형)
	지간	40m+40m
	폭	14.0m
	차축간격	5.0m
설계하중		HL 표준열차하중

표 2. 대상구조물의 사용재료

강재 (주부재)	사용강재	SM520
	항복응력(kg/cm ²)	3,500
	허용인장응력(kg/cm ²)	2,000
	허용전단응력(kg/cm ²)	1,200
	탄성계수(kg/cm ²)	2.1×10 ⁶

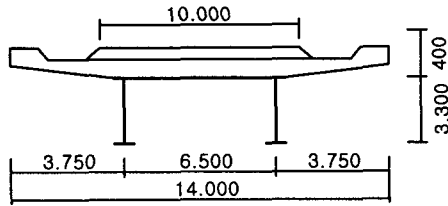


그림 3. 횡단면도

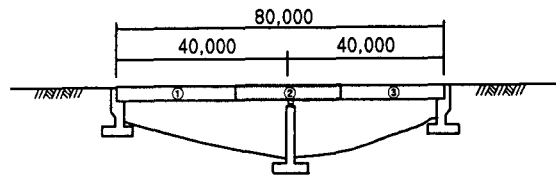


그림 4. 종단면도

4.2 설계변수 및 단위경비

최적설계를 위하여 본 예제에 적용된 연속 판형교의 설계변수는 변단면을 고려하여 각각의 상·하 플랜지의 두께 및 폭, 웨브의 두께 및 높이로 선정하였고, 설계상수는 바닥판의 폭으로 선정하였다. 또한 실무에서 적용할 수 있기 위해서는 이산화변수로 적용하여야 하나, 본 연구에서는 LCC 최적설계를 통한 파괴비용의 민감도를 분석하는 것이 목적이므로 연속화변수를 적용하였다.

상부구조의 초기비용은 물가산출기준[1999]을 참고로 주형의 건설비용만 고려하여 산정하였고, 파괴비용 산정시 적용된 비용계수는 교량의 파괴에 따른 파급효과 및 손실 등에 관계된 비용과 초기비용 및 파괴확률에 미치는 영향을 고려하여 초기건설비용의 비례계수를 적용하여 산정하였다.[Brito & Branco, 1995 ; Koskito & Ellignwood, 1997 ; Frangopol et al., 1997].

4.3 통계적 불확실량

본 연구에서 체계신뢰성해석을 수행하기 위한 통계적 불확실량은 표 3, 4, 5에 나타낸 바와 같다. 그러나 재료 강도와 하중변수를 제외하고는 불확실량의 본질적인 특성이나 관련 데이터의 부족으로 인하여 국내·외의 관련 연구[Ellingwood, 1980; Cho, 1989; Hart, 1982]를 참조하였고, 주로 경험과 판단에 의존하여 국내의 현실을 고려하는 값으로 추정하였다.

그리고 체계 신뢰성해석을 수행하기 위한 통계적 불확실량은 저항의 경우 평균공칭비는 1.1, COV는 0.12, 분포형은 Normal분포이며, 사하중의 경우 평균공칭비는 1.05, COV는 0.1, 분포형은 Normal분포이고 활하중의 경우 평균공칭비는 1.24, COV는 0.25, 분포형은 Lognormal분포로 가정하였다.

5. 결론

본 논문에서는 고속철도 강교량의 LCC최적설계 모형을 제안하였으며 실질적인 적용대상구조물을 선정하였다. 현재 파괴비용의 변화에 따른 수치해석과 다양한 결과의 분석이 진행중이며, 이러한 수치해석이 성공적으로 수행되었을 경우 제안한 LCC최적설계모형의 적합성 및 효율성을 검증하고 차세대 설계법으로서의 향후 연구 과제를 제시할 것이다.

참고문헌

1. Ang, A. H-S. and Tang, W.H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design," Vol. I & II, John Wiley, 1984.
2. Cho, H. N., Ang, A. H-S., "Reliability Assessment And Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges," 5th International Conference on Sturctural Safety and Reliability, pp2235-2238, 1989.

3. de Brito J. and Branco F. A., "Bridge Management Policy using cost analysis," Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 104, Nov., 431-439, 1995.
4. Ellingwood, B., Galambos, T. V., Macgregor, J. C., and Cornell, C.A., "Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58," National Bureau of Standard SP-577, Washington, D.C., 1980.
5. Frangopol, D. M., Lin, K. Y., "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures," J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 10, 1997.
6. Garret N. Vanderplaats, "ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis," Engineering Design Optimization, Inc, Santa Barbara, California, 1985.
7. Hart, G. C., "Uncertainty Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering," Prentice-Hall, 1982.
8. Koskito, O. J., Ellingwood, B. R., "Reliability-Based Optimization of Plant Precast Concrete Structures," J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997.
9. Melchers, R. E., "Structural Reliability, Analysis and Prediction," Ellis Horwood Ltd., West Sussex, England, 1987.
10. Vanderplaats, Garret. N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design," McGraw-Hill, 1984.
11. 건설교통부, "도로교표준시방서," 1996.
12. 시설물 "안전관리에 관한 특별법 시행령," 1995
13. 조효남, 이두화, 정지승, 민대홍, "신뢰성에 기초한 강상형 연속교의 단면 최적설계," 대학토목학회 논문집, 1999.
14. 조효남, "강상형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb)개발 1차년도 보고서," 1998.
15. 조효남, 민대홍, 김구선 "강상형교의 최적 Life Cycle Cost 설계," 전산구조학회 가을 학술발표회 논문집, 1998.
16. 철강엔지니어링센터, "고속철도 강합성교량의 적용성에 관한 연구," 1998