

기대생애주기비용에 기초한 고속철도교량의 신뢰성-최적설계 방안

Reliability-Optimal Design Method of High-Speed Railway Bridges Based upon Expected Life-Cycle Cost

이 우 상¹⁾

Lee, Woo Sang

방 명 석²⁾

Bang, Myung Seok

한 성 호³⁾

Han, Sung Ho

이 진 옥^{4)*}

Lee, Chin Ok

Abstract

The reliability evaluation may be a efficient method for estimating of the quantitative structural safety considering the effect of uncertainties included in high-speed railway bridges. The expected life-cycle cost(LCC) based upon the reliability evaluation will reasonably offer the safety level and design criteria of high-speed railway bridges. Therefore, this study determined the expected life-cycle cost and optimal design method of high-speed railway bridges on the basis of the result of the numerical analysis and reliability evaluation. For this, after creating various design method based upon the standard design of high-speed railway bridges, the numerical analysis is conducted on each of the alternative design methods. The reliability evaluation by the design strength limit state function is conducted considering the effect of external uncertainties on the basis of the numerical analysis result. The expected life-cycle cost of high-speed railway bridges is calculated on the basis of the reliability evaluation result by each of the alternative design methods. Also, the optimal design method is determined using the calculated expected life-cycle cost. In addition, The result of reliability evaluation and expected life-cycle cost of optimal design method are examined considering the effect of internal uncertainties. It is expected that the result of this study can be used as a basic information for the systematic safety evaluation and optimal structure design of high-speed railway bridges.

Keywords : High-Speed Railway Bridges, Reliability Assessment, Design Strength Limit State Function, Safety Level, Expected Life-Cycle Cost, Optimal Design

1. 서론

고속철도교량의 유지보수 및 전면통제에 따른 사회간접비용은 도로교량에 비해 규모가 비교도 안될 만큼 상당할 것으로 예상된다. 따라서 고속철도 도입과 더불어 활성화된 고속철도교량에 관한 체계적인 연구 및 실험뿐만 아니라 건설계획단계부터 유지관리 및 사회간접비용을 적절히 고려한 설계방안이 필요하다. 최근, 생애주기비용에 기초하여 고속철도교량의 최적설계에 관한 연구가 수행되고 있으며, 이는 경제성 및 안전성을 동시에 합리적으로 고려할 수 있는 수단인 것으로 평가되고 있다(조중연 등, 2007; 조효남 등, 2001). 그러나 고속철도교량의 생애주기비용에 지배적인 영향을 미치는 유지보수 및 사회간접비용의 산정방법은 도로교량에 비해 상당히 복잡하며, 비용항목 체계도 매우 다양하다. 따라서 방대한 자

료의 수집 및 분석과 더불어 심도 있는 다양한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 한편, 신뢰성평가 방법은 확률변수의 불확실성을 고려하여 안전성을 검토할 수 있는 합리적인 방안이며, 확률변수의 불확실성은 형태별로 구분하여 적용하는 것이 중요한 것으로 제시되었다(Ang, 2006; Ang 등, 2007; Han 등, 2008). 또한 신뢰성평가 결과에 기초한 기대생애주기비용은 최적설계 방안을 위한 합리적인 기초자료를 제공하는 것으로 평가되었다(Frangopol 등, 1997; Koskito 등, 1997). 이 연구의 목적은 Fig. 1에 제시된 것과 같이 시계열하중을 고려한 고속철도교량의 수치해석 결과를 토대로 신뢰성평가를 수행하여 정량적 구조안전성을 검토하고자 한다. 또한 기대생애주기비용을 바탕으로 최적설계 방안 결정을 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 수치해석은 고속철도교량의 표준설계(현 상태의 설계)를 바탕으로 단면증감에

1) 정희원, 한국스마트구조시스템연구원 공학박사

2) 정희원, 충주대학교 교수

3) 정희원, 충남대학교 토목공학과 공학박사

4) 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : coleec@cnu.ac.kr 042-821-5672

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

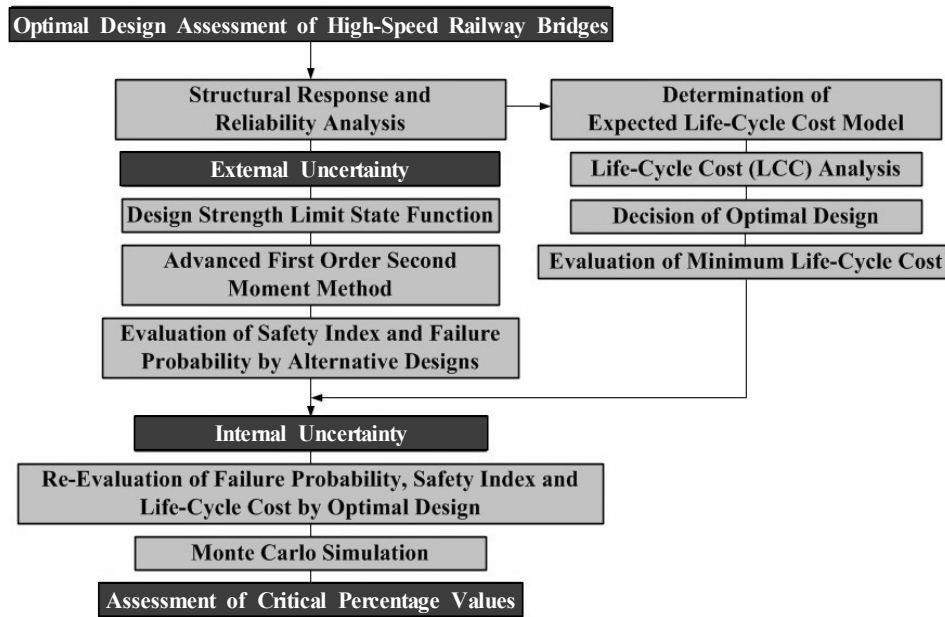


Fig. 1 Optimal Expected Life-Cycle Cost Design of High-Speed Railway Bridges

따른 다양한 설계방안에 대해 수행하였다. 각각의 설계방안에 대해 신뢰성평가는 수치해석결과에 포함된 외적 불확실성의 영향을 고려하여 평가하였다. 또한 신뢰성평가 결과를 바탕으로 고속철도교량의 기대생애주기비용 검토 및 이에 따른 최적설계 방안을 결정하였다. 아울러 내적 불확실성의 영향을 고려하여 최적설계 방안의 주요 결과(안전지수, 파괴확률 및 기대생애주기비용)를 평가하였다.

2. 기대생애주기비용 및 불확실성

구조물의 설계목표는 기대생애주기 동안 충분한 안전성을 확보하면서 총투자비용을 최소화시키는 것이다. 이러한 관점에서 식(1)과 같은 기대생애주기비용에 대한 개념은 사회간접시설의 최적설계 방안을 결정하기 위해 다양하게 활용되고 있다(조효남 등 2008). 이 연구에서는 기대생애주기비용을 바탕으로 고속철도교량의 안전수준 및 경제성을 합리적으로 평가하였다.

$$E(LCC) = C_{ICT} + C_{MCT} + C_{DCT} \quad (1)$$

여기서, $E(LCC)$ = 고속철도교량의 기대생애주기비용

C_{ICT} = 고속철도교량의 초기비용

C_{MCT} = 공용수명 기간 동안의 유지관리비용

C_{DCT} = 공용수명 기간 동안의 손상비용

기대생애주기비용의 구성요소인 유지관리비용의 경우, 이론적이나 논리적으로 결정하는 것은 불가능하다. 따라서 기존의 유지관리비용 투자실적을 분석하거나, 필요한

경우에는 회기분석(Regression Analysis)을 수행하여 추정해야 한다. 이 연구의 경우, 표준설계의 유지관리비용은 초기비용의 10%를 적용하였으며, 각각의 설계방안에 대한 유지관리비용은 안전진단보고서, 유지관리 보수 비용 실적 등을 기초로 초기비용의 증감에 따라 반비례관계를 이용하여 가정하였다. 기대생애주기비용의 개요는 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다. 일반적으로 총기대생애주기비용(Fig. 2(c))은 초기비용(Fig. 2(a)), 유지관리비용 및 손상비용(Fig. 2(b))의 합으로 을 산정할 수 있다. 안전수준을 높게 설정하면 초기비용이 증가하나 공용기간 동안의 유지관리 및 손상비용은 감소하게 되는 반면, 낮은 안전수준을 설정할 경우, 초기비용은 감소되나 유지관리 및 손상비용의 증가를 초래할 수 있다. 즉, 안전수준이 증가함에 따라서 초기비용의 변화율은 크게 증가하고, 유지관리비용 및 손상비용의 변화율은 급속히 감소한다. 최적의 안전수준은 유지관리비용을 포함한 총기대생애주기비용이 최소가 될 때의 수준을 의미한다. Fig. 3은 유지관리비용 및 Fig. 2에 제시된 비용항목별 구성요소를 정리한 것이다. 한편, 기대생애주기비용에 큰 영향을 미치는 하중, 구조물의 성능 및 각종 비용항목에는 피할 수 없는 불확실성이 포함되어 있다. 불확실성은 구조물에 내재된 불확실성 및 인간의 불완전성에 기인한 불확실성의 형태로 구분할 수 있다. 구조물에 포함된 불확실성은 설계인자 자체에 포함되어 있는 불확실성이며, 인간의 불확실성은 설계, 시공 및 유지관리에서 발생하는 불확실성이다(Han 등, 2008; Ang, 2004). 이러한 불확실성은 구조물의 파괴확률을 증가시키며, 안전수준을 저하시키는 주요 요인이 된다. 최소생애주기비용은 기대생애주기비용의 최적화

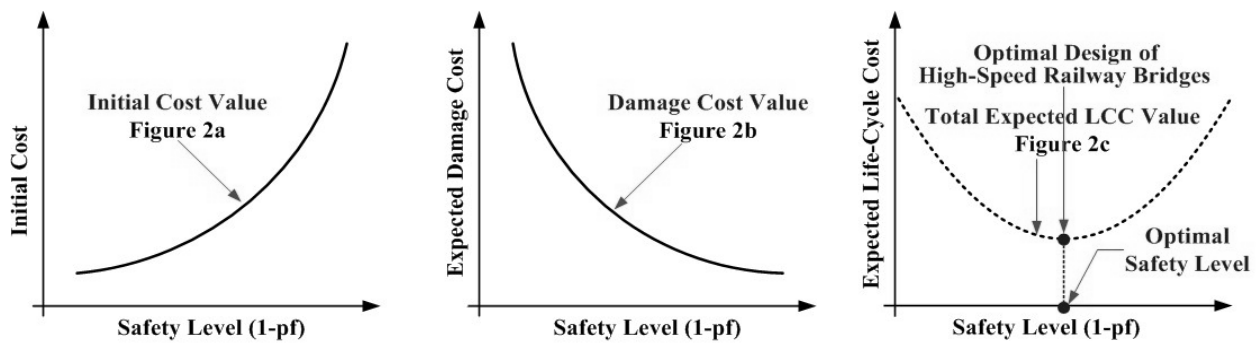


Fig. 2 Concept of Expected Life-Cycle Cost for Optimal Design of High-Speed Railway Bridges



Fig. 3 Components of Total Expected Life-Cycle Cost

과정을 통하여 결정할 수 있다. 그러나 일반적으로 구조 설계는 하중 및 성능을 보수적으로 평가하는 경향이 있다. 즉, 안전수준 및 위험성은 실제보다 큰 목표치를 고려하여 구조설계를 수행하고 있다. 따라서 이 연구에서는 최소생애주기비용의 주요 분포양상을 검토하였으며, 이에 따른 안전수준을 평가하였다.

3. 수치해석

3.1 구조형식 및 모델특성

고속철도교량은 전형적인 2경간 연속 PSC Box Girder 교량을 선정하였다. Table 1은 고속철도교량의 구조형식 및 모델특성을 정리한 것이다. Fig. 4는 고속철도교량의 단면도를 도시한 것이며, KTX(Korea Train eXpress)의 축하중은 관련문헌을 참고하여 적용하였다(한국고속철도공단, 2003). 최적설계를 결정하기 위해, 표준설계를 기준으로 단면을 증감시켜 다양한 설계방안을 설정하였

Table 1 Structural Type of a High-Speed Railway Bridge

Structural Type	2 Span Continuous Bridge (Double Lines System)
Span Lengths	40m+40m=80m
Girder Depth	3.5m
Width of Bridge	14.0m

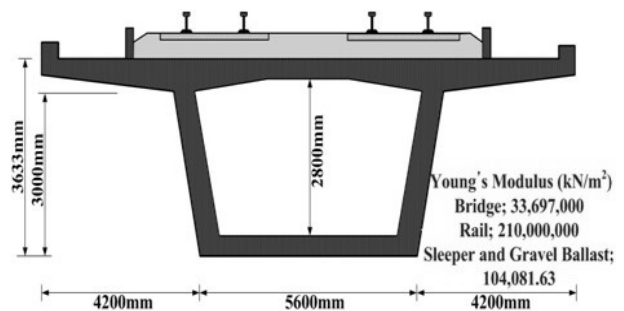


Fig. 4 Cross Section of a High-Speed Railway Bridge

다. 각각의 설계방안에 따른 수치해석은 상용 프로그램 (MIDAS CIVIL V7.2.0)을 이용하였다. 침목, 도상자갈 및 체결구는 Elastic Link 요소를 적용하였으며, 전체 수치해석 모델은 관련연구의 모델링 방법을 이용하였다(송창혁, 2008).

3.2 수치해석결과

Table 2는 고속철도교량의 고유진동수 및 감쇠비를 정리한 것으로, 이 연구에서는 시간이력해석 수행 시, 20개의 모드형상을 고려하였다(한국고속철도공단, 2003; 송창혁, 2008). KTX의 속도별 정적해석 및 시간이력해석을 수행하기 위한 조건은 다음과 같이 기술할 수 있다. 첫째, KTX의 축하중(170.0kN)은 순차적 이동을 통해 최대 수직처짐(Maximum Vertical Deflection: MVD) 및 휨모멘트(Maximum Bending Moment: MBM)가 발생하도록 상·하연 2개의 레일에 각각 85kN의 차량하중으로 정의하였다. 둘째, Check Point #1, #2(경간중앙 레일 하부)의 수치해석 결과를 검토하였다. 셋째, 수치해석

Table 2 Natural Frequency and Damping Ratio of a High-Speed Railway Bridge

Mode No.	Rad/Sec	Hertz	Damping Ratio
1	25.56586	4.068933	0.02400
2	37.15443	5.913312	0.02401
3	38.28179	6.092736	0.02414
4	46.82113	7.451814	0.02568
5	74.46202	11.85100	0.03337
6	78.17260	12.46458	0.03461
7	79.12776	12.59357	0.03487
8	88.13934	14.02781	0.03785
9	96.78518	15.40384	0.04079
10	102.3104	16.28321	0.04270

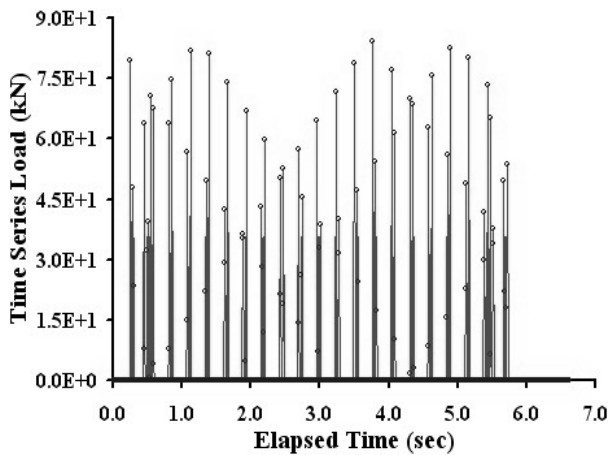


Fig. 5 Time Series Load for Time History Analysis

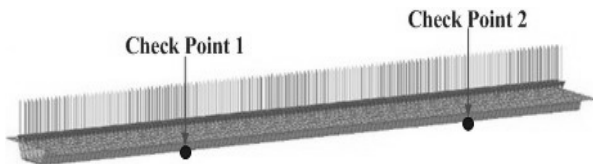


Fig. 6 Loading Node Distance and Check Point

시간은 KTX의 통과시간의 2배를 고려하였다. 넷째, 시간 증분(Fig. 5)과 하중재하 절점간격(Fig. 6)은 수치해석 결과의 정확성을 위해 각각 0.01초 및 0.6m를 동일하게 고려하였다. 다섯째, KTX의 이동하중은 속도변화에 따른 시계열하중(Time Series Load)으로 변환하여 적용하였다(한성호 등, 2009). 정적해석에 의한 Check Point #1, #2의 최대 수직처짐은 각각 3.008mm와 3.152mm로 평가되었다.

고속철도교량의 이론적 공진(Resonance) 예상속도는 약 273.93km/h로 검토되었다(한성호 등, 2009; 대한토목학회, 2004). 따라서 공진 예상속도 구간의 시간이력 해석은 KTX의 속도변화를 세분화(10km/h 증가)하여 수행하였다. Fig. 7은 시간이력해석에 따른 표준설계의 최대 수직처짐 및 휨모멘트를 도시한 것이다.

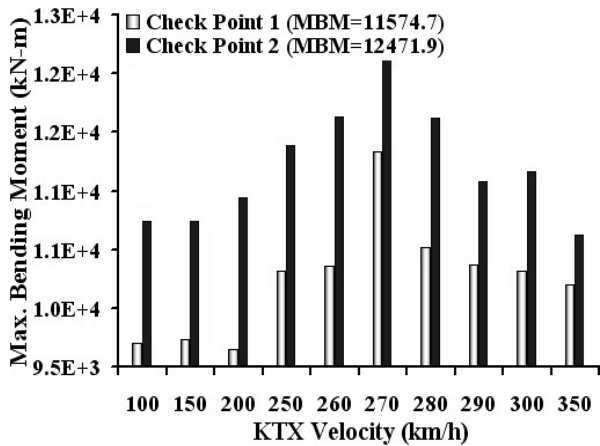
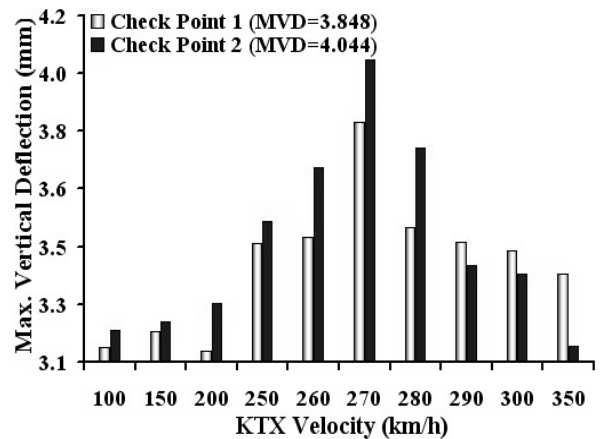


Fig. 7 MVD and MBM by KTX Velocity

4. 신뢰성-최적설계

4.1 고속철도교량의 한계상태방정식

고속철도교량의 고정하중 및 시계열하중을 고려하여 각각의 설계방안에 따른 수치해석 결과를 바탕으로 신뢰성평가를 수행하였다. 평가방법은 Rackwitz 등이 제시한 개선된 1계 2차 모멘트법(Advanced First Order Second Moment Method)을 이용하였다(Rackwitz 등, 1978). 고속철도교량의 극한강도 휨모멘트, 경간 중앙부의 최대 휨모멘트를 각각 외적 불확실성을 포함하는 확률변수로 고려하였으며, 식(2)와 같은 설계강도 한계상태방정식을 구성하였다.

$$g(\cdot) = \phi M_N - \gamma_{DL} M_{DLmax} - \gamma_{TSL} M_{TSLmax} \quad (2)$$

여기서, ϕM_N = 설계강도 휨모멘트

M_{DLmax} = 고정하중에 의한 최대 휨모멘트

M_{TSLmax} = 시계열하중에 의한 최대 휨모멘트

$\gamma_{DL}; \gamma_{TSL}$ = 고정하중 및 시계열하중의 하중계수

Table 3 Parameters of Random Variables in Reliability Evaluation

Random Variables		C.O.V.*	Distribution Type	Bias Factor**	References
Design Strength Moment	δ_{DSM}	0.135	Normal Type	1.12	(Tabsh 등, 1991)
Maximum Bending Moment by Dead Load	δ_{BMD}	0.100	Normal Type	1.05	(Nowak 등, 2000)
Maximum Bending Moment by Time Series Load	δ_{BMTSL}	0.250	Log-normal Type	1.24	(Cho 등, 2001)

* C.O.V.: Standard Deviation Divided by Mean Value

** Bias Factor: Ratio of Actual Values to Nominal Values

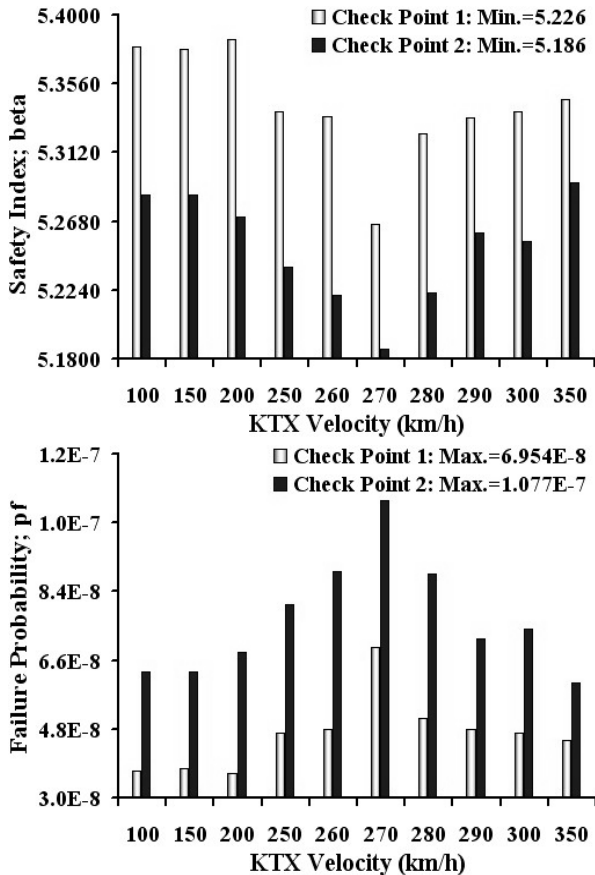


Fig. 8 Safety Indices and Failure Probabilities by KTX Velocity

고속철도교량의 극한강도 휨모멘트는 설계보고서에 따라 310,505.4kN-m를 적용하였으며(고속철도사업기획단, 1991; 한국고속철도공단, 1995), 확률변수의 변동계수(Coefficient of Variation: C.O.V.), 평균공칭비(Bias Factor) 및 확률분포(Probability Distribution) 형태에 대한 전반적인 내용은 국내·외 관련문헌을 참고하여 Table 3에 정리하였다(조효남 등, 2001; Tabsh 등, 1991; Nowak 등, 2000).

Check Point #1, #2의 최대 파괴확률은 270km/h에서 산정되었으며, 270km/h이후 감소하는 양상을 나타냈다. Fig. 8은 표준설계의 안전지수 및 파괴확률 양상을 도시한 것이다. Fig. 9는 다양한 설계방안의 파괴확률 양상

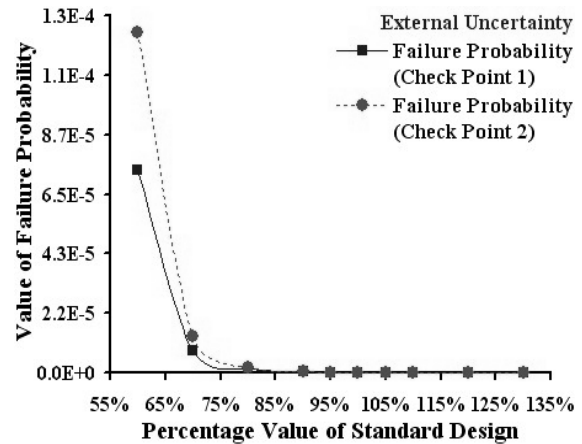


Fig. 9 Failure Probabilities Considering External Uncertainties

Table 4 Reliability Analysis Result by Standard Design

Check Point		Bending Moment (kN-m)
Check Point #1	Dead Load	45549.00
	Time Series Load	11574.72
	Failure Probability	6.954E-8
	Safety Index	5.266
Check Point #2	Dead Load	46261.50
	Time Series Load	12471.90
	Failure Probability	1.077E-7
	Safety Index	5.186
pf_{system} : Corresponding β		1.772E-7; 5.092

을 도시한 것이다. KTX의 속도는 최대 파괴확률이 산정된 270km/h이며, 시간중분 및 하중재하 절점간격은 각각 0.6m(Fig. 5) 및 0.01초(Fig. 6)인 수치해석 결과를 이용하였다. Table 4에 제시된 것과 같이 표준설계의 최대 파괴확률은 각각 6.954E-8(Check Point #1)과 1.077E-7(Check Point #2)로 평가되었다.

이 연구에서는 고속철도교량을 시리즈 모델(Series Model)로 구성한 점을 감안하여 Check Point #1, #2의 조합(Union)으로 시스템 파괴확률을 산정하였다(Ditlevsen, 1979). 이때, 파괴확률의 상관관계는 비연성인 것으로 가정하였다. 그러므로 표준설계의 시스템 파괴확률(pf_{system})은 1.772E-7이며, 이에 상응하는 안전지수는 5.092로 평가되었다.

4.2 고속철도교량의 최적설계 방안 결정

초기비용은 설계비, 시공비 및 공용 전 안전점검비용으로 구성된다. 각각의 설계방안에 대한 고속철도교량의 초기비용은 공사지와 설계도면을 근거로 산정하였다(한국고속철도공단, 1995). 이때, 노무비와 경비는 일정한 것으로 가정하였으며, 재료비의 증감을 고려하여 평가하였다. Table 5는 각각의 설계방안에 대한 초기비용을 정리한 것이다.

손상비용은 경미하거나 혹은 치명적인 비용들로 구성되며, 인명손실 및 통행금지나 통행제한에 따른 경제적 손실비용이 주요 손상비용의 구성요소이다. 일반적으로 정상적인 조건에서 교량붕괴는 거의 발생하지 않지만 손상비용 산정 시, 합리적으로 고려되어야 한다. 이 연구에서는 고속철도교량의 손상비용을 Fig. 3에 제시된 것과 같이 여러 비용항목으로 구성하였다(Han 등, 2008).

$$C_{DCT} = C_{DRCT} + C_{DLST} + C_{DHCT} + C_{DDCT} + C_{DENCT} \quad (3)$$

인명 및 교량시설의 손실비용은 인명손실과 더불어 교량자체 뿐만 아니라 유지관리장비나 계측시설의 사용기간 동안의 가치손실비용이고, 문화·역사적 비용은 구조물이 주변사회에 미치는 문화·역사적 가치를 유지시키기 위한 비용이다. 기능상실비용은 통행불능에 의한 교통통행 대안을 제공하는데 필요한 비용이며, 환경·사회적 비용은 구조물이 환경·사회적으로 부정적 영향을 미칠 때 이를 해결하는데 요구되는 비용이다. 이와 같이 손상비용은 여러 종류의 비용항목들로 구성되며, 각각의 비용항목에는 각각 불안전성에 의해서 발생하는 불확실성을 포함하고 있다. 따라서 각각의 비용항목을 결정하는데 있어 불확실성을 고려하는 것은 필수적인 사항이다. 따라서 각각의 설계방안의 손상비용은 다음 식과 같이 설계강도 파괴확률과 이에 따른 손상비용의 곱으로 산정하였다(Koskito 등, 1997).

Table 5 Initial Costs of Various Designs (Unit: $\times 10^7$ WON)

Different Designs	Initial Cost Value
60% Design	73.876
70% Design	81.984
80% Design	93.104
90% Design	96.140
95% Design	98.689
Standard Design	101.200
105% Design	106.260
110% Design	113.345
120% Design	126.500
130% Design	138.644

Regression Analysis Equation:

$$y = 0.1989x^3 - 2.9375x^2 + 17.472x + 59.944$$

$$C_{DCT} = C_{fdesign\ strength} \times pf_{design\ strength} \quad (4)$$

여기서, $C_{fdesign\ strength}$ = 설계강도에 따른 손상비용 구성인자

$pf_{design\ strength}$ = 설계강도에 따른 파괴확률

고속철도교량의 기대생애주기비용 평가 시, 손상비용의 구성요소는 관련문헌을 인용하였으며, Fig. 10과 같이 초기비용에 비례계수를 적용하여 산정하였다(조효남 등, 2001; Frangopol, 1997; De Brito 등, 1995).

손상비용의 구성요소의 평균에 관한 사항은 식(3)에 정식화되어 있다. 이때, 모든 손상비용들은 현재 시점의 화폐가치기준이므로, 미래손상비용은 현재가치계수(PWF)를 곱하여 평가하여야 한다. 이 연구의 경우, 고속철도교량의 기대수명 및 할인율은 관련문헌을 기초로 가정하였다(한국시설안전기술공단, 2002). 따라서 고속철도교량의 기대생애주기비용은 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$E(C_{TOTAL}) = C_{ICT} + PWF(C_{MCT} + C_{DRCT} + C_{DLCT} + C_{DHCT} + C_{DDCT} + C_{DENCT}) \quad (5)$$

$$PWF = \frac{[1 - \exp(-\ln(1 + Q_{CT})EL)]}{[\ln(1 + Q_{CT})EL]} \quad (6)$$

여기서, EL = 교량 구조물의 기대수명; Q_{CT} = 할인율

초기비용 및 유지관리비용에 포함된 내적 불확실성의 영향은 각각 $\pm 15.0\%$ 의 분산을 갖는 것으로 고려하였다. Table 6에 정리된 것과 같이 손상비용의 경우, 교량교체비용은 다른 비용항목에 비해 상대적으로 명확하기 때문에 $\pm 20.0\%$ 의 분산을 적용하였다. 그러나 손상비용을 구성하는 각각의 항목의 산정방법은 정립되지 않았으며, 주관적 특성을 가지므로 $\pm 30.0\%$ 의 분산을 고려하였다. 또한 환경·사회적 요인은 매우 가변적이므로 $\pm 70.0\%$ 의 분산을 적용하였다. Fig. 10 및 Table 6에 제시된 내용을 바탕으로 손상비용의 평균 및 분산은 각각 다음 식과 같이 산정할 수 있다.

$$C_{DCT} = C_{DRCT} + C_{DLCT} + C_{DHCT} + C_{DDCT} + C_{DENCT} \quad (7)$$

$$= 17400 C_{ICT}$$

$$VAR(C_{DCT}) = [0.2(3600 C_{ICT})]^2 + [0.3(12000 C_{ICT})]^2 + [0.3(240 C_{ICT})]^2 + [0.3(1200 C_{ICT})]^2 + [0.7(360 C_{ICT})]^2 = 13676688 C_{ICT}^2 \quad (8)$$

손상비용의 평균 및 분산에 따른 변동계수는 약 0.213으로 평가되었다. 따라서 기대생애주기비용의 평균 및 분산은 다음 식과 같이 정식화 할 수 있다.

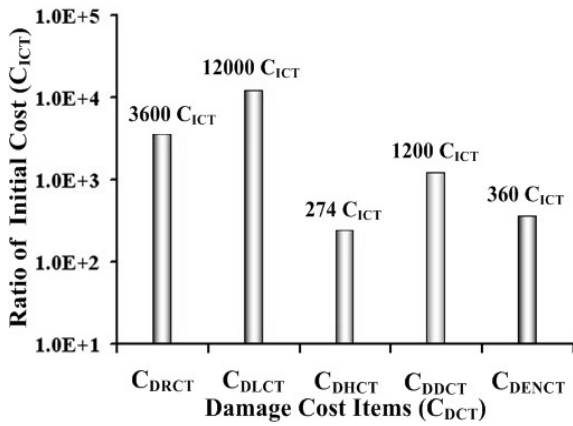


Fig. 10 Contributions of Various Cost Items

Table 6. Internal Uncertainties in Damage Cost Items

Damage Cost Items	Coefficient of Variation
C_{DRCT}	20.0%
C_{DLCT}	30.0%
C_{DHCT}	30.0%
C_{DDCT}	30.0%
C_{DENCT}	70.0%

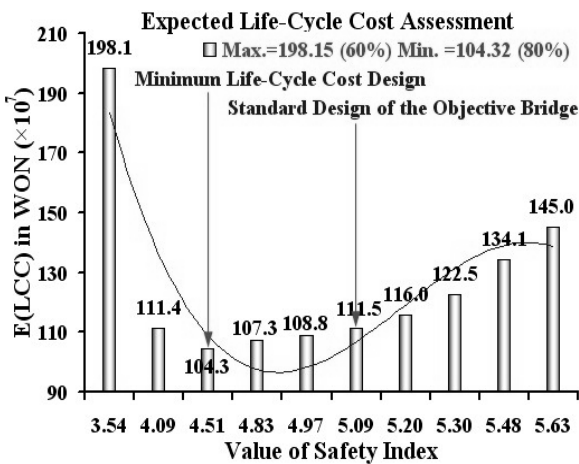


Fig. 11 Life-Cycle Cost versus Safety Index with External Uncertainties

$$E(C_{TOTAL}) = C_{ICT} + C_{MCT} + C_{DCT} \quad (9)$$

$$VAR(C_{TOTAL}) = (0.15C_{ICT})^2 + (0.15C_{MCT})^2 + (0.213C_{DCT})^2 \quad (10)$$

이 연구에서는 각각의 설계방안에 대해 외적 불확실성의 영향을 고려하여 안전지수와 기대생애주기비용의 상관관계를 검토하였으며, Fig. 11에 도시하였다. 평가결과에 따르면, Fig. 2에서 검토한 것과 같이 기대생애주기비용은 안전수준이 증가함에 따라서 감소하다가 다시 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 손상비용의 변화율이 둔화되

Table 7 Internal Uncertainties in Random Variables

Random Variables		C.O.V.	Distribution Type
Design Strength Moment	Δ_{DSM}	0.10	Normal Type
Maximum Bending Moment by Dead Load	Δ_{BMD}	0.10	Normal Type
Maximum Bending Moment by Time Series Load	Δ_{BMTSL}	0.20	Log-normal Type

Table 8 Critical Percentage Value of Failure Probability and Safety Index

Percentages	Mean (Median)	25-Percentage pf ; 75-Percentage β	10-Percentage pf ; 90-Percentage β
Failure Probability	3.254E-6 (3.246E-6)	2.719E-6	2.229E-6
Safety Index	4.492 (4.495)	5.223	5.897

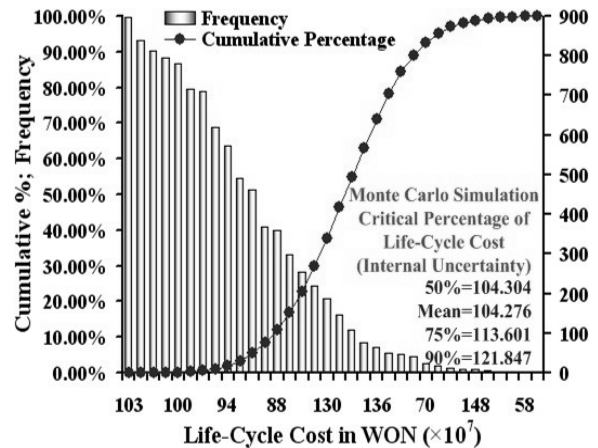


Fig. 12 Critical Values of Minimum Life-Cycle Cost Using Monte Carlo Simulation

고 초기비용의 변화율이 증가하기 시작하는 변곡점에서 최소생애주기비용(10.432억원) 및 최적 안전지수(4.509)를 산정할 수 있다.

최적설계 방안의 신뢰성평가 결과는 전 장에서 고찰한 것과 같이 고속철도교량의 극한강도 휨모멘트 및 최대 휨모멘트에 내재된 내적 불확실성의 영향을 간주하지 않은 평가결과이다. 따라서 산정된 파괴확률 및 안전지수는 내적 불확실성을 포함하는 확률변수로 고려되어야 한다 (Ang 등, 2007). 이 연구에서는 변동계수의 측면에서 내적 불확실성의 영향을 Table 7과 같이 가정하였다.

Table 8은 몬테카르로 모사운용을 이용하여 내적 불확실성의 영향을 고려한 파괴확률 및 안전지수의 검토결과를 정리한 것이다. 또한 Fig. 12는 최소생애주기비용의 평균 및 분산을 이용하여 누적 퍼센트와 빈도수 그래프를 도시한 것으로, 누적 퍼센트는 좌축, 빈도수는 우축을 기준으로 정의하였다. 이때, 몬테카르로 모사운용 횟수는

해석결과의 정확성을 확보할 수 있도록 설정하였다.

5. 결론

이 연구에서는 수치해석 결과를 바탕으로 신뢰성평가와 더불어 기대생애주기비용의 검토과정을 통해 PSC Box Girder 고속철도교량의 정량적 구조안전성과 최적설계 방안을 결정하기 위한 기초자료를 제시하였다. 이 연구결과를 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다. 기대생애주기비용을 바탕으로 하여 평가된 최적설계 방안은 기존의 초기비용에 기초한 방법과는 다르게 공용기간 유지관리비용 및 손상비용을 고려함으로써, 설계단계부터 고속철도교량의 안전성 및 경제성을 확보할 수 있는 효율적인 방안인 것으로 판단된다. 설계강도 한계상태방정식에 따른 안전지수는 고속철도교량의 안전성에 대한 합리적인 평가기준을 제시할 것으로 사료된다. 고속철도교량의 최적설계 방안에 관해 평가한 결과, 구조성능의 지표인 안전지수는 5.223(75%) 및 5.897(90%)로 평가되었으며, 경제성의 지표인 기대생애주기비용은 각각 11.3601억원(75%) 및 12.1847억원(90%)으로 검토되었다. 그러나 최적설계의 안전수준 및 기대생애주기비용은 관련 문헌을 기초로 여러 가지 주요 변수를 가정하여 산정된 것이다. 그러므로 주요 변수의 항목별 가정치가 변함에 따라서 평가결과는 다른 양상이 검토될 수 있음을 유의해야 한다. 기대생애주기비용의 주요 분포양상과 신뢰성평가 결과의 상관관계는 고속철도교량에 포함된 불확실성에 따른 위험에 대처할 뿐만 아니라 최적설계 방안을 결정하는데 있어 중요한 기초자료를 제공할 것으로 판단된다. 기대생애주기비용을 구성하는 비용항목 중에서 손상비용 항목에 관한 상세한 연구는 매우 중요하다. 따라서 신뢰성 있는 자료축적과 더불어 이를 활용하기 위한 개선된 평가수단의 개발이 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 고속철도사업기획단, 고속철도 강교량 및 합성형 교량 설계표준 시방서 해설(안), 1991.
2. 대한토목학회, 철도설계기준(철도교편), 2004.
3. 송창혁, 다양한 변수를 고려한 고속철도교량의 최적 동적증폭계수 분석 방법, 충남대학교 대학원, 공학석사학위논문, 2008.
4. 조중연, 선종환, 김이현, 조효남, “불확실성을 고려한 철도 교량의 LCC분석 시스템 개발”, 한국철도학회 2007년도 추계학술대회논문집, 2007, pp.1152-1158.
5. 조효남, 민대홍, 조준석, “고속철도 강교량의 총기대비용 최적설계”, 대한토목학회논문집, 제21권 제5-A호, 2001, pp. 735-760.
6. 조효남, 박진영, 선종환, 윤만근, “의사결정수 기법을 이용한 교량확폭에 관한 의사결정모델 개발”, 구조물진단학회지, 제12권, 제4호, 2008, pp.187-194.
7. 한국고속철도공단, 서울-부산간 경부고속철도 제 6공구 실시설계보고서(구조계산서), 1995.
8. 한국고속철도공단, 경부고속철도 남서울-천안간(케도 제 1공구) 케도부설 기타공사 실시설계보고서, 2003.
9. 한국시설안전기술공단, 교량의 LCC 분석모델 개발 및 DB 구축방안 연구, 2002.
10. 한성호, 이우상, “시계열하중을 이용한 PSC 박스 거더 고속철도교량의 동적성능 평가에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제30권 제3-A호, 2010, In Press.
11. Ang, A. H-S., “Treatment of Uncertainties in Risk-Based Optimal Design of Marine Structures”, OMAE 2004, June, Vancouver, Canada.
12. Ang, A.H-S., “Practical Assessments of Risk and its Uncertainty”, Proc. IFIP Workshop, Kobe, Japan, 2006.
13. Ang, A. H-S. and Tang, W. H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
14. De Brito, J. and Branco, F.A., “Bridge Management Policy using Cost Analysis”, Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 104, Nov., 1995, pp.431-439.
15. Ditlevsen, O., “Narrow Reliability Bounds for Structural System”, Journal of Structural Mechanics, Vol. 7 No. 4, 1979, pp.453-472.
16. Frangopol, D.M. and Lin, K.Y., “Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures”, Journal of Structure Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 10, 1997, pp.1390-1401.
17. Han, S.H. and Ang, A.H-S., “Optimal Design of Cable-Stayed Bridges Based on Minimum Life-Cycle Cost”, IABMAS08 Conference, Seoul, Korea, 2008.
18. Koskito, O.J. and Ellingwood, B.R. “Reliability-Based Optimization of Plant Precast Concrete Structures”, Journal of Structure Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997.
19. Nowak, A.S. and Collins, K.R., Reliability of Structures, Vol. 268, McGraw-Hill, New York, 2000.
20. Rackwitz, R. and Fiessler B., “Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences”, Computers and Structures, Vol 9, No. 5, 1978, pp.489-494.
21. Tabsh, S.W. and Nowak, A.S., “Reliability of Highway Girder Bridges”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 8, 1991, pp.2373-2388.

(접수일자 : 2010년 1월 15일)
(심사완료일자 : 2010년 3월 18일)

요 지

신뢰성평가는 고속철도교량에 포함된 불확실성의 영향을 고려하여 정량적 구조안전성을 검토하기 위한 효율적인 방안이며, 신뢰성평가에 기초한 기대생애주기비용은 고속철도교량의 합리적인 안전수준 및 설계기준을 제공할 것이다. 따라서 이 연구에서는 수치해석과 신뢰성평가 결과를 바탕으로 고속철도교량의 기대생애주기비용 및 최적설계 방안을 결정하고자 한다. 이를 위해, 고속철도교량의 표준설계를 기준으로 다양한 설계방안을 설정한 후, 각각의 설계방안에 대해 수치해석을 수행하였으며, 설계강도 한계상태방정식에 따른 신뢰성평가는 수치해석결과를 토대로 외적 불확실성의 영향을 고려하여 수행하였다. 고속철도교량의 기대생애주기비용은 각각의 설계방안에 따른 신뢰성평가 결과를 바탕으로 산정하였다. 또한 최적설계 방안은 산정된 기대생애주기비용을 이용하여 결정하였다. 아울러, 최적설계 방안의 신뢰성평가 결과 및 기대생애주기비용에 대해 내적 불확실성의 영향을 고려하여 검토하였다. 이 연구결과는 고속철도교량의 체계적인 안전성 평가 및 최적 구조설계를 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심 용어 : 고속철도교량, 신뢰성평가, 설계강도 한계상태방정식, 안전수준, 기대생애주기비용, 최적설계
