

## LCC를 고려한 강박스 거더의 최적설계 Optimal Design of Steel Box Girders Considering LCC

안 예 준\*                      이 현 섭\*\*                      신 영 석\*\*\*                      박 장 호\*\*\*\*  
Ahn, Ye-Jun                      Lee, Hyun-Sub                      Shin, Yung-Seok                      Park, Jang-Ho

### ABSTRACT

This paper presents a method to minimize Life-Cycle Cost(LCC) of steel box girders. The LCC function considered in this paper includes initial cost, expected life-cycle maintenance cost and repair cost. A resistance force curve is derived from a condition grade curve of steel girders and optimal design of steel box girders is performed on the basis of derived resistance force curve. Also, in this paper annual costs of various case in LCC are compared and analyzed. It is concluded that the optimal design of steel box girders considering LCC by a presented method will lead to more economical and safer girders than conventional design.

### 1. 서    론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 교량 구조물의 설계 시 다수의 구조형식에 대한 설계대안을 검토 후 최저의 생애주기비용(LCC : Life Cycle Cost)으로 최상의 가치를 창출하기 위한 가치공학(VE : Value Engineering)<sup>(1)</sup>에 대한 관심이 높아지고 있다. 구조물의 가치척도는 '생애주기비용/기능'으로 평가할 수 있으며 이때 유사한 사회적, 문화적 기능을 수행할 수 있는 구조물들이라면 각 구조물에 대한 가치척도의 첫 번째 요소는 생애주기비용이다.<sup>(2), (3)</sup>

구조물의 생애주기비용은 건설계획 단계에서부터 폐기처분단계까지의 생애주기동안에 발생하는 직·간접적인 모든 비용의 총 합을 의미하며 대부분의 경우 초기 직접비용보다는 불확실성을 갖는 보수·보강과 관련한 간접비용이 큰 비중을 차지하기 때문에 이러한 미래의 운영 및 유지관리에 관한 가치를 판단하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.<sup>(4), (5)</sup>

한편 교량 구조물의 설계기법을 개발함에 있어서 재래의 축차 반복적인 설계 단면 결정과 달리 최적설계 기법을 이용하여 최적의 교량 단면을 선정하기 위한 연구가 다수 보고 되었으며,<sup>(6)</sup> 과거 연구과정에서 단지 교량의 초기 가설비용이나 재료비만을 목적함수로 선정하여 최적설계를 수행했던 것과는 달리 최근에는 교량 구조물의 공용간 생애주기 비용을 목적함수화하여 교량 구조물을 최적설계하고 있다.<sup>(7), (8)</sup>

본 연구에서는 이러한 교량의 생애주기비용을 목적함수화하기 위하여 상태등급 곡선에 근거한 초기 설계

\* 비회원 · 아주대학교 건설교통공학과 박사과정

\*\* 학생회원 · 아주대학교 건설교통공학과 석사과정

\*\*\* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 정교수

\*\*\*\* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 조교수

단면에 따른 공용수명을 예측하기 위한 방법을 제시하였다. 또한, 보수·보강의 필요시기와 이에 따른 내하력 곡선의 변화를 비교·분석하였으며 최종적으로 내하력곡선에 근거한 강박스 거더 교량의 최적설계를 수행하였다.

## 2. LCC 최적설계의 정식화

### 2.1. 최적설계 대상교량

강교의 LCC 최적설계에 대한 효과를 고찰해보기 위해, 경기도 여주군 양평면에 건설될 전형적인 강교량의 형태인 강박스 거더교(steel box girders bridge)를 대상교량으로 선정하였다. 설계조건은 1등급 교량으로서 지간은 4경간 연속교이며(=55.15m+55.00m+60.00m+55.15m) 교폭은 15.60m, 주형의 폭은 2.40m이다.

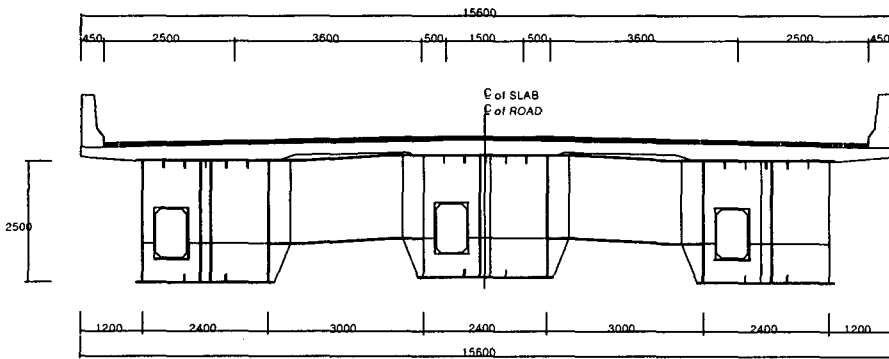


그림 1 대상교량 단면도

### 2.2. 설계변수

본 연구에서는 최대 정모멘트 구간의 상·하부플랜지 두께, 복부판 및 상·하부리브, 종·횡리브, 수직·수평보강재의 치수를 설계변수로 설정하였으며, 주형의 폭은 264cm, 리브의 개수는 상부 5개 하부 2개로 고정하였다.

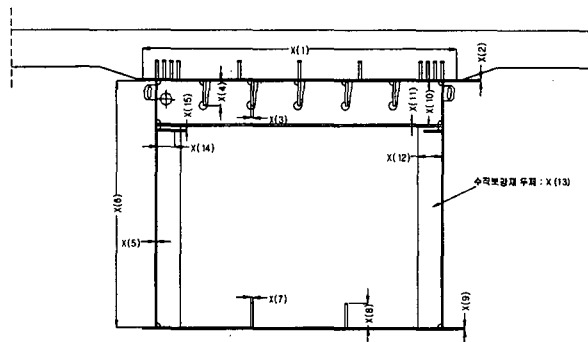


그림 2 주형 단면도

### 2.3. 설계제약조건

도로교 설계기준(건설교통부, 2000)<sup>(9)</sup>에 의거해서 설계 제약조건을 다음과 같이 설정하였다.

$G(1) \sim G(15)$  : 하한경계(Lower Boundary), 강재의 최소두께 또는 최소폭

(1)

G(16)~G(30) : 상한경계(Upper Boundary), 강재의 최대두께 또는 최대폭 (2)

G(31)~G(42) =  $\frac{f}{f_a} - 1 \leq 0$  : 주형상 · 하부플랜지 휨응력 (합성전+합성후+크리프+건조수축±온도) (3)

G(43) =  $\frac{v}{v_a} - 1 \leq 0$  : 합성전+합성후 전단응력 (4)

G(44) =  $\frac{t}{209 b} - 1 \leq 0$  : 복부판 폭/두께비 (수평보강재 1단) (5)

G(45)~G(56) =  $\frac{f}{f_a} - 1 \leq 0$  : 슬래브 상 · 하부 휨응력 (6)

G(57)~G(58) =  $(\frac{f}{f_a})^2 + (\frac{v}{v_a})^2 - 1.2 \leq 0$  : 합성응력 (7)

G(59)~G(60) =  $\frac{\sum f}{0.6 f_{ck}} - 1 \leq 0$  : 슬래브 압축연 항복응력 (8)

G(61)~G(64) =  $\frac{\sum f}{f_y} - 1 \leq 0$  : 주형 상 · 하부플랜지 항복응력 (9)

G(65)~G(69) : 종 · 횡리브 단면조건 (10)

G(70)~G(75) : 수직 · 수평보강재 단면조건 (11)

#### 2.4 목적함수

강박스 거더의 LCC 최적설계 정식화는 초기비용뿐만 아니라 현재가치로 환산된 생애주기동안에 발생하는 구조물의 총 기대비용을 고려하여 다음과 같이 정식화하였다.

$$E [ C_T(X) ] = C_I(X) + E [ C_m ] + E [ n \cdot C_R(t) ] \quad (12)$$

- 총 기대비용(  $E [ C_T(X) ]$  )
- 초기비용(  $C_I(X)$  ) : 초기비용은 교량이 준공되기 전까지 발생하는 비용으로 설계비용을 제외한 주형 제작 및 가설비용과 도장비용의 합으로 설정하였다.
- 유지관리비용(  $E [ C_m ]$  ) : 시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령(2000)에 따라 초기비용의 10%로 산정하였다.
- 보수비용(  $E [ n \cdot C_R(t) ]$  ) : 교량 전문가에 의해 구성된 상태등급곡선(A~E단계)과 강교의 안전진단 결과 측정된 내하력을 바탕으로 추정된 내하력 곡선을 이용하여 초기 내하력에 따른 보수횟수(  $n$  )를 결정하고 이에 따른 강박스 거더의 공용년수 동안의 보수비용을 산정하였다.
- 설계변수(  $X$  )

보수비용에 대한 항목은 내하력 저하로 인한 볼트누락 및 체결불량에 대한 볼트교체 및 체결과 내 · 외부의 도장박리에 대한 보수도장으로 구성하였으며, 기타 보수비용에 대해서는 볼트와 도장비용의 10%를 추가로 고려하였다.

표 1 보수항목에 따른 보수비용 및 소요일수

보수항목	보수비용(원/m <sup>2</sup> )	소요일수(일/m <sup>2</sup> )
볼트교체 및 체결	5,000	0.033
도장박리(내부)	68,500	
도장박리(외부)	45,000	
기타	12,785	

### 3. LCC를 고려한 최적설계 알고리즘

본 연구에서는 Matlab<sup>(10)</sup>에서 제공하는 Optimization Toolbox를 사용하여 최적화 문제의 해를 구하였으며, 최적화 기법으로는 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방식을 사용하였다.

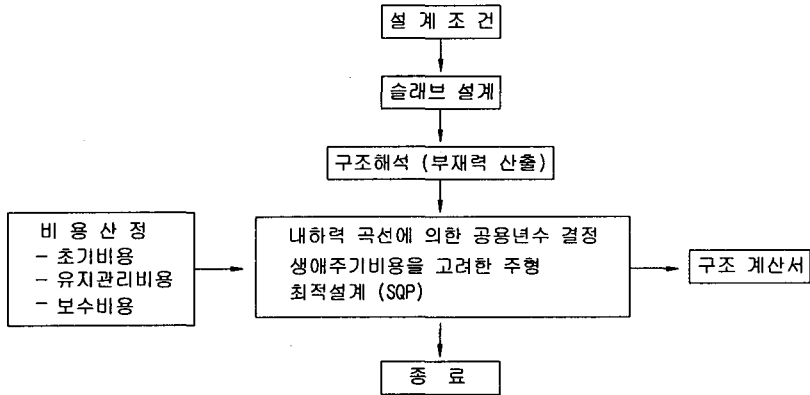


그림 3 LCC를 고려한 최적설계 흐름도

### 4. 구조물의 공용수명 평가

구조물의 초기 내하력에 따른 공용수명을 평가하기 위하여 시설안전기술공단의 상태등급곡선과 정밀 안전 진단에 의한 교량의 이력자료를 이용하여 보수·보강되지 않은 강재 주형에 대한 내하력 곡선을 구성하였다.

#### 4.1 상태 등급 곡선

시설안전기술공단의 “시설물의 상태평가 기준 정립(교량)(2000)”<sup>(11)</sup>에 따르면 구조물의 손상 정도를 다음 표 2와 같이 5개 등급으로 분류하고 있으며 “도로교의 공용수명 연장방안 연구(2000)”에서는 공용수명에 따른 상태 등급의 변화를 그림 4와 같이 제시하고 있다.

표 2 손상 판정기준(시설안전기술공단)

판정구분	상 태	필요조치사항
A	문제점이 없는 건전하고 양호한 상태	필요 없음
B	경미한 손상, 결함, 열화가 발생하였으나 기능발휘에 지장이 없는 상태로서 적은 양의 보수가 필요할 수 있음.	필요 없음
C	보통의 손상, 결함, 열화가 발생하였으나 구조적으로는 안정하며 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요한 상태	보수조치 필요함 보수시(C→B)
D	주요부재에 발생한 손상, 결함, 열화로 인하여 내하성능에 지장을 초래할 우려가 있어 통과하중 제한을 검토해야 하며, 시급한 보수·보강이 필요한 상태	보강조치 필요함 보강시(D→B)
E	주요부재에 발생한 손상, 결함, 열화로 인하여 안전성에 위험이 있어 통과하중 제한이 시급한 상태로써, 임시조치 후 사용하거나 즉각 시설물의 부분 사용금지 또는 보강·개축이 필요한 상태	보강·개축조치 필요함

그림 4의 강제 주형에 대한 상태곡선은 현재 체계적인 교량 내하력에 대한 이력 자료가 미진한 국내의 현실을 감안하여 Delphi Study와 같은 방법으로 전문가들의 의견을 수렴하여 회귀분석한 결과이며, 경제성 분석에서의 LCP(Life Cycle Profile)를 추정하기 위하여 개발되었다.

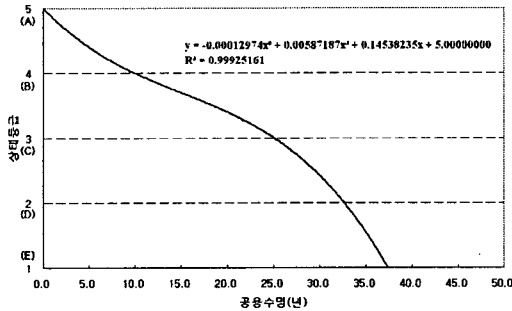


그림 4 강제 주형에 대한 상태등급곡선

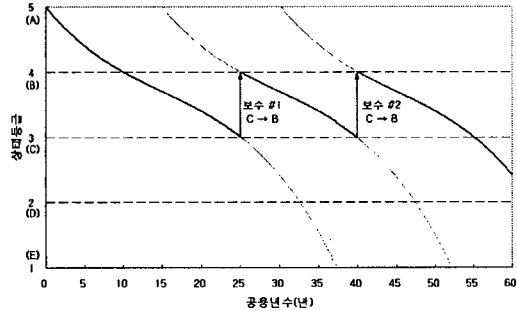


그림 5 강제 주형의 이력곡선

표 2에 나타난 바와 같이 각 상태등급은 구조물의 내하력 감소 정도를 가능할 수 있다. 즉, A와 B 등급의 경우 구조물의 내하력 저하는 거의 발생하지 않으며 C등급 이하로 구조물의 상태가 저하될 경우 내하력이 급격히 감소할 우려가 있기 때문에 상태등급 개선을 위한 보수 또는 보강조치가 필요하다. 이러한 보수·보강 시 내하력 감소를 막을 수 있으며 그림 5의 경우 이러한 보수조치로 인하여 교량의 상태 등급을 일정하게 유지할 수 있는 이력곡선을 제시하고 있다. 그러나, 이러한 상태 등급의 개선은 근본적으로 구조물의 내하력을 상승시키는 것이 아니고 단지 시간에 따른 내하력 저하를 감소시켜주는 역할을 하기 때문에 구조물의 공용수명을 반복하여 연장시킬 수는 없으며, 구조물의 전체적인 공용수명을 결정하기 위해서는 다음에 제시 할 구조물의 내하력 감소 곡선과 병행하여 평가할 수 있다.

#### 4.2 내하력 곡선

국내 교량구조물에 대한 체계적인 정밀 안전진단과 그에 따른 보수보강은 현재 매우 활발히 진행되고 있으나 그 기간이 오래되지 않아 각 교량에 따른 체계적인 이력곡선은 전무한 상황이다. 또한 대부분의 교량이 정밀 안전진단을 시행한 후 전반적인 보수·보강을 실시하므로 강제 주형에 대하여 보수·보강이 적용되지 않은 순수한 내하력 변화 곡선을 구하기는 매우 어렵다.

본 연구에서는 준공이후 2회 이상 정밀 안전진단을 실시한 교량의 이력 자료와 상태 등급곡선을 이용하여 다음 그림 6, 그림 7과 같은 내하력 곡선을 가정하였다. 그림 7에서 A, B, C 교량의 정밀 안전진단 결과는 주형에 특별한 보수조치가 이루어지지 않은 경우이므로 내하력 곡선의 초기 기울기를 산정하는 중요 요소로 선정되었으며 상태 등급 곡선에서 보수·보강이 이루어지지 않은 경우 공용년수 약 37년 후 상태 등급이 최저 수준인 E등급으로 하락하므로 내하력은 최저수준(=1.0)에 이른다고 가정하였다.

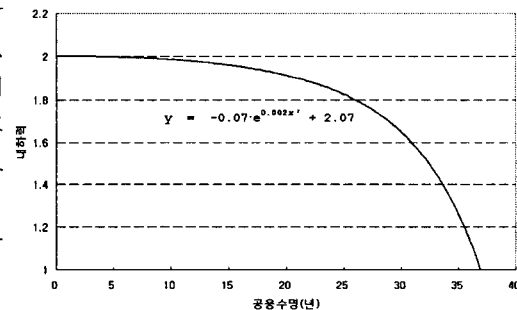


그림 6 강제 주형의 내하력 곡선

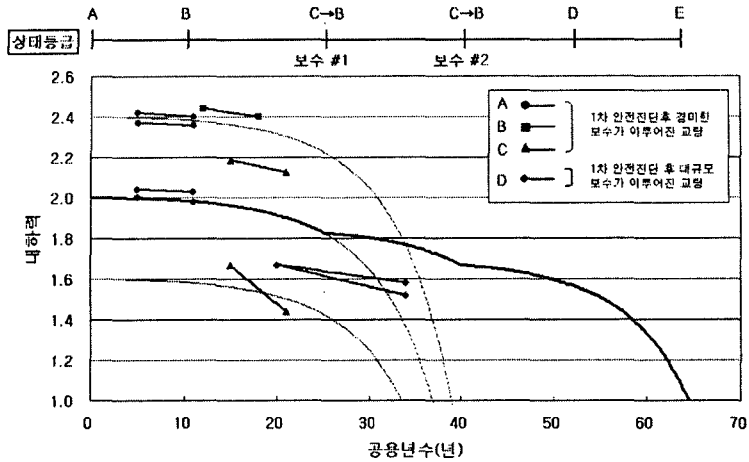


그림 7 보수이력에 따른 강재주형의 내하력 곡선

내하력의 변화량은 상태등급에 따라 결정된다. 즉 상태 등급이 낮아질수록 내하력 곡선이 감소하는 기울기는 증가하게 된다. 때문에 그림 5, 그림 7에 나타난 바와 같이 강재 주형의 상태 등급이 C로 낮아졌을 때 보수작업을 통하여 B로 상태 등급을 개선하면 이후 내하력이 감소하는 기울기는 B상태로 개선되며 이에 따라 공용수명을 연장할 수 있다. A, B, C 교량의 경우 비교적 초기에 정밀 안전진단이 이루어졌으며 1차 안전진단 후 대부분의 주요 부재가 B 상태등급으로 판정되어 경미한 보수조치만을 취한 경우로서 가정된 내하력 곡선과 기울기가 매우 근접함을 알 수 있다. 또한 D 교량의 경우 준공 후 20년이 지난 후 1차 정밀 안전진단을 수행하였으며, 상태 등급이 C등급 이하로 판정되어 전반적인 주형의 보수와 기타 부재의 보장이 이루어진 경우로 이 경우 역시 1차 보수 이후 내하력 곡선과 유사한 기울기를 관찰할 수 있다.

## 5. 공용년수 확보를 위한 LCC 최적설계 예

초기 내하력에 따른 최적설계값의 변화를 살펴보기 위하여 2.3절에 나타난 설계제약조건에 다음 형태의 제약조건을 추가하였다. 그리고 초기 내하력을 1.0~2.8로 변화시키며 최적설계를 수행한 후 결과를 표 3과

표 3 초기내하력 변화에 따른 최적설계 결과

		CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	비고
		초기내하력 = 1.0	초기내하력 = 1.2	초기내하력 = 2.0	초기내하력 = 2.8	
상부 플랜지	폭 (mm)	2640	2640	2640	2640	
	두께 (mm)	11.5	11.5	11.3	11.3	
복부판	높이 (mm)	1999	2028	2137	2211	
	두께 (mm)	9.6	9.7	10.2	10.6	
하부플랜지	폭 (mm)	2640	2640	2640	2640	
	두께 (mm)	14.8	15.4	17.9	20.5	
단면 2차 모멘트 ( $cm^4$ )		18286894	19333448	23577483	27526126	
초기 비용 (만원/m)		271.3	277.1	300.0	322.2	
생애 주기 비용 (만원/m)			1267.4	2402.8	2728.6	
년간 비용 (만원/m)			42.24	37.54	39.55	

그림 8에 나타내었다. 표 3에서 1번 경우 준공과 함께 내하력의 감소가 시작되므로 주형의 공용수명을 산정할 수 없다. 때문에 초기 내하력이 1.0인 경우 초기비용 외에 생애주기비용을 추가로 고려할 수 없다. 초기 내하력에 대한 추가 제약조건은 다음 식 13과 같다.

$$G(75) = \frac{f_a - f_{\text{사하중} + \text{크리프} + \text{진동수축} + \text{온도하중}}}{f_L(1+i)^{\times \text{초기내하력}}} - 1 \leq 0 \quad (13)$$

다음 그림 8은 각 설계 경우에 대한 내하력 변화와 최대 공용 년수를 나타내고 있다. 각 경우에 대하여 보수 횟수를 2번으로 제한한 이유는 강제 주형의 경우 실제로 2회 이상 보수한 사례를 찾아보기 힘들고 상태 등급의 회복 또한 기대하기 어렵기 때문이다. 다만 2회이상 전체 보수를 실시한 이후 상태 등급이 C등급 이하로 낮아진 경우 보수·보강을 병행하여 상태 등급과 내하력을 동시에 향상시키는 대안이 있으나 일반적으로 강제 주형의 경우 내하력의 증진을 기대할 수 있는 효과적인 보강 방법이 적고 과도한 비용이 발생하는 반면 공용 내하력이 크게 증가하지 않으므로 본 연구에서는 보강 경우를 제외하였다.

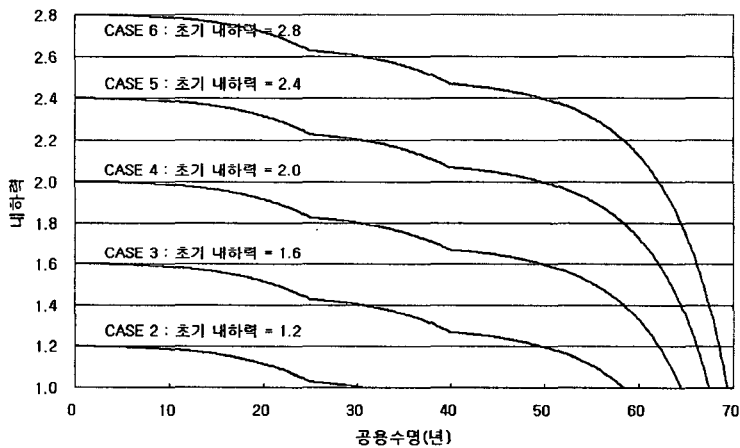


그림 8 초기내하력에 따른 강제주형의 공용년수

1.2 ~ 2.8로 초기 내하력을 변화하며 최적설계를 수행한 결과 그림 8에 나타난 바와 같이 초기 내하력이 증가할수록 교량의 공용년수는 증가함을 알 수 있다. 그러나 초기내하력이 증가함에 따라 공용수명의 증가량이 급격히 감소하여 전체 생애주기비용을 공용수명으로 나누어 산출한 연간 비용은 감소하다가 증가하는 경향을 갖는다. 교량의 공용수명을 연장시키기 위해서는 적절한 초기 내하력을 확보하여 설계를 수행한 후 지속적인 보수·보강을 실시하여 양호한 교량의 상태를 유지하는 것이 중요함을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 시설안전관리공단에서 제시한 상태등급 곡선과 안전진단 이력 자료를 이용하여 일반적인 강제주형의 내하력 곡선을 제시하였다. 또한 동일한 상태등급일 경우 내하력 곡선의 기울기가 일정하다는 상관관계를 이용하여 강제주형의 보수 시 상태 등급이 향상되고 결과적으로 내하력의 감소 정도를 개선할 수 있음을 보였다. 가정된 내하력 곡선을 이용하여 초기 내하력에 따른 교량의 공용수명을 결정하고 공용수명

동안 발생할 수 있는 보수 횟수에 따라 비용을 LCC 최적설계의 목적함수에 추가하였다. 초기 내하력을 다양하게 변화하며 강재주형의 총 생애주기 비용을 최적설계 한 결과 다음과 같은 내용을 도출하였다.

1. 내하력의 감소는 교량의 준공과 함께 진행되므로 단지 초기 단면을 최적설계 한 경우 충분한 공용수명을 확보할 수 없으며 단면 최적설계 시 반드시 교량의 공용수명을 확보하기 위한 검토가 필요하다.

2. 교량의 공용수명을 결정하기 위해서는 매우 다양한 요소를 고려해야 하지만 본 연구에서는 교량의 일반적인 상태등급 곡선과 초기 내하력을 이용하여 내하력 곡선을 가정하고 초기 내하력에 따른 공용년수를 결정하였다.

3. 초기 내하력을 증가 시킬 경우 공용수명을 연장시킬 수 있지만 초기내하력을 일정량 이상으로 증가시켜도 연간 기대비용을 감소시킬 수는 없다.

4. 교량 정밀 안전진단 등에 따른 체계적인 이력관리와 보수·보강 시 상태 등급 향상과 내하력의 개선여부 등에 대한 교량 이력자료를 보강하여 보다 신뢰할 수 있는 내하력 곡선을 얻을 경우 공용수명을 고려한 교량의 신뢰할 수 있는 LCC 최적설계를 수행할 수 있을 것이다.

## 7. 참고문헌

1. 안종필, 박경호, 김석재, "VE/LCC개념을 도입한 최적의 교량형식 선정에 관한 연구", 대한토목학회 2002학술발표회 논문집, pp.171~174, 2002
2. 이성호, "수명주기비용에 관한 개념적 고찰", Journal of Production Technology, Vol.5, p.17~24, Sep. 1998
3. Bull, J.W., "Life Cycle Costing for Construction Materials", Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol.3, No.4, pp.224~231
4. Mark A. Ehlen, "Life-Cycle Costs Of Fiber-Reinforced-Polymer Bridge Decks", journal of materials in civil engineering, August, 1999
5. David G. Wodward, "Life cycle costing-theory, information acquisition and application", International Journal of Project Management, Vol.15, No.6, pp.335~344, 1997
6. Vanderplaats, Garret.N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", 1984
7. 고현무, 김용길, 김동석, 함대기, "지진으로 인한 손상평가를 통한 교량 구조물의 생애주기비용 최소화", 대한토목학회 2001학술발표회 논문집, p.1131~1135, 2001
8. 조효남, 민대홍, 이광민, "강상판교의 생애주기비용 최적설계", 한국강구조학회 논문집, 제13권 4호, 2001
9. "도로교 설계기준", 건설교통부, 2000
10. MATLAB 사용자 메뉴얼
11. "도로교의 공용수명 연장방안 연구", 시설안전기술공단, 건설교통부, 2000.12