

# 강상자형교의 LCC 최적설계에 미치는 간접비용의 영향

## Indirect Cost Effects on Life-Cycle-Cost Effective Optimum Design of Steel Box Girder Bridge

이 광민<sup>1)</sup> · 조효남<sup>2)</sup> · 차철준<sup>3)</sup> · 염인수<sup>4)</sup>

Lee, Kwang Min Cho, Hyo Nam Cha, Chul Jun Eom, In Su

**요약 :** 본 논문에서는 강상자형교 생애주기비용(Life-Cycle Cost: 이하 LCC) 최적설계에 미치는 간접비용의 영향에 관한 연구를 수행하였다. 강상자형교 LCC 최적설계를 위한 정식화는 초기비용, 기대복구(expected rehabilitation) 비용과 인적 혹은 물적 손실비용 등과 같은 기대비용 및 도로이용자비용, 그리고 사회-경제 손실비용을 등과 같은 간접비용(혹은 간접복구비용)을 고려하였다. 이와같은 정식화 모델을 이용하여 본 논문에서는 실제 2경간 연속 강상자형교( $2@50m=100m$ )의 LCC 최적설계 문제에 적용하였고, 기존의 설계방법들과 LCC의 비용-효율성에 대해 비교·고찰하였다. 또한 본 논문에서는 LCC에서 큰 비중을 차지하는 간접비용이 강상자형교 LCC 최적설계에 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 교량이 속해 있는 도로의 네트워크(우회도로수) 및 우회도로 조건(우회도로 차로수 및 길이), 교통량 등과 같은 교통조건의 변화에 따른 다양한 민감도 분석을 수행하였다. 수치해석의 결과 교통량, 우회도로수, 우회도로 차로수 등은 강상자형교의 LCC 최적설계에 민감한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 향후 신설 강상자형교의 LCC최적설계시 간접비용에 중요한 영향을 미치는 교통조건이 중요한 인자로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

**ABSTRACT :** This paper presents the effects of indirect costs on Life-Cycle-Cost(LCC) effective optimum design of steel-box girder bridges. The LCC formulations considered in the LCC optimization of the bridges consist of initial cost and expected rehabilitation costs including repair/replacement costs, loss of contents or fatality and injury losses, and indirect costs such as road user costs and indirect socio-economic losses. To demonstrate the LCC-effectiveness for optimum design of the bridges, an actual steel box girder bridge having two continuous spans( $2@50m=100m$ ) is considered as a numerical example. And also, in this paper, various sensitivity analyses are performed to investigate the effects of indirect costs caused by traffic conditions such as number of detour route, number of lane on detour route, length of detour route, and traffic volumes on the LCC-effective optimum design. From the numerical investigations, it may be concluded that indirect costs caused by traffic network may sensitively influence on the LCC-effective optimum design of steel-box girder bridges. Therefore, it may be stated that the traffic conditions should be considered as one of the important items in the LCC-effective optimum design of the bridges.

**핵심 용어 :** 생애주기비용, 간접비용, 강상자형교, 최적화, 신뢰성해석

**KEYWORDS :** Life-Cycle Cost, Indirect Cost Model, Steel-Box Girder Bridge, Optimization, Reliability

### 1. 서 론

최근 국내에서는 강교의 취약점으로 알려져 있는 공용기간 중의 진동, 부식, 파로 등과 관련한 문제나 시공 시 초기비용

이 비경제적이라는 실무자들의 인식에도 불구하고 강교의 건설은 증가추세에 있다. 이는 고성능 강재의 개발과 이로 인한 강구조물의 질적 향상, 강교 건설기법의 급속한 발전, 강교의 효율적인 유지관리 기술의 발전에 기인한다고 할 수 있다.

1) 정회원, 한양대학교 대학원 박사과정  
(Tel:031-400-4027, Fax:031-406-5627, E-mail:kmlee1973@hanmail.net)

2) 정회원, 한양대학교 토크환경공학과 교수(ryfid@hanyang.ac.kr)

3) 정회원, 시설안전기술공단 부장(cjcha@kistec.or.kr)

4) 정회원, (주)포스코건설 차장(iseom@posenc.com)

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

또한 최근 강구조학회의 연구결과 (1997)에 의하면 강교의 건설비용이 콘크리트교에 비하여 낮아지고 있는 추세임이 보고된 바 있다. 이뿐 아니라 최근 이주형교 (Two Main Girder Steel Bridges)나 곡형강판형교 (Corrugated Steel Plate Girder Bridge)와 같은 새로운 형식의 강교량은 부부재의 수가 최소화되고 유지관리가 용이하기 때문에 생애주기비용 (Life-Cycle Cost: 이하 LCC) 측면에서 기존의 다른 형식의 강교에 비해 더 유리하다고 알려진 바 있다. 이와 같은 사실들을 종합해볼 때 최근 국내의 강교 건설에 대한 증가추세는 자연스러운 현상이라 할 수 있다.

이처럼 다방면으로 우수성을 가진 강교를 좀더 효과적으로 활용하기 위해서는 공용기간중의 강교의 유지관리도 중요하지만, 교량의 생애주기동안 획기적인 비용절감효과를 얻을 수 있는 설계단계에서 LCC를 고려한 최적설계가 이루어져야 한다. 하지만 대부분의 최적설계 연구는 주로 강교의 초기비용 최적설계에 대해서만 수행되어 왔으며, 실용적으로 활용을 위한 연구보다는 이론적인 측면만을 강조하거나 실제 강교의 설계 문제보다는 단순한 구조물에 대한 최적설계 알고리즘 개발에 관한 연구가 주를 이루어 왔다. 즉 지금까지도 강교에 대한 LCC 최적설계 모델에 대한 광범위한 연구가 이루어지지 않았기 때문에, 강교의 설계 시 LCC 효과를 고려할 수 있는 실용적인 모델이나 방법이 없는 실정이다. 이론적으로 정확한 강교에 대한 LCC를 산정하기 위해서는 생애주기동안의 시간에 따른 저항감소 (time-variant degrading resistance)와 극한 하중의 효과 (stochastic extreme load effects)를 정확히 반영한 강도, 페로, 부식, 국부좌굴, 안정 등의 다양한 한계상태에 대한 초과화률의 산정이 필요하다. 또한 이러한 시간변화에 따른 초과화률과 관련한 다양한 적·간접비용의 산정은 사용한 자료의 결핍이나 자료의 불확실성으로 인해 항상 어려움이 따른다. 이러한 이유로 대부분의 LCC 최적설계 관련한 연구들은 주로 실용적인 적용보다는 이론적인 문제에 대한 연구가 수행되고 있다. LCC최적설계와 관련한 연구로 Ellingwood와 Koskito (1997)는 신뢰성에 기초한 프리캐스트 콘크리트 구조의 LCC최적설계에 대한 연구를 수행한 바 있다. 하지만 LCC 최적설계 정식화에 있어서 실질적인 기대 간접손실비용을 고려하지 못한 단점을 가지고 있다. 최근 조효남 등(2001, 2003)은 강교의 LCC를 최소화하기 위한 최적설계 연구를 수행한 바 있다. 강교의 LCC 최적설계를 위한 정식화는 초기비용, 기대복구비용과 인적 혹은 물적 손실비용 등과 같은 기대비용, 도로이용자비용, 그리고 사회-경제 손실비용을 포함한 간접비용 등을 고려하였다. 특히 조효남 등(2003)은 교량구조물의 간접비용을 합리적으로 산정할 수 있는 개선된 비용함수 모델을 제안하였

으며, LCC 중에서 간접비용의 중요성을 강조하였고, 간접비용의 중요한 인자중에 하나인 교통량이 강교의 LCC 최적설계에 미치는 영향에 대해 비교분석을 수행하였다.

본 연구는 기존연구(조효남 등, 2003)의 후속 연구로서 실제 2경간 연속 강상자형교( $2@50m=100m$ )의 LCC 최적설계에 미치는 간접비용의 영향에 관한 연구를 수행하였다. 특히 본 연구에서는 간접비용을 산정하기 위해 실제 교통해석을 수행하였는데, 교통해석은 전반적인 교통망 분석을 고려할 수 있고, 도시 및 지역교통시스템 계획을 수행하는데 필요한 모든 요소가 갖추어진 범용 프로그램인 EMME/2(Intro Consultants Inc., Montreal, Canada)를 이용하였다.

## 2. 강교 LCC최적설계의 정식화

강교의 LCC 최적설계는 초기비용뿐만 아니라 현재가치로 환산된 생애주기 유지관리 비용과 구조물의 생애주기 동안의 기대 복구비용을 포함하는데, 이는 비용모델에서 고려된 강도, 페로, 사용성, 좌굴, 안정성 등과 같은 모든 한계상태와 관련하여 발생하는 모든 비용 뿐 아니라 그와 관련된 초과화률(혹은 과괴화률)의 산정을 필요로 한다. 이러한 총 기대 LCC는 다음과 같이 일반화된 형식으로 정식화 할 수 있다.

$$E[C_T(X)] = C_I(X) + E[C_M^L(X)] + \sum_{k=1}^K E[C_{FS_k}^L(X)] \quad (1)$$

여기서,  $E[C_T(X)]$  = 총 기대 LCC;  $X$  = 설계변수벡터;  $C_I$  = 초기비용;  $E[C_M^L]$  = 현재가치로 환산된 생애주기 유지관리 비용;  $E[C_{FS_k}^L]$  = 고려된 한계상태  $k$ 에 대한 생애주기 동안의 기대 복구비용

식 (1)에서 설계변수의 함수인 현재가치로 환산된 생애주기 유지관리 비용  $C_M^L$ 의 정확한 산정은 현실적으로 매우 어렵다. 일반적으로 현재가치로 환산된 생애주기 유지관리 비용의 기대치  $E[C_M^L]$ 는 초기비용의 비율을 적용하여 산정되어 왔다 (De Brito 등, 1995). 하지만 그들의 가정을 이용한다면 초기비용의 증가 혹은 감소함에 따라 유지관리 비용도 증가 혹은 감소할 것이다. 하지만 초기비용이 증가한다면 일반적으로 복구비용은 충분한 강도로 인하여 오히려 그 비용이 감소될 수도 있을 것이다. 또한 대부분의 경우 유지관리비용은 초기비용의 함수라기보다는 사용환경에 대한 연관관계가 크다. Wen과 Kang(1997)의 연구에 의하면 비록 생애주기

동안의 LCC에서 유지관리비용이 차지하는 비중은 크지만, 설계변수에 대한 유지관리비용과의 상관관계는 일반적으로 미약하기 때문에 LCC에서 유지관리 비용을 고려하지 않았음을 언급한 바 있다. 따라서 설계단계부터 유지관리비용을 정식화한다면 오히려 불확실성이 커질 것이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 LCC 정식화에 현재가치로 환산된 유지관리비용  $E[C_{FS_k}^t]$ 을 포함하지 않았다. 또한 식 (1)의 고려된 한계상태  $k$ 에 대한 생애주기 동안의 기대 복구비용  $E[C_{FS_k}^t]$ 을 구하기 위해서는 생애주기동안의 시간이력 신뢰성 해석(time variant reliability analysis)을 필요로 한다. 하지만 지진 혹은 태풍과 같은 자연재해(natural hazard)에 대한 LCC 정식화(Ang 등, 1997; 조효남 등, 2001)나 유지관리전략(maintenance strategy) 수립을 위한 LCC 정식화(Frangopol 등, 2001)인 경우를 제외하고는 시간불변신뢰성해석 (time invariant reliability analysis)도 근사적이지만 실용적으로 적용될 수 있다(조효남, 2003). 따라서 식 (1)의 총 기대 LCC는 유지관리비용은 제외하여 다음과 같이 간략화된 식으로 나타낼 수 있다.

$$E[C_T] = C_I + \sum_{k=1}^K E[C_{FS_k}] \quad (2)$$

한편 강교의 LCC최적설계문제의 정식화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimize } E[C_T(X)] \quad (3-a)$$

$$\text{Subject to } G_j(X) \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, J \quad (3-b)$$

$$P_{FS_k}(X) \leq P_{FS_{allow}} \quad k=1, 2, \dots, K \quad (3-c)$$

$$X^L \leq X \leq X^U \quad (3-d)$$

여기서,  $X$  = 두께, 길이, 물량과 같은 설계변수 벡터;  $G_j(X)$  =  $j$ 번째 제약조건;  $J$  = 제약조건의 수;  $X^U$ ,  $X^L$  = 설계변수 벡터들의 한계 제약조건;  $P_{FS_k}$  = 고려된 한계상태  $k$ 의 초과확률(혹은 파괴확률);  $P_{FS_{allow}}$  = 허용파괴확률

## 2.1 초기비용(Initial Cost)

초기비용은 계획과 설계, 구조물의 기초, 상부구조물, 하부구조물, 부대시설 등과 같은 교량의 구조적 혹은 비구조적 구성요소의 설계와 시공, 시공 후 감리비 등과 같이 일반적으로

교량이 준공되기 전까지 발생하는 비용으로 관리주체가 최초에 투자하는 기본적인 매개변수를 의미한다. 이러한 초기비용은 다른 LCC 비용항목에 비해서는 비교적 쉽게 근사적으로 추정할 수 있다고 판단된다. 일반적으로 이러한 초기비용은 다음의 식으로 정식화 될 수 있다.

$$C_I(X) = C_{ID}(X) + C_{IC}(X) + C_{IT}(X) \quad (4)$$

여기서,  $C_{ID}$  = 계획·설계비용;  $C_{IC}$  = 시공 혹은 건설비용;  $C_{IT}$  = 감리비용

식 (4)에서 시공비용은 실제 구조물의 시공에 포함되는 노동비, 재료비, 장비비, 공사현장관리비와 품질관리비용 전부를 포함해야 한다. 시공비용을 제외한 계획·설계비용과 감리비용 등은 시공비용의 규모에 따라 국내의 설정이 반영된 엔지니어링 사업대가기준(과학기술부, <http://www.cmcost.com>, 2001)에 제시되어 있는 해당 요율을 적용하여 산정 할 수 있다.

## 2.2 기대 복구비용 (Expected Rehabilitation Cost)

기대 복구비용은 교량의 생애주기동안 발생할 수 있는 다양한 종류의 한계상태가 초과할 때 발생한다. 비록 이러한 한계상태들은 일반적인 교량의 사용환경에서는 발생할 수 없지만, 기대 복구비용을 고려한다는 것은 보험비용의 개념으로 경제분석측면에서 고려될 필요가 있다(Melchers, 1987). 이러한 기대 복구비용은 고려된 한계상태에 대한 초과확률(혹은 파괴확률)과 직·간접 복구비용을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[C_{FS_k}(X)] = P_{FS_k}(X) \cdot C_{FS_k}(X) \quad (5)$$

여기서,  $P_{FS_k}$  = 한계상태  $k$ 에 대한 초과확률(혹은 파괴확률);  $C_{FS}$  = 직·간접 복구비용

한편 직·간접 복구비용  $C_{FS_k}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{FS_k}(X) &= C_{DR_k}(X) + C_{IR_k}(X) \\ &= C_{DR_k}(X) + [C_H \cdot r_{r_k}(X) + C_U(t_{r_k}(X)) + C_E(t_{r_k}(X))] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $C_{DR}$  = 직접 복구비용;  $C_{IR}$  = 간접 복구비용;

$C_H$  = 인적 혹은 물질적 손실비용;  $C_U$  = 도로이용자비용;  
 $C_E$  = 사회·경제 손실비용;  $r_{r_k}$  = 복구 공사기간동안의 사고율;  $t_{r_k}$  = 복구공사기간

식(6)에서 직접복구비용  $C_{DR}$ 는 건설계약연구원(<http://www.csr.co.kr>)의 가격정보, 건설분야에 종사하는 전문가들의 견해, 그리고 다양한 참고문헌 (서울특별시 건설안전관리본부, 2002; 시설안전기술공단, 2000 등)과 같은 여러 자료에 근거하여 산정할 수 있다. 그리고 인적 혹은 물질적 손실비용  $C_H$ 는 복구공사동안의 교통사고에 의한 손실비용으로 인적자본법 (Human Capital Approach)에 근거한 교통개발연구원의 연구 결과 (이수범/심재익, 1997) 와 평상시와 복구공사 기간 중 사고율 데이터를 토대로 하여 근사적으로 산정 할 수 있다 (<http://traffic.metro.seoul.kr>).

## 2.3 간접비용

### 2.3.1 도로이용자비용

도로이용자비용은 교량의 시공, 보수·보강, 재시공 등의 복구를 위하여 교량의 일시적인 교통통제 및 우회시 도로의 이용자에게 부담되는 비용이다. 일반적으로 도로이용자 비용은 그림 1과 같이 차량운행비용 (Vehicle Operating Cost), 시간지연비용 (Time Delay Cost), 사고비용 (Accident Costs), 불편함의 비용 (Comfort and Convenience Costs), 환경영향비용 (Environmental Costs) 등의 5개 주요 비용 항목으로 구성된다 (Berthelot et al., 1996). 그 항목 중 시간지연비용과 차량운행비용은 일반적으로 도로이용자비용의 중요비용 항목으로서 고려되어 왔다 (De Brito 등, 1998; Cho et. al., 2001b, 조효남, 2003). 본 연구에서도 기존 연구(조효남, 2003)에서 제안된 바와 같이 다음과 같은 시간지연비용과 차량운행비용만을 고려하였다.

$$C_U = C_{TDC} + C_{VOC} \quad (7-a)$$

$$C_{TDC} = \left[ \sum_{i=1}^I \left\{ \sum_{j=1}^J n_{P_{ij}} \cdot T_{0j} \cdot u_{1_{ij}} \right\} \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^I r_i \right) \cdot \Delta t_{d0} + \sum_{i=1}^I \left\{ \sum_{j=1}^J r_i \cdot n_{P_{ij}} \cdot T_{0j} \cdot u_{1_{ij}} + n_{P_{ij}} \cdot T_{ij} \cdot u_{1_{ij}} \right\} \cdot \Delta t_{di} \right] \quad (7-b)$$

$$C_{VOC} = \left[ \sum_{i=1}^I \left\{ \sum_{j=1}^J T_{0j} \cdot u_{2ij} \right\} \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^I r_i \right) \cdot \Delta t_{d0} + \sum_{i=1}^I \left\{ r_i \cdot \sum_{j=1}^J (T_{0j} \cdot u_{2ij} + T_{ij} \cdot u_{2ij}) \right\} \cdot \Delta t_{di} + \sum_{i=1}^I \left\{ r_i \cdot \sum_{j=1}^J [T_{0j} \cdot (u_{3ij} l_d - u_{4ij} l_{d0}) + T_{ij} \cdot u_{2ij}] \right\} \cdot \Delta t_{di} \right] \quad (7-c)$$

$$\Delta t_{di} = \frac{L_{di}}{v_{d_{si}}} - \frac{l_{di}}{v_{d_{si}}}, \quad \Delta t_{d0} = \frac{l_0}{v_{0_{si}}} - \frac{l_{d0}}{v_{0_{si}}} \quad (7-d)$$

여기서,  $i$  = 교통 네트워크의 경로에 대한 인덱스;  $j$  = 차량의 종류에 대한 인덱스 (업무 혹은 비업무 자가용, 택시, 버스, 버스, 소형트럭, 대형트럭 등);  $n_{P_{ij}}$  = 재차인원;  $T_{ij}$  = 일일평균교통량 (Average Daily Traffic, ADT);  $u_{1ij}$  = 도로이용자의 평균시간가치;  $u_{2ij}$  = 각 차종에 따른 운전자 평균급여;  $u_{3ij}$  = 각 우회경로의 단위 길이 당 평균 유류비용;  $u_{4ij}$  = 대상교량이 속해있는 경로의 단위 길이당 평균 유류비용;  $r_i$  = 대상교량이 속해있는 경로에서  $i$  번째 우회경로로의 우회율;  $\Delta t_{d0}$  = 대상교량이 속해있는 경로의 추가적인 시간지연;  $l_0$ ,  $l_{di}$  = 대상교량이 속해있는 경로의 길이 및 우회경로의 길이;  $v_{0_{si}}$ ,  $v_{d_{si}}$  = 정상상태 및 복구공사 시 상태에서 대상교량이 속해있는 경로의 교통속도;  $v_{d_{si}}$ ,  $v_{d_{si}}$  = 정상상태 및 복구공사 시 상태에서 우회경로의 교통속도

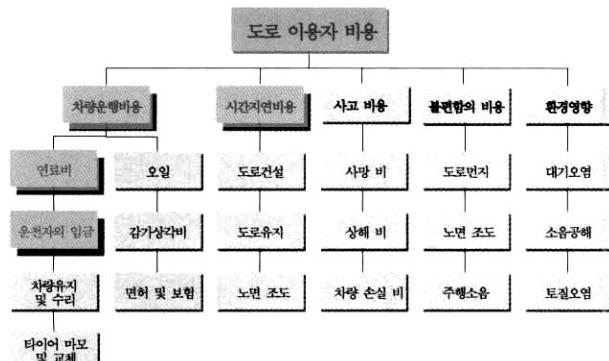


그림 1. 도로이용자비용 구성항목(Berthelot et al., 1996)

식 (7)에서 나타난 바와 같이 도로이용자비용을 산정하기 위해서는 강교의 복구공사로 인한 차량통제 조건에 따른 주도로 및 우회도로에서의 차량속도, 우회율 등의 값을 필요로 한다. 하지만 이러한 데이터는 교통 네트워크의 교통량, 우회도로 수, 각 우회도로의 차로수(혹은 도로의 교통용량) 및 길이 등에 따른 복잡한 함수로서 실제 교통해석을 수행하여 얻을 수 있다. 이에 본 연구에서는 교통해석프로그램인 EMME/2 v5.1 (Inro Consultants Inc., Montreal, Canada)을 이용하였다. EMME/2 v5.1을 이용하여 교통해석을 수행하기 위해서는 교통 네트워크에서 교통이 발생하는 O-D(Origin-Destination)에서의 교통량과 주도로 및 우회도로의 위치, 차선수 등의 입력이 필요하다. 또한 해석에서 중요한 것은 도

로 특성에 적합한 교통용량과 통행시간을 특징지어 줄 수 있는 시간지연함수(volume delay function)와 흐름해석동안의 우회율을 위한 이론적인 모델이 정의되어야 한다. 시간지연함수는 경기개발연구원(1999)에서 국내도로 특성에 따라 개발된 모델을 교통해석 조건에 따라 사용될 수 있다. 한편 우회율은 All-or-Nothing법, 반복과정법(iterative assignment), 분할배분법(incremental assignment), 다중경로 배분법(multi pass assignment), 확률적 통행배분법(probability assignment) 다양한 모델들이 적용될 수 있는데, 공통적인 특징은 최소통행에 교통량이 배분된다는 기초적인 개념에 입각하고 있다(원제무, 2000). 본 연구에서는 이론이 단순하여 적용이 용이하고, 총 교통흐름의 관점에서 최적의 통행배분 상태에 대한 검토가 가능한 All-or-Nothing 방법을 사용하였다.

### 2.3.2 사회-경제손실비용

사회-경제적손실비용은 교량이 복구공사로 인해 재기능을 다하지 못하는 경우 발생되는 경제적인 파급효과의 결과이다. 기존 연구(조효남 등, 2003)에서 제안된 바와 같이 교량의 복구공사 기간동안의 지역의 산업 생산력을 저하시킴으로서 발생하는 직접적 사회-경제손실인 1차 손실  $C_{E1}^{loss}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{E1}^{loss} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \varepsilon_{ij} Y_{ij}^{loss} \quad (8)$$

$$= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \varepsilon_{ij} \left[ \left( \frac{\sum_{k=1}^K T_{ik} \cdot n_{pk} \cdot \Delta t_d}{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K T_{ik} \cdot n_{pk}} \right) \cdot \left( \frac{1}{t_{IO}} \right) \cdot v_{ij} \right] \cdot Y_{ij}^P$$

여기서,  $i$  = 교통 네트워크에 속해 있는 우회도로에 대한 인덱스;  $j$  = 산업연관표의 지역과 관련된 인덱스;  $k$  = 차량의 종류에 대한 인덱스;  $\varepsilon$  = 산업의 중요도 계수;  $Y^P$  = 일반적인 상태에서의 경제적인 산출(out put);  $t_{IO}$  = 산업연관표에 고려된 시간간격;  $v$  = 산업별 종사하는 근로자의 비율;  $T$  = ADT;  $n_{Pj}$  = 재차인원;  $\Delta t$  = 복구공사로 인한 시간지연 (식 7-d)

1차 손실의 결과로서, 한 산업에서 경제적인 산출능력의 손실은 그 산업으로부터 투입을 받는 다른 산업의 생산성을 저하시키는 경향이 있다. 따라서 이러한 항목은 다음과 같은 2차손실  $C_{E2}^{loss}$ 를 유발시킨다.

$$C_{E2}^{loss} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [\varepsilon_{ij} (Y_{ij}^* - Y_{ij}^d)] \cdot Y_{ij}^P \quad (9-a)$$

$$Y^d = (I - A^*)^{-1} d^* \quad (9-b)$$

여기서,  $Y^* = Y^P - Y^{loss}$ 로 산정되는 산출값의 변화;  $Y^d = 1$ 차손실로 인한 새로운 산출수준;  $d^* = (I - A^*) Y^*$ 로 산정되는 새로운 투입수준;  $A^* = (Y^* / Y^P) A$ 로 산정되는 복구 기간동안 투입계수 매트릭스;  $A = I - O$  모델의 투입 계수 매트릭스

사회-경제 손실비용은 식(8)~(9)를 이용하여 합리적으로 평가 될 수 있을 것이다. 하지만 사회-경제 손실의 평가를 위해서는 특정지역에 대한 교통해석 뿐 아니라 산업연관표(혹은 투입-산출 테이블), 직종분포 등의 자료와 방대한 매트릭스 연산이 필요하기 때문에 이러한 모델들을 매번 비용해석 시마다 적용하는 것은 대단히 어렵고 실용적이지 못하다. 특히 국내의 경우는 서울을 제외한 지역별 산업연관표는 작성되어 있지 않아 더욱 적용이 난해하다. 따라서 근사적인 방법으로 참고문헌(Seskin, 1990)의 결과가 적용될 수 있다. 참고문헌에 제시된 연구결과는 도로이용자비용에 대한 비율로 제시하고 있는데, 대도시의 경우는 약 150%, 중소도시는 100%, 소도시 이하는 50% 정도로 제시되어 있다.

## 3. 신뢰성 해석과 최적설계 알고리즘

### 3.1 강교의 신뢰성해석 모델

식 (2)를 이용한 기대 복구비용을 산정하기 위해서는 비용모델에서 고려된 모든 한계상태에 대한 초과화률(혹은 파괴화률)의 산정이 필요하며, 따라서 신뢰성 해석(Reliability Analysis)이 필요하다. 이러한 비용함수에 고려된 강교의 휨강도, 전단강도, 사용성, 피로, 국부좌굴과 같은 한계상태는 각 한계 상태에 대한 정식화가 필요하다.

예를 들어 강교 주형의 휨 또는 전단의 강도에 대한 한계상태는 각각 플랜지 및 복부의 극한한계상태로서 정의될 수 있다. 따라서 합성형 강교의 경우에 대한 강도 한계 상태는 다음과 같이 정식화 될 수 있다.

주형의 휨강도,

$$g(\cdot) = M_{G_u} - (M_{G_d} + M_{G_f}) \quad (11)$$

여기서,  $M_{G_u}$ ,  $M_{G_d}$  = 각각의 설계 사하중과 활하중에

의한 주형의 휨모멘트:  $M_{G_u} = \gamma_m \cdot Z \cdot F_y$ 로 산정되는  
극한 휨강도:  $Z =$  단면의 소성모멘트:  $F_y =$  항복응력:  
 $\gamma_m =$  강도감소계수

주형의 전단강도,

$$g(\cdot) = S_{G_u} - (S_{G_d} + S_{G_f}) \quad (12-a)$$

$$S_{G_u} = 0.58 F_y D t_w, \quad \left( \frac{D}{t_w} < 2.46 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \quad (12-b)$$

$$S_{G_u} = 1.48 t_w^2 \sqrt{E F_y}, \quad \left( 2.46 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{D}{t_w} < 3.07 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right), \quad (12-c)$$

$$S_{G_u} = \frac{4.55 t_w^3 E}{D}, \quad \left( \frac{D}{t_w} > 3.07 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \quad (12-d)$$

여기서,  $S_{G_u}$ ,  $S_{G_d}$  = 각각 설계 사하중과 활하중에 의한  
메인거더의 전단력;  $S_{G_f}$  = 다음과 같이 표현되는 극한전단강  
도;  $t_w$  = 복부의 두께;  $D$  = 복부의 길이;  $E$  = 탄성계수

여기서 주의해야 할 점은 강교의 강도 한계 상태에 대한  
신뢰성 해석을 수행함에 있어 LCC 정식화에 고려된 이벤트  
(Event)가 반영되어야 한다는 것이다. 일반적으로 교량시  
템의 신뢰성 해석은 붕괴에 대한 파괴화률(혹은 초파괴화률)을  
구하기 위해 전단과 휨모멘트로 구성된 직-병렬 시스템  
(Parallel-Series System) 모델이 사용되어왔다. 하지만 강  
도에 대한 기대 복구비용을 산정하기 위한 초파괴화률은 교량시  
템의 붕괴가 아니라 국부의 강도한계상태에 대한 사항을 고  
려해야 하기 때문에 시스템의 신뢰성 해석(System  
reliability Analysis)보다는 요소신뢰성해석(Element  
reliability Analysis)에 의한 파괴화률을 적용하는 것이 더  
욱 적합하다 할 수 있다.

한편 주형 시스템의 사용성 한계상태는 한계처짐에 의해  
정의되며 이는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$g(\cdot) = \delta_{all} - \delta_L \quad (13)$$

여기서,  $\delta_{all}$  = 시방서에서 제시한 허용 처짐;  $\delta_L$  = 활  
하중에 의한 처짐

이상의 교량의 강도나 사용성 한계상태에 대한 신뢰성 해  
석을 수행하는데 있어서는 시뮬레이션방법 (simulation  
method), 수치적분방법 (integration method), 반복법  
(iterative numerical method) 등의 다양한 방법이 사용될  
수 있다 (Ang, 1984). 이중에서 반복법의 일종인 개선된 1

계-2차 모멘트(Advanced First-Order Second-Moment, AFOSM)방법이 실용적으로 사용될 수 있다.

한편, 강교량의 경우 피로한계상태는 다른 어느 한계상태  
보다 지배적인 요소 중에 하나이다. 이러한 피로한계상태에  
대한 정확한 신뢰성 해석을 위해서 사용될 수 있는 방법 중에  
하나는 다음의 식과 같은 Zhao와 Haldar (1994)가 제안한  
피로로 인한 파괴 메커니즘에 기초한 방법이 사용될 수 있다.

$$g(\cdot) = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{\left[ F\left(\frac{a}{b}\right) \sqrt{\pi a} \right]^m} - C \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{S} \right)^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) (N - N_0) \quad (14)$$

여기서,  $F\left(\frac{a}{b}\right)$  = 기하학적 함수,  $a$  = 균열의 크기,

$b$  = 구성요소의 폭;  $C$ ,  $m$  = 피로균열 성장 매개변  
수;  $\bar{S}$  = 인장응력 범위  $S$ 의 평균치 ( $S$ 는 교량 구조물의  
Rayleigh 분포를 따름);  $\Gamma(\cdot)$  = 감마함수;  $N_0$  = 초기  
균열 성장 시간에서 응력 사이클의 수;  $N$  = 피로수명

하지만 식 (14)는 피로원인규명을 위한 정확한 피로 신뢰  
성 해석을 위한 용도로 주로 사용되며, 강교의 설계단계는 정  
확한 신뢰성 해석을 수행하기보다는 근사적이지만 실용적인  
식을 사용하는 것이 더욱 효과적이다. 이러한 경우에는  
Pedro Albrecht의 S-N 피로신뢰성 (Albrecht, 1983) 설  
용식이 효과적으로 적용될 수 있다.

$$\beta = \frac{\log N - \log N_d}{\sqrt{(S_R)^2 + m(S_Q)^2}} \quad (15)$$

여기서,  $\beta$  = 신뢰성 지수;  $N$ ,  $N_d$  = 각각 등가 응력  
범위와 하중 사이클에 대한 사이클의 수;  $S_R$ ,  $S_Q$  = 저  
항과 하중의 사이클의 수의 표준편차;  $m$  = S-N 선도의 경  
사(변환계수)

### 3.2 강교의 LCC최적설계 알고리즘

그림 2는 강교의 LCC 최적설계를 위해 일반적으로 사용  
될 수 있는 최적설계 알고리즘이다. 그림에 나타난 바와 같이  
LCC 최적설계 알고리즘은 구조해석모듈(Structural Analysis),  
신뢰성해석모듈(Reliability Analysis), 최적설계모듈(Optimi  
zation), 그리고 LCC 산정모듈(LCC Evaluation)로 구성  
되어있다. 그러나 실제로 강교는 부재수가 많고 복잡한 구조  
거동을 보이고 있어서, LCC 최적설계 문제와 같은 최적화

문제에 일반적인 알고리즘을 그대로 적용하는 것은 계산상의 효율성면에서 비효율적이다. 따라서, 설계변수 연결기법(variable linking method), 제약조건소거기법(constraint deletion method), 구조해석 기법(structural reanalysis technique)과 같은 다양한 근사화 기법(approximation technique)과 다단계 최적설계 기법(multi-level optimization method)이 계산상의 효율성을 증대시키기 위해 사용될 수 있다. 지면의 제한으로 각각의 기법에 대한 설명은 생략하였으나 참고문헌(정지승, 1999; 이광민, 2000)에서 구체적으로 찾아볼 수 있다.

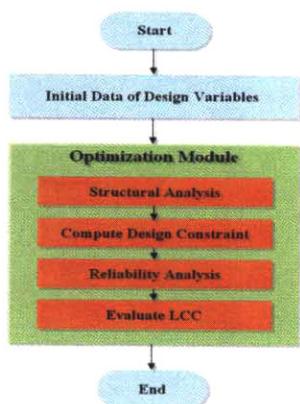


그림 2. 일반적인 강교의 LCC 최적 알고리즘

#### 4. 수치예제 및 고찰

##### 4.1 가정사항

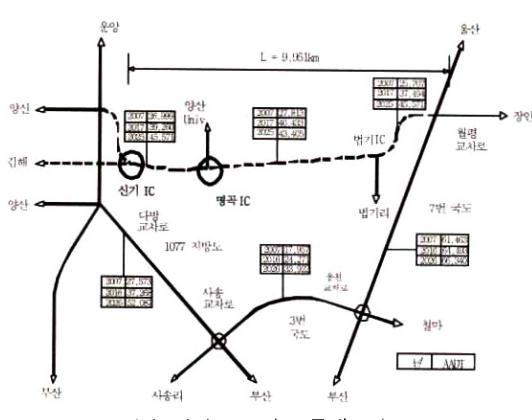
본 연구에서는 실제 2경간 연속 강상자형교(2@50m = 100m)의 LCC 최적설계 문제에 적용하였고, 기존의 설계 방법들과 LCC의 비용-효율성에 대해 비교·고찰하였다. 또한 본 논문에서는 LCC에서 큰 비중을 차지하는 간접비용이 강상자형교 LCC 최적설계에 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 교량이 속해 있는 도로의 네트워크(우회도로수) 및 우회도로 조건(우회도로 차로수 및 길이), 교통량 등과 같은 교통 조건의 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다.

대상 교량은 비교적 적은 평균일일교통량 (Average Daily Traffic, ADT)을 가지는 경상남도 양산의 고속도로 상에 건설된다고 가정하였다. 그럼 3은 대상교량이 시공된 인접 고속도로망과 이를 EMME/2을 이용하여 모델링한 그림을 보여주고 있고, 표 1은 시공 후 20년 동안의 예측된 교통량을 나타내고 있다. 이와 같은 대상교량의 일반사항은 표 2에 나타내었으며, 그림 4에는 대상 교량의 단면도와 및 평면도 및 설계그룹을 나타내었다.

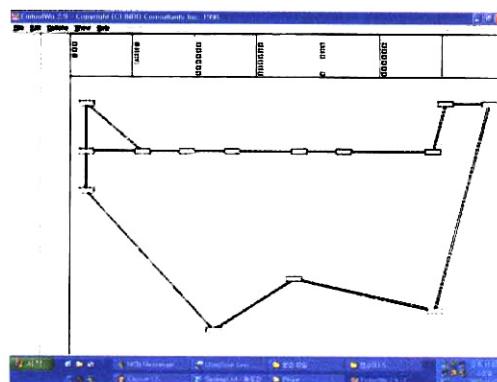
표 1. 향후 20년간 기대 ADT

Year	2007	2011	2015	2019	2023	2027	Year	2007	2011	2015	2019	2023	2027		
승용차	I	15,419	18,487	21,276	23,850	25,936	26,758	트럭	I	10,057	11,984	13,531	14,882	15,883	16,238
	II	15,606	19,047	21,914	24,562	26,711	27,557		II	10,360	12,347	13,937	15,325	16,358	16,723
	III	14,424	17,596	20,262	22,716	24,703	25,486		III	9,576	11,406	12,886	14,174	15,129	15,467
버스	I	1,793	2,076	2,290	2,456	2,554	2,575		I	10,057	11,984	13,531	14,882	15,883	16,238
	II	1,847	2,139	2,358	2,529	2,630	2,653		II	10,360	12,347	13,937	15,325	16,358	16,723
	III	1,707	1,977	2,180	2,339	2,423	2,452		III	9,576	11,406	12,886	14,174	15,129	15,467

I: 신기IC ~ 명곡  
II: 명곡 IC ~ 법길 IC  
III: 법기 IC ~ 월평



(a) 인접 도로의 교통네트워크

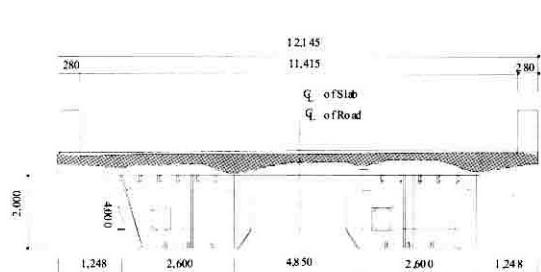


(b) 교통해석 모델ing

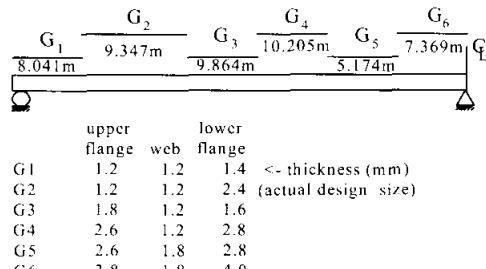
그림 3. 대상교량 인접 도로의 교통네트워크 및 교통해석 모델링

표 2. 대상교량의 일반 데이터

교량형식	2경간 연속 강상자거더교		
교량 연장(m)	50+50=100m	강 재원	SM520 ( $f_a = 1,900 \text{kgf/cm}^2$ or 186 KN/m <sup>2</sup> )
교량 폭(m)	10.5m	콘크리트	강도: 270kgf/cm <sup>2</sup> or 26.5 KN/m <sup>2</sup> 계수비 : 8 철근: SD40
최대 반경	75m		
차선수	4		
Box의 수	2		
설계 하중	DB/DL-24		



(a) 단면도



(b) 종단면도와 설계 그룹

그림 4. 강박스거더교의 단면도 및 종단면도와 설계그룹

그림 5는 강상자형 교량의 LCC최적설계에 사용된 설계변수들을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구에서 주형의 설계변수는 그림 4(b)의 설계그룹별로 상·하부 플랜지의 두께( $t_{fu}$ ,  $t_{fl}$ ), 복부판의 두께( $t_w$ )와 높이( $h_w$ )를 설계변수로 하였다.

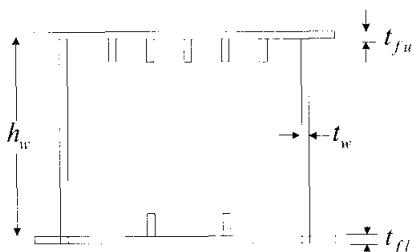


그림 5. 강박스거더교의 설계변수

한편 대상교량의 LCC 최적설계를 수행함에 있어 주형의 최적설계를 위한 제약조건은 거동제약조건과 한계제약조건을 고려하였고, 이는 도로교설계기준(건설교통부, 2000)에 근거하여 다양한 허용응력, 조합응력 한계, 피로응력, 국부좌굴 그리고 시공한계를 고려하였다.

마지막으로 LCC최적설계 문제를 풀기 위해 사용된 최적화 방법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM (Augmented Lagrange Multiplier)방법과 BFGS (Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno)방법을 사용하였다. 또한 단일변수함수의

최적해탐사는 황금분할법 (Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS (Automated Design Synthesis; Vanderplaats, 1986)를 이용하여 수행하였다.

#### 4.2 각 대상 교량의 생애주기비용의 산정

강박스거더교의 초기비용을 산정하기 위한 단위건설비용은 적용기준은 '종합물가정보'(2003년 1월)를 근거하여 표 3에 나타나 있다. 그리고, 설계비용과 재하시험비용은 각각 시공비용의 7%와 3%로 가정하였다(De Brito 등, 1995). 하지만 정확한 설계비용과 재하시험 내용을 산정하기 위해서는 실제 적산을 통해서도 구할 수 있다.

표 3. 대상교량들의 단위 건설 비용  
(건설계약연구원, <http://www.csr.co.kr>)

교량형식	강박스거더교		
구성요소	주형	콘크리트 바닥판	철근
단위 시공 비용( $\times 10,000\text{원}$ )	192 /ton	44.7/m <sup>3</sup>	165 /ton

앞서 언급된 바와 같이 복구비용은 직접 복구비용과 간접 복구비용으로 분류할 수 있다. 직접 복구비용은 LCC에 고려

된 한계상태가 초과된 경우에 발생하는 직접적인 보수, 보강 혹은, 교체 비용이며, 간접적 복구 비용은 인적 혹은 물적손 실비용, 도로이용자 비용, 간접적 사회-경제적 손실로 분류된다.

본 연구에서는 복구비용의 산정에 필요한 한계상태 초과화 률을 구하기 위해 주형의 강도 및 피로 한계상태를 고려하였는데, 표 4에는 대상교량인 강박스거더교의 LCC 산정을 위해 고려된 한계상태에 대한 직·간접 복구 비용산정을 위한 데이터(보수·보강방법, 단위 보수·보강 비용, 보수보강 공사기간, 교량구간 교통지연)를 정리하여 놓았다. 이와 같은 데이터는 건설계약연구원 (<http://www.csr.co.kr>)의 가격정보, 건설업에 종사하는 해당 분야 전문가의 견해, 참고문헌 (서울특별시 건설안전관리본부, 2002; 시설안전기술공단, 2000) 등의 다양한 자료를 바탕으로 하였다.

표 4. 강박스거더교의 직·간접 복구 비용산정을 위한 데이터  
(서울특별시 건설안전관리본부, 2002; 시설안전기술공단, 2000)

한계상태	강도	피로
보수·보강 방법	보강	Bolting
단위 보수·보강 비용 (×10,000원)	19.2 /ton 3.12 /ton (폐기)	450 / 개소
보수·보강 공사기간 (월)	5	3주
교통통제	2차선 차단	-

한편 표 5에는 간접복구비용 산정을 위한 주요 인자에 대한 값과 참고자료를 전문가 설문조사에 의해 나타내었다. 표 4와 5의 데이터를 적용하여 표 6에는 대상교량의 설계 초기치에 대한 직·간접 복구 비용의 산정 결과를 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 국내의 경우는 간접 복구비용 산정에서 서울을

제외한 지역별 산업연관표는 작성되어 있지 않아서 참고문헌 (Seskin, 1990)의 결과가 본 적용예에 사용되었다. 양산의 경우는 비교적 교통량이 적은 소도시 (혹은 지방)에 위치해 있기 때문에 사회-경제적 손실은 도로 이용자 비용의 50%로 가정하였다. 표 6에서 제시된 바와 같이 교통통제가 발생하는 경우인 주형의 보강에 대한 간접 복구비용은 총 복구비용의 97%정도로 나타났는데, 교통통제가 발생하는 복구공사의 경우에는 간접비용이 LCC 산정에 있어서 매우 중요한 요소임을 쉽게 알 수 있다.

표 5. 간접 복구비용 산정에 사용되는 주요인자

요소	값	단위	참고자료
교통 사고 비용	1.2	억원	한국교통개발 연구원 ( <a href="http://traffic.metro.seoul.kr">http://traffic.metro.seoul.kr</a> )
복구 공사중 교통 사고율	220	만대/km	
평상시 교통 사고율	190	만대/km	
사망 비용	35	억원	
부상 비용	2100	만원	이수범 & 심재익 (1997)
운전자 시간당 평균급여	21.517	원/인	한국교통개발 연구원

표 6. 강박스거더교의 복구 방법에 따른 비용

복구 방법	보강	Bolting
직접 복구 비용(×10,000원)	38,196 (2.6%)	450 (100%)
간접 복구 비용(×10,000원)	1,425,450 (97.4%)	-
총 복구 비용(×10,000원)	1,463,646 (100%)	450 (100%)

표 7. 한계상태 함수에 고려된 변수들의 통계적 불확실데이터

변수	Bias <sup>a</sup>	C.O.V <sup>b</sup>	분포형태
콘크리트의 단위중량	1.05	0.02	정규분포
아스팔트의 단위중량	1.00	0.25	정규분포
강재의 단위중량	1.03	0.078	정규분포
활 갑소 계수	1.11	0.115	정규분포
전단 갑소 계수	1.14	0.12	정규분포
강재의 항복 응력	1.11	0.12	정규분포
$S_r = \sqrt{(S_R)^2 + m(S_Q)^2}$	B <sup>c</sup>	0.2217	대수정규분포
	C <sup>c</sup>	0.1718	대수정규분포
충격 계수	0.88	0.10	정규분포
활하중	1.24	0.25	대수정규분포

<sup>a</sup>Bias : 평균공칭비; <sup>b</sup>C.O.V : 변동계수; <sup>c</sup>용접상세 (도로교설계기준, 2000)

표 8. 강박스거더교의 각 Case 별 최적설계 결과

Case	재래적 설계 (Case A)	초기비용 최적설계 (Case B)	LCC 최적설계			동가 LCC 최적설계 (Case F)
			(Case C)	(Case D)	(Case E)	
복부의 높이(m)	2.20	2.60	2.60	2.85	2.85	2.90
상부플랜지 두께 / 복부두께 / 하부플랜지두께 (mm)	설계그룹1 (G1)	12/12/24	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10
	설계그룹2 (G2)	12/12/24	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10
	설계그룹3 (G3)	18/12/16	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10
	설계그룹4 (G4)	26/12/28	10/10/10	10/10/10	10/10/18	10/10/18
	설계그룹5 (G5)	26/18/28	12/10/18	10/10/26	10/10/26	10/10/24
	설계그룹6 (G6)	38/18/40	20/18/16	22/18/34	22/18/34	22/18/32
비용(억원)	초기비용	10.8601	8.3965	8.405	8.9685	8.9861
	기대보강비용	0.0048	10.2714	9.2471	0.0041	0.0046
	기대파로비용	10.1615	53.0068	53.2257	0.0895	0.1063
	총기대 LCC	21.0264	71.6747	70.8778	9.0621	9.097
						9.0314

#### 4.3 통계적 불확실데이터

본 연구에서 고려된 한계상태의 초과화률을 구하기 위해 고려된 한계상태 함수를 구성하고 있는 변수의 통계적 불확실데이터(분포함수의 형태, 평균공칭비, 변동계수 등)는 불확실량의 본질적인 특성이나 관련데이터의 부족으로 인하여 국내·외의 관련연구(조효남, 1989; Hart, 1982; Estes, 1997; Nowak, 1993)를 참조하였고, 주로 경험과 판단에 의존하여 국내의 현실을 고려하는 값으로 추정하여 표 7에 나타내었다.

#### 4.4 최적설계 결과 및 고찰

##### 4.4.1 강상자형교의 설계방법에 따른 LCC최적설계 결과

강상자형교의 LCC 최적설계에 있어서 비용-효율성에 대한 비교 및 고찰을 위해 다음과 같은 다양한 경우에 대해 고찰해 보았다: (1) 재래적 설계 (Case A); (2) 초기비용 최적설계 (Case B); (3) 직접 복구비용만을 고려한 LCC최적설계 (Case C); (4) 사회-경제 손실비용을 제외한 간접 복구비용을 고려한 LCC최적설계 (Case D), (5) 모든 비용을 고려한 LCC 최적설계(Case E). 표 8은 이상의 5가지 Case에 대한 최적설계 결과를 나타내고 있다.

동가 LCC 최적설계(equivalent LCC optimum design)를 얻기 위해 실제 재래적 설계에서 사용되는 응력한계와 같은 적정 허용응력비가 사용될 수 있으므로 (조효남 등, 1998), 적정응력비가 적용된 초기비용 최적설계와 LCC 최적설계 결과를 비교·분석하기 위해 주형에 대해서는 허용응력

의 60%~100%변화에 따른 초기비용 최적설계를 수행하였다. 각각에 대한 총 기대 LCC를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보여주는 바와 같이 본 적용 예와 같은 구조물에서는 허용응력적용비율로 80%를 적용한 초기비용 최적설계 (Case F)가 T 최적 LCC 설계로 이루어짐을 알 수 있다.

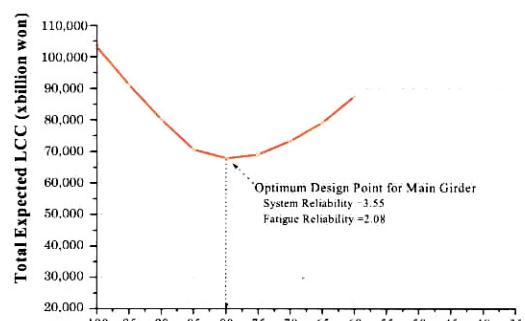


그림 6. 허용응력비 및 강도감소계수에 변화에 따른 초기비용 최적설계의 LCC

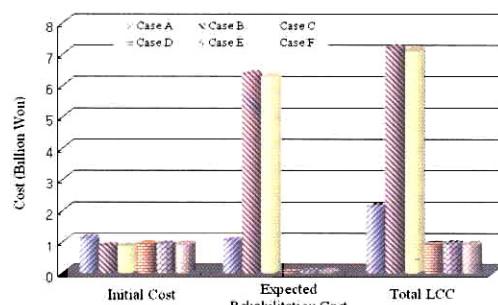


그림 7. 각 Case별 초기비용, 기대복구비용, LCC

이상의 결과들은 표 8과 그림 7에 나타내었는데, LCC 최적설계의 결과(Case D, E)와 거의 유사함을 알 수 있다. 표 8에 나타낸 바와 같이 사회-경제 손실비용을 제외한 간접 복구 비용을 고려한 LCC 최적설계인 Case D의 경우와 같이 복구 비용에서 사회-경제 손실비용이 고려되지 않더라도 모든 비용을 고려한 LCC 최적설계인 Case E의 총 기대 LCC가 0.4%정도의 차이를 보이면서 거의 유사하게 나타났다. 한편 초기비용 최적설계인 Case B와 직접 복구비용만을 고려한 LCC최적설계인 Case C의 총 기대 LCC도 2.9%의 미소한 차이를 보이고 있다. 이러한 결과를 볼 때 기대 복구비용의 산정에 있어서 간접 복구비용이 고려되지 않는 경우는 초기비용에 지배되어 나타난 결과로 판단된다. 결국 간접 복구비용은 전체 복구비용에 지배적인 역할을 하고 있기 때문에 강교와 같은 기반시설의 LCC최적설계에서는 간접 복구비용이 필히 포함되어야 할 것으로 판단된다.

표 8에는 각 Case에 따른 설계변수의 최적값들을 나타내고 있다. 주형의 최적설계 결과들을 검토해 보면, 복부의 높이는 Case B와 C의 경우 2.60m로 설계되었고, Case D와 E는 2.85m로 설계되었다. 즉 Case D와 E의 경우가 Case B와 C의 경우보다 9.6% 정도 크게 설계되었다. 최대부모멘트 구간(설계그룹 6)에서의 하부 플랜지 두께의 경우는 Case B와 C의 경우 26mm로 설계되었고, Case D와 E는 34mm로 Case B와 C의 경우보다 약 30% 정도 더 두껍게 설계되었다. 위의 결과를 정리하면, LCC 최적설계의 관점에서는 지배 단면의 크기가 감소하는 것보다 오히려 증가하는 것이 더욱 효과적이라고 판단 할 수 있다.

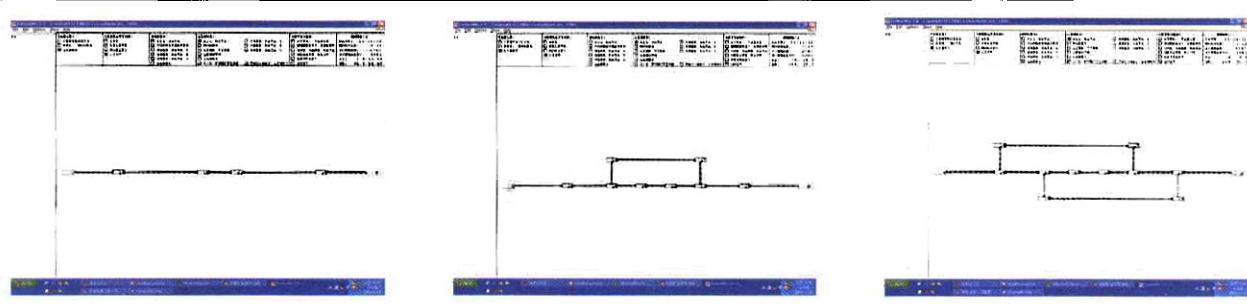
한편 그림 7에는 초기비용과 LCC 측면에서의 경제적 효과를 쉽게 알 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 간접비용의 효과가 고려되지 않은 경우인 Case B, C는 간접 복구비용을 고려한 Case D와 E의 결과보다 약 6%정도 더 경제적이지만 총 기대 LCC 측면에서 볼 때 Case D와 E에서의 총 기대 LCC는 Case B와 C의 결과보다 약 87%정도 경제적임을 알 수 있다. 이는 LCC에서 중요한 비용항목인 간접비용의 효과

가 고려되지 않은 최적설계의 경우는 부재의 경량화만을 목적으로 하고 있기 때문에 한계 상태에 대한 초과화률이 LCC 최적설계에서의 초과화률보다 크다는데에 주원인이 있는 것으로 판단된다.

#### 4.4.2 LCC 최적설계에 미치는 간접비용의 영향에 관한 고찰

앞서 언급한 바와 같이 LCC최적설계의 결과는 간접비용을 고려한 경우(Case D, E)를 그렇지 않은 경우(Case B, C)와 비교할 때 확실히 다른 결과가 도출됨을 알 수 있었다. 이에 본 절에서는 LCC에서 큰 비중을 차지하는 간접비용이 강상자형교 LCC 최적설계에 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 대상 교량이 속해 있는 도로의 네트워크 및 우회도로의 조건, 교통량 등의 변화에 따른 강상자형교의 LCC 최적설계에 대한 비교·분석을 수행하였다. 그림 8은 본 연구에서 고려된 이상화된 가상의 도로 네트워크의 유형을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 주도로만 있는 경우, 우회도로가 1개인 경우, 우회도로가 2개인 경우에를 고려하였으며, 각각에 대해 교통량, 우회도로 차선수, 우회도로 길이의 변화시켜가며 간접비용을 산정하고 이를 등가 LCC 최적설계에 적용하였다.

한국교통개발 연구원의 교통 데이터베이스를 참조하여 교통량의 영향은 가장 높은 인구밀집 도시지역인 서울의 ADT 88,098(대/일)을 교통량이 많은 경우로 고려하였고, 지방국도 중에서 비교적 많은 교통량을 가지는 양산의 ADT 58,330(대/일)을 교통량이 중간인 경우, 그리고 지방국도 중 교통량이 적은 ADT 13,299(대/일)을 교통량이 적은 경우로 적용하였고, 우회도로 차선수의 영향은 주도로의 차선수 보다 적은 2차선, 주도로의 차선수와 동일한 4차선을 적용하였다. 한편 우회도로의 길이에 대한 영향은 주도로의 길이보다 1km 긴 경우(우회도로 길이 4.1km) 및 3km 긴 경우(우회도로 길이 6.1km)에 대해서 고려하였다. 또한 앞선 절에서 간접비용 중



(a) 주도로만 존재  
(b) 우회도로 1개인 경우  
(c) 우회도로 2개인 경우  
그림 8. 간접비용의 영향을 고찰하기 위해 이상화된 이상의 도로 네트워크의 유형

표 9. LCC 최적설계를 위한 교통해석 조건

교통량 (대/일)	사회-경제손실비용 고려여부	우회도로 없는 경우	우회도로 차로수 및 길이							
			우회도로 1개인 경우				우회도로 2개인 경우			
			2차로		4차로		2차로		4차로	
교통량 小 (13,299)	-	SA I	SA II	SA III	SA IV	SA V	SA VI	SA VII	SA VIII	SA IX
	○	SB I	SB II	SB III	SB IV	SB V	SB VI	SB VII	SB VIII	SB IX
교통량 中 (58,330)	-	MA I	MA II	MA III	MA IV	MA V	MA VI	MA VII	MA VIII	MA IX
	○	MB I	MB II	MB III	MB IV	MB V	MB VI	MB VII	MB VIII	MB IX
교통량 大 (88,098)	-	LA I	LA II	LA III	LA IV	LA V	LA VI	LA VII	LA VIII	LA IX
	○	LB I	LB II	LB III	LB IV	LB V	LB VI	LB VII	LB VIII	LB IX

사회-경제손실비용을 추가한 경우(Case D)와 그렇지 않은 경우(Case E)가 거의 유사하게 나타났지만 교통량, 우회도로 차선수, 우회도로 길이에 따른 영향을 고찰해보기 위해 앞서 언급한 모든 경우에 대해 사회-경제손실비용의 적용 유무에 따른 비교도 추가적으로 수행하였다. 표 9에는 이상과 같이 본 연구에서 고려하고자 하는 모든 Case에 대한 다양한 교통해석 조건과 그에 상응하는 기호를 정의하여 놓았다. 본 절에서 LCC 최적설계는 허용응력비에 따른 등가 LCC 최적설계를 바탕으로 하였으며, 경제적인 면에 초점을 두어 분석을 수행하였다.

#### (1) 우회도로 수가 LCC 최적설계에 미치는 영향

우회도로 수가 LCC 최적설계에 미치는 영향은 앞서 언급한 바와 같이 우회도로가 없는 경우, 우회도로가 1개 있는 경우 그리고 우회도로가 2개 있는 경우에 대해 적용하였다. 교통해석에 있어서는 우회도로의 차로수는 2차로, 우회도로의 길이는 4.1km를 적용하였고, 사회-경제손실비용의 포함여부에 따른 주형의 허용응력비에 따른 등가 LCC 최적설계를 교통량이 적은 경우(Case SA~SB I, II, VI), 교통량이 중간정도인 경우(Case MA~MB I, II, VI), 교통량이 많은 경우(Case LA~LB I, II, VI) 대해 수행하였다.

그림 9는 각 Case에 대한 강상자형교 주형의 복구공사시 소요되는 일평균도로이용자비용(average daily road user cost)을 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 교통량의 증가에 따라서 도로이용자 비용이 증가하며, 우회도로가 증가함에 따라 도로이용자 비용이 감소하는 경향을 보이고 있다.

그림 10은 고려된 각각의 Case에 대한 우회도로 유무에 따른 LCC 최적 허용응력비를 나타내고 있다. 그림 10에 나타난 바와 같이 적은 교통량이 고려된 경우(Case SA~SB I, II, VI)에는 허용응력비 85%에서 LCC 최적설계가 이루어짐을

알 수 있다. 또한 중간정도의 교통량이 고려된 경우(Case MA~MB I, II, VI)에는 우회도로가 없는 경우에는 허용응력비 75%에서 LCC최적화가 이루어졌으며, 우회도로가 있는 경우에는 80%에서 LCC 최적설계가 이루어 졌다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 교통량이 적은 경우는 우회도로의 유·무가 LCC최적설계에 그다지 큰 영향을 미치지는 않고 있으나, 교통량이 많아짐에 따라 우회도로의 유무가 LCC최적설계에 영향을 미친다고 할 수 있다. 이러한 경향은 많은 교통량이 고려된 경우(Case LA~LB I, II, VI)에도 유사하게 나타났다.

이상의 결과는 우회도로가 존재함으로써 주도로를 운행하는 차량에 대한 배분효과로 인해 주도로의 차량이 점차적으로 우회함으로써 주도로 대상교량의 초기비용과 기대복구비용의 비율이 줄어들었기 때문으로 판단된다.

한편 그림 10에는 사회-경제손실비용이 LCC 최적설계 미치는 영향을 나타내고 있다. 조효남 등(2003)의 연구결과에서 나타난 결과와 동일하게 우회도로가 없는 경우(Case SB I, Case MB I, LB I)는 간접비용에 사회-경제손실비용의 고려 유무에 따라 LCC 최적설계의 결과는 영향을 받는 것을 알 수 있다.

#### (2) 우회도로 길이가 LCC 최적설계에 미치는 영향

우회도로 길이가 LCC 최적설계에 미치는 영향은 앞서 언급한 바와 같이 주도로보다 1km 긴 경우(우회도로 길이 4.1km)와 우회도로가 주도로보다 3km 긴 경우(우회도로 길이 6.1km)에 대해 적용하였다. 교통해석에 있어서는 우회도로가 1개인 경우에 대해 차로수는 2차로를 적용하였고, 사회-경제손실비용의 포함여부에 따른 주형의 허용응력비에 따른 등가 LCC 최적화를 교통량이 적은 경우(Case SA~SB II, III), 교통량이 중간정도인 경우(Case MA~MB II, III), 교

통량이 많은 경우(Case LA~LB II, III) 대해 수행하였다.

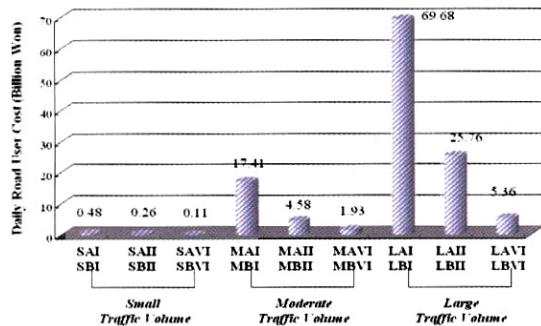


그림 9 Case별 우회도로 유·무에 따른 일평균도로이용자비용

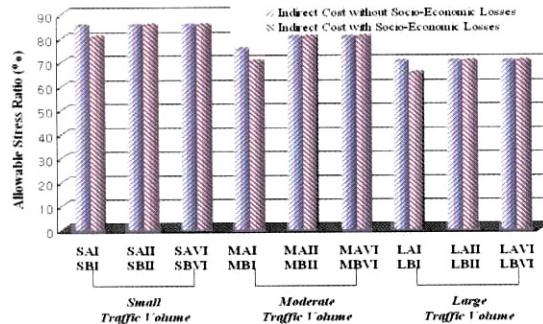


그림 10 각 Case별 우회도로 유무에 따른 LCC 최적 허용응력비

그림 11은 각각의 Case에 대한 주형의 복구공사시 소요되는 일평균도로이용자 비용을 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 우회도로의 길이가 증가함에 따라서 도로이용자 비용이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

그림 12는 고려된 각 Case에 대한 우회도로의 길이에 따른 최적 허용응력비를 나타내고 있다. 그림 12에 나타난 바와 같이 적은 교통량이 고려된 경우 (Case SA~B II, III) 우회도로의 길이에 상관없이 허용응력비의 80%에서 LCC 최적설계가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 한편 많은 교통량 고려된 경우 (Case LA~LB II, III)에도 우회도로의 길이에 상관없이 LCC 최적설계가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과에서 볼 수 있듯이 우회도로 길이의 변화는 LCC최적설계에 그다지 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이는 본 예제에서 수행한 우회도로의 길이의 범위에서는 길이의 변화에 따른 주도로의 교통량 배분효과가 그리 크지 않기 때문으로 판단된다.

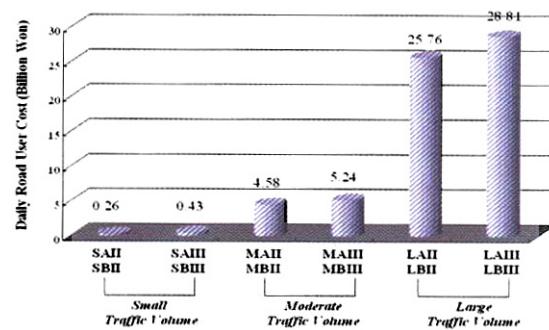


그림 11. 각 Case별 우회도로 길이에 따른 일평균도로이용자비용

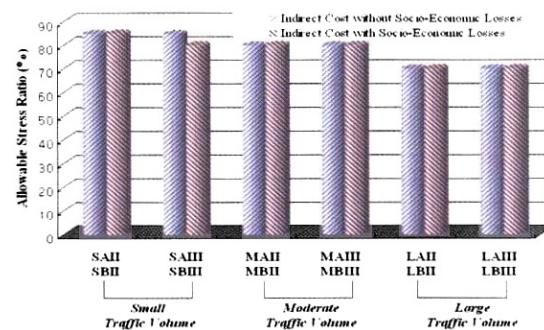


그림 12. 각 Case별 우회도로 길이에 따른 LCC 최적 허용응력비

### (3) 우회도로 차선수가 LCC 최적설계에 미치는 영향

우회도로 차선수가 LCC 최적설계에 미치는 영향은 앞서 언급한 바와 같이 우회도로가 2차로인 경우와 4차로인 경우에 대해 적용하였다. 교통해석에 있어서 우회도로의 길이는 4.1km를 적용하였고, 사회-경제손실비용의 포함여부에 따른 주형의 허용응력비에 따른 등가 LCC 최적설계를 교통량이 적은 경우(Case SA~SB II, IV), 교통량이 중간정도인 경우(Case MA~MB II, IV), 교통량이 많은 경우(Case LA~LB II, IV) 대해 수행하였다.

그림 13은 각 Case에 대한 강상자형교 주형의 복구공사시 소요되는 일평균도로이용자 비용을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 우회도로 차선수가 늘어남에 따라 도로이용자 비용이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

그림 14는 고려된 각 Case에 대한 우회도로 차선수에 따른 최적 허용응력비에 따른 총 기대 LCC결과들을 나타내고 있다. 그림 14에 나타난 바와 같이 적은 교통량이 고려된 경우 (Case SA~SB II, IV)와 중간정도인 경우(Case MA~MB II, IV)에는 우회도로 차선수에 상관없이 각각 허용응력비 85%와 80%에서 LCC 최적설계가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 하지만 많은 교통량이 고려된 경우 (Case LA~LB II, IV)는 우회도로가 4차선인 경우(Case LA~LB IV)와 2차선

인 경우(Case LA~LB II)에 대해 각각 허용응력비의 75%, 70%에서 LCC 최적설계가 이루어짐을 알 수 있다.

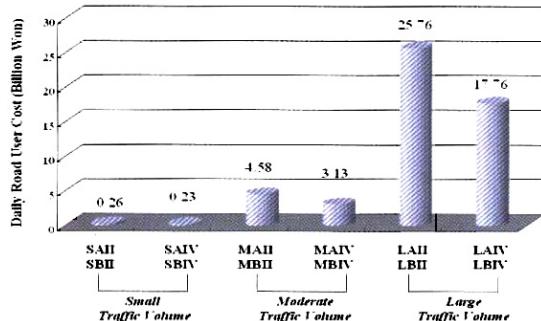


그림 13. 각 Case 별 우회도로 차선 수에 따른 일평균도로이용자 비용

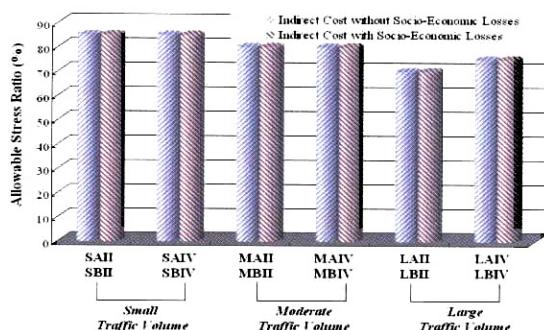


그림 14. 각 Case 별 우회도로 차선수에 따른 LCC 최적 허용응력비

이상의 결과에서 알 수 있듯이 우회도로의 차선수가 증가함에 따라 도로의 소통상태가 양호해져서 주도로의 배분효과는 미소하나 우회도로를 주행하는 차량의 주행성능 향상으로 도로이용자 비용이 감소하므로 우회도로의 차선수가 많은 경우에는 적은 경우와 비교할 때 약간 높은 허용응력비에서 LCC 최적설계가 이루어지며, 결과에 미소한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 강상자형교의 LCC 최적설계 및 간접비용의 영향에 대한 고찰을 위해 실제 2경간 연속 강상자형교의 LCC 최적설계 문제에 적용하였고, 기존의 설계방법들과 LCC의 비용·효율성에 대해 비교·고찰하였다. 또한 본 논문에서는 간접비용이 강상자형교 LCC 최적설계에 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 교량이 속해 있는 도로의 네트워크(우회도로수) 및 우회도로 조건(우회도로 차선수 및 길이), 교통량 등의 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) LCC를 이용한 강교량의 최적설계는 기존의 재래적 설계나 초기비용 최적설계와는 확실히 다른 설계가 이루어지며, 지배적인 주형 단면(정·부모멘트 최대부)의 크기를 증가시키는 것이 LCC 효과 측면에서 경제적이다.
- (2) 비록 LCC 최적설계에 의한 초기비용이 초기비용최적설계에서의 초기비용보다 조금 더 비경제적이지만 총 기대 LCC측면에서는 LCC 최적설계에 의한 총 기대 LCC가 초기비용 최적설계에 의한 총 기대 LCC값보다 훨씬 경제적이다. 이는 초기비용 최적설계의 경우 부재의 경량화만을 목적으로 하고 있기 때문에 한계 상태에 대한 초과학률이 LCC 최적설계에서의 초과학률 보다 크다는 데에 주원인이 있다.
- (3) 초기비용최적설계 역시 적정허용응력비를 사용한다면 LCC최적설계에 근접한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 방법은 간접적으로 LCC 최적설계를 수행할 수 있어 실용적인 방법으로 실무에서 활용 가능한 방법이라 판단된다.
- (4) 간접 복구비용은 전체 복구비용에 지배적인 역할을 하고 있기 때문에 강교와 같은 기반시설의 LCC최적설계에서는 간접 복구비용이 필히 포함되어야 할 것으로 판단된다. 한편 도로의 네트워크(우회도로수) 및 우회도로 조건(우회도로 차선수 및 길이), 교통량 등이 LCC 최적설계에 미치는 영향은 다음과 같다.
  - 교통조건에 상관없이 대부분의 경우에 있어서 교통량이 LCC 최적설계에 미치는 영향은 매우 민감하며, 교통량이 많은 경우에는 간접비용에 사회-경제손실비용 까지 고려할 때 약간 낮은 강도계수비나 허용응력비에서 LCC최적설계가 이루어질 수 있다.
  - 교통량이 적은 경우는 우회도로의 유·무가 LCC최적설계에 그다지 큰 영향을 미치지는 않으나, 교통량이 많아짐에 따라 우회도로의 유무가 LCC최적설계에 영향을 미칠 수 있다.
  - 우회도로의 차선수가 많은 경우에는 적은 경우와 비교할 때 약간 높은 강도계수비나 허용응력비에서 LCC 최적설계가 이루어지며, 결과에 미소한 영향을 미칠 수 있다.
  - 우회도로 길이의 변화는 LCC최적설계에 그다지 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이는 길이의 변화에 따른 주도로의 교통량 배분효과가 그리 크지 않기 때문으로 판단된다.
- (5) 이상의 결과들에서 알 수 있는 바와 같이 교통조건은 교량의 LCC 최적설계에 중요한 영향을 미칠 수 있다.

따라서 향후 신설 강상자형교의 LCC 최적설계 시에는 간접비용에 중요한 영향을 미치는 교통조건이 중요한 인자로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 POSCO연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

경기개발연구원 (1999) 경기도 물류비용 분석 및 물류체계 개선연구.

과학기술부, 엔지니어링기술진흥법 (1997).

건설교통부/시설안전기술공단 (2000) 도로교의 공용수명 연장 방안 연구, 시설안전기술공단 연구보고서 BR-2000-R1-37.

건설교통부/시설안전기술공단 (2001) LCC개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화방안 연구, 시설안전기술공단 연구보고서 TS-2001-R3-001.

사단법인 도로교통협회, 도로교설계기준(2000).

서울특별시건설안전관리본부 (2002) 도로관리사업소 시설물유지보수공사 설계지침.

이광민 (2000) 강상판교의 Life-Cycle Cost 설계, 한양대학 교 석사학위논문.

이수범, 심재익 (1997) 교통사고비용의 추이와 결정요인, 교통개발연구원 연구보고서, 연구총서 97-09.

원제무 (2000) 알기 쉬운 도시교통, 박영사.

조효남 (1998) 강상형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb) 개발, 삼보기술단, 1차년도 보고서.

조효남, 이광민, 김정호, 최영민, 봉연종(2003) 강교의 생애주기비용 최적설계, 강구조학회논문집, 강구조학회, 2003년 8월호

조효남, 민대홍, 조준석 (2001) 고속철도 강교량의 총기대비용 최적설계, 대한토목학회논문집, 2001년 9월호, pp.753-760.

조효남, 이두화, 정지승, 민대홍 (1999) 강상판교의 다목적 단계 최적설계, 6th International Conference on Steel & Space Structures, pp.313-320.

정지승 (1999) 강바닥판교의 다단계 다목적 최적설계, 한양대학교 박사학위논문.

한국강구조학회 (1997) 고속철도의 강교량 활용화에 관한 연구, 최종보고서.

한국도로공사, 97 도로설계실무편람(1997).

Albrecht, P. (1983) *S-N Fatigue Reliability Analysis of Highway Bridges, Probabilistic Fracture Mechanics and Fatigue Methods: Application for Structural Design and Maintenance*, ASTM STP 798.

Ang, A. H-S. and De Leon, D. (1997) *Determination of optimal target reliabilities for design and upgrading of structures*, Structural Safety, 19(1), pp.91-103.

Ang, A. H-S. and Tang, W. H. (1984) *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Vol. I and II, John Wiley.

Berthelot, C. F., Sparks, G. A., Blomme, T., Kajner, L., and Nickeson, M. (1996) *Mechanistic-probabilistic vehicle operating cost model*, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 122(5), pp.337-341.

Boisvert, R. N. (1992) *Indirect losses from a catastrophic earthquake and the local, regional, and national interest*, pp. 209-265 in: *Indirect Economic Consequences of a Catastrophic Earthquake*, Development Technologies, Inc. Washington, D. C.

Cho, H. N., and Ang, A. H-S. (1989) *Reliability Assessment And Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges*, 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, pp.2235-2238.

Cho, H. N. (2002a) *Life Cycle Cost Effectiveness for Design and Rehabilitation of Civil Infrastructures*, Proc. of SEWC02.

Cho, H. N., and Ang, A. H-S. *Reliability Assessment And Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges*. 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, pp.2235-2238. 1989.

Cho, H. N. and Min D. H. (2002b) *Life-Cycle Cost Optimization of Steel Box Girder Bridges*, Journal of constructional Steel Research (In Press).

Cho, H. N., Ang, A. H-S., Lim, J. K., and Lee, K. M. (2001b), *Reliability-Based Optimal Seismic Design and Upgrading of Continuous PC bridges Based on Minimum Expected Life-Cycle Costs*, Proc. of ICOSSAR01.

Cho, H. N., Min, D. H., and Lee, K. M. (2001a)

- Optimum Life-Cycle Cost Design of Orthotropic Steel Deck Bridges, Journal of International Steel Structure, ASCE, Vol. 1.*
- De Brito, J. and Branco, F. A. (1995) *Bridge management policy using cost analysis, Proceedings of Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 104, pp.431-439.
- De Brito, J. and Branco, F. A. (1998) *Road bridges functional failure costs and benefits, Canadian Journal of Civil Engineering*, 25, pp.261-270.
- Estes, A.C. (1997) *A System Reliability Approach to the lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway Bridges*, Ph.D. Dissertation, Univ. of Colorado.
- EMME/2 User's Manual (1999) Software Release 9.0, INRO.1608-1623.
- Frangopol, D. M., and Lin, K. Y. (1997) *Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures, Journal of Struct. Eng., ASCE*, Vol. 123, No. 10.
- Hart, G. C. *Uncertainty Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering*. Prentice-Hall, 1982.
- Kuribayashi, E. and T. Tazaki (1983) *Outline of the earthquake disaster*, pp.67-90 in : Report on the Disaster Caused by the Miyagi-ken-oki Earthquake of 1978, Report No. 159, Public Work Research Institute, Ministry of Construction, Japan
- Lee, J. C. (1996) *Reliability-based cost effective aseismic design of reinforced concrete frame-wall building*, Ph.D dissertation, Univ. of California Irvine.
- Melchers, R. E. (1987) *Structural Reliability, Analysis and Prediction*, Ellis Horwood Ltd., West Sussex, England.
- Nowak, A.S. (1992) *Calibration of LRFD Bridge Design Code*, National Cooperative Highway Research, Final Report pp.12-33
- Seskin, S. N. (1990) *Comprehensive framework for highway economic impact assessment methods and result*, Transportation Research Record 1274, Transporationa Research Board, Washington, D.C., pp.24-34.
- Stewart M.G. and Hossain, M.B. (2001) *Time-dependant Deflection, Serviceability Reliability and Expected Cost for RC beams*, Structural Safety and Reliability, Corotis et. al. (eds)
- Vanderplaats, Garret N. (1986) *ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis*, Engineering Design Optimization, INC, Santa Barbara, California.
- Wen, Y. K. and Kang, Y. K. (1997) *Optimal seismic design based on life-cycle cost*, Proceedings of the International Workshop on Optimal Performance of Civil Infrastructure Systems, ASCE, Portland, Oregon, pp.194-210.
- Zhao, Z., Haldar, A., and Breen Jr, F. L., *Fatigue-reliability evaluation of steel bridges*, J. Struct. Engrg., ASCE, Vol.120, No.5, 1994, pp.1608-1623.

(접수일자 : 2005. 1. 26 / 심사일 2005. 3. 4 /  
심사완료일 2005. 4. 10)