

환경영향인자를 고려한 강교의 생애주기비용 최적설계

Life-Cycle Cost-Effective Optimum Design of Steel Bridges Considering Environmental Stressors

이 광 민¹⁾

조 호 남²⁾

차 철 준³⁾

Lee, Kwang Min

Cho, Hyo Nam

Cha, Cheol Jun

요약 : 본 논문에서는 생애주기동안 발생하는 부식이나 일평균교통량 및 중차량의 통행량과 같은 사용환경에 의존하는 강교의 생애신뢰성에 기초한 생애주기비용(Life-Cycle Cost: 이하 LCC) 최적설계 방법론을 제안하였다. 강교 최적설계를 위한 LCC는 초기비용, 생애주기 기대유지관리비용, 생애주기 기대직접복구비용과 인적 혹은 물적손실비용, 도로이용자비용, 그리고 사회-경제 손실비용을 포함하는 간접복구비용을 현재가치의 합으로 정식화하였다. 이러한 LCC비용항목 중에서 생애주기 복구비용의 산정을 위해서는 하중과 저항이력에 의존하는 누적손확률로부터 산정되는 연파손확률이 고려되어야한다. 이를 위해 본 논문에서는 Nowak의 활하중 모델(1993)과 부식개시, 부식률, 그리고 재도장영향을 고려한 수정된 부식모델을 제안하였다. 이와같이 본 연구에서 제안된 LCC 최적설계 방법론은 3 경간연속(40m+50m+40m=130m)의 실제 강박스거더교에 적용되었고, 사용환경에 대한 LCC의 효율성에 대해 비교·고찰하였다. 적용예를 통해 부식환경, 일평균교통량, 그리고 중차량의 통행량은 강교 LCC최적설계에 매우 중요한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었으며, 이러한 교량의 사용환경인자들은 경우에 따라 LCC 최적설계에 대한 주요 변수로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

ABSTRACT : This paper presents a practical and realistic Life-Cycle Cost (LCC) optimum design methodology for steel bridges considering the long-term effect of environmental stressors such as corrosion and heavy truck traffics on bridge reliability. The LCC functions considered in the LCC optimization consist of initial cost, expected life-cycle maintenance cost, and expected life-cycle rehabilitation costs including repair/replacement costs, loss of contents or fatality and injury losses, road user costs, and indirect socio-economic losses. For the assessment of the life-cycle rehabilitation costs, the annual probability of failure, which depends upon the prior and updated load and resistance histories, should be accounted for. For the purpose, Nowak live load model and a modified corrosion propagation model, which takes into consideration corrosion initiation, corrosion rate, and repainting effect, are adopted in this study. The proposed methodology is applied to the LCC optimum design problem of an actual steel box girder bridge with 3 continuous spans (40m+50m+40m=130m). Various sensitivity analyses are performed to investigate the effects of various design parameters and conditions on the LCC-effectiveness. From the numerical investigation, it has been observed that local corrosion environments and the volume of truck traffic significantly influence the LCC-effective optimum design of steel bridges. Thus, these conditions should be considered as crucial parameters for the optimum LCC-effective design.

핵심어 : 생애주기비용, 간접비용모델, 강교, 최적화, 시간이력 신뢰도, 부식모델

KEYWORDS : Life-Cycle Cost, Indirect Cost Model, Steel Bridge, Optimization, Time-variant Reliability, Corrosion Model

1. 서론

최근 국내에서는 강교의 취약점으로 알려져 있는 공용기간 중의 진동, 부식, 피로 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. 또

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

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

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

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

한 최근 강구조학회의 연구결과 (1997)에 의하면 강교의 건설비용이 콘크리트교에 비하여 낮아지고 있는 추세임이 보고된 바 있다. 이뿐 아니라 최근 이중형교 (Two Main Girder Steel Bridges)나 파형강판형교 (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.

이처럼 다방면으로 우수성을 가진 강교를 더욱 효과적으로 활용하기 위해서는 공용기간중의 강교의 유지관리도 중요하지만, 교량의 생애주기동안 획기적인 비용절감효과를 얻을 수 있는 설계단계에서 LCC를 고려한 최적설계가 이루어져야 한다. 하지만 지금까지도 강교에 대한 LCC 최적설계 모델에 대한 광범위한 연구가 이루어지지 않았기 때문에, 강교의 설계시 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, 피로, 부식, 국부좌굴, 안정 등의 다양한 한계상태에 대한 초과확률의 산정이 필요하다. 또한 이러한 시간변화에 따른 초과확률과 관련한 다양한 직·간접비용의 산정은 가용한 자료의 결핍이나 자료의 불확실성으로 인해 항상 어려움이 따른다. 이러한 이유로 대부분의 LCC 최적설계 관련한 연구들은 주로 실용적인 적용보다는 이론적인 문제에 대한 연구가 수행되고 있다.

이에 본 논문에서는 생애주기동안 발생하는 부식이나 중차량의 통행량과 같은 사용환경에 의존하는 강교의 생애신뢰성에 기초한 LCC 최적설계 방법론을 제안하였다. 강교 최적설계를 위한 LCC는 초기비용, 생애주기 기대유지관리비용, 생애주기 기대직접복구비용과 인적 혹은 물적손실비용, 도로이용자비용, 그리고 사회-경제 손실비용을 포함하는 간접복구비용을 현재가치의 합으로 정식화하였다. 이러한 LCC비용항목 중에서 생애주기 복구비용의 산정을 위해서는 하중과 저항이력에 의존하는 누적손확률로부터 산정되는 연파손확률이 고려되어야한다. 이를 위해 본 논문에서는 Nowak의 활하중 모델(1993)과 부식개시시간, 부식률, 그리고 주기적인 재도장효과를 고려한 수정된 부식모델이 제안되었다. 이상과 같이 본 연구에서 제안된 LCC 최적설계 방법론은 3 경간 연속 (40m+ 50m+40m=130m)의 실제 강박스꺼더교에 적용되었고, 다양한 사용환경에 대한 LCC의 효율성에 대해 비교·고찰하였다.

2. 강교 LCC최적설계의 정식화

강교의 최적설계는 다양한 대안설계를 중에서 LCC가 최소이고 이익을 최대화 할 수 있는 대안을 선정함으로써 수행될 수 있다. 만약 설계대안들에 의해 얻어질 수 있는 이익이 같다면 강교의 생애주기 T_{life} 동안의 총 기대 LCC는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$E[C_T(\bar{X}, T_{life})] = C_i(\bar{X}) + \sum_{t=1}^{T_{life}} \left[\frac{\sum_{j=1}^J E[C_{Mj}(\bar{X}, t)] + \sum_{k=1}^K E[C_{Fk}(\bar{X}, t)]}{(1+r)^t} \right] \quad (1)$$

여기서 $E[C_T(\bar{X}, T_{life})]$ = 설계변수벡터 \bar{X} 와 생애주기 T_{life} 의 함수인 총 기대 LCC; $C_i(\bar{X})$ =초기비용; $E[C_{Mj}(\bar{X}, t)]$ = 강교 구성요소 j에 대한 수명 t에서의 기대유지관리비용; $E[C_{Fk}(\bar{X}, t)]$ = 한계상태 k에 대한 수명 t에서의 기대복구비용; r =할인율

식 (1)에 나타난 바와 같이, 강교의 총 기대 LCC는 초기비용 뿐 아니라 구조물의 생애주기동안의 기대유지관리 비용과 강도, 피로, 사용성, 좌굴, 안정성 등과 같이 강교에서 발생할 수 있는 한계상태들과 관련된 기대복구비용을 포함되어야 한다. 한편 식(1)을 구성하고 있는 비용들은 최적설계에서 고려되는 대안들마다 생애주기동안 발생하는 시기가 다르므로 각 대안들의 객관적인 비교를 위해서는 이들 비용을 현재가치화 하기 위한 할인율(discount rate) r 을 고려하여야 한다.

이러한 기대 LCC 각 대안별로 산정하게 되면 강교의 LCC 최적설계가 가능한데, 이를 정식화 하면 다음의 식(2)와 같다.

$$\text{Minimize} \quad E[C_T(\bar{X}, T_{life})] \quad (2a)$$

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

$$P_{Fk}(\bar{X}) \leq P_{Fk,allow} \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2c)$$

$$\bar{X}^L \leq \bar{X} \leq \bar{X}^U \quad (2d)$$

여기서, \bar{X} = 강교를 구성하는 요소들의 두께, 길이 등과 같은 설계변수벡터; $G_j(\bar{X})$ = 허용응력, 합성응력, 처짐 등과 같은 설계 및 거동제약조건; $P_{Fk,allow}$ = 강도, 피로, 사용성, 좌굴, 안정성 등에 대한 허용파손확률; \bar{X}^U , \bar{X}^L = 시공한계 등과 같은 설계변수 벡터들의 한계제약조건

2.1 초기비용 (Initial Cost)

초기비용은 계획과 설계, 구조물의 기초, 상부구조물, 하부구조물, 부대시설 등과 같은 교량의 구조적 혹은 비구조적 구성요소의 설계와 시공, 시공후 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.

$$C_I(\bar{X}) = C_{ID}(\bar{X}) + C_{IC}(\bar{X}) + C_{IT}(\bar{X}) \quad (3)$$

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

식 (3)에서 시공비용은 실제 구조물의 시공에 포함되는 노동비, 재료비, 장비비, 공사현장관리비와 품질관리비용 전부를 포함해야 한다. 시공비용을 제외한 계획·설계비용과 감리비용 등은 시공비용의 규모에 따라 국내의 실정이 반영된 엔지니어링 사업대가기준(과학기술부, <http://www.cmcost.com>, 2001)에 제시되어 있는 해당 요율을 적용하여 산정할 수 있다.

2.2 기대 유지관리비용 (Expected Maintenance Cost)

기존의 LCC최적설계에 대한 연구들 중에서 Wen과 Kang (1997)의 연구에 의하면 비록 생애주기동안의 LCC에서 유지관리비용이 차지하는 비중은 크지만, 설계변수에 대한 유지관리비용과의 상관관계는 일반적으로 미약하기 때문에 LCC에서 유지관리 비용을 고려하지 않아도 됨을 언급한 바 있다. 하지만 생애주기동안의 LCC에서 유지관리비용이 차지하는 비중은 크기 때문에 강교의 사용환경에 따른 유지관리비용은 좀더 세심한 고려가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유지관리비용을 도장이나 포장과 같이 설계변수에 따라 산정되는 보수·보강 혹은 교체비용과 정기적인 교량관리로부터 발생하는 비용으로 구분하여 고려하였다. 강교의 LCC 최적설계에 있어서 후자는 설계변수에 대한 상관관계가 적고 LCC최적설계 결과에 미치는 영향이 적기 때문에 본 연구에서는 설계변수와 관련한 유지관리비용을 다음의 식 (4)와 같이 생애주기 T_{life} 동안의 유지관리확률을 고려하여 정식화 하였다.

$$E[C_{Mj}(\bar{X}, t)] = C_{Mj}(\bar{X}) \cdot f_{Mj}(t) \quad (4)$$

여기서, $C_{Mj}(\bar{X})$ =강교 구성요소 j에 대한 유지관리비용; $f_{Mj}(t)$ =강교 구성요소 j에 대한 시간 t에서의 유지관리 확률

2.3 기대 복구비용 (Expected Rehabilitation Cost)

기대 복구비용은 강교의 생애주기 동안 일어날 수 있는 다양한 한계상태에 대한 연 파손확률로부터 산정할 수 있다. 비록 이러한 파손확률은 일반적인 교량의 사용환경에서는 발생하지 않을 수 있지만, 기대 복구비용을 고려한다는 것은 보험비용의 개념으로 비용분석측면에서 고려될 필요가 있다 (Melchers, 1987). 이러한 기대복구비용은 고려된 한계상태 k에 대한 파손확률과 직·간접 복구비용을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[C_{Fk}(\bar{X}, t)] = C_{Fk}(\bar{X}) \cdot P(\bar{X}, t | T) \quad (5)$$

여기서, k=한계상태에 대한 인덱스; $C_{Fk}(\bar{X})$ =한계상태 k에 대한 복구비용; $P(\bar{X}, t | T)$ =하중과 저항이력에 의존하는 누적파손확률로부터 산정되는 연 파손확률

한편 식(5)에서 복구비용 $C_{Fk}(\bar{X})$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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} 은 건설계약연구원 (<http://www.csr.co.kr>)의 가격정보를 활용한 직접적산이나 그리고 다양한 참고문헌(서울특별시 건설안전관리본부, 2002; 시설안전기술공단 등, 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 (이수범과 심재익, 1997) 와 평상시와 복구공사 기간 중 사고율 데이터를 토대로 하여 근사적으로 산정 할 수 있다(http://traffic.metro.seoul.kr).

2.4 도로이용자비용과 사회-경제손실비용

(Road User Cost and Socio-economic Losses)

식(6)에서 간접 복구비용에는 교량의 복구공사 시 원래기능을 발휘하지 못함으로서 간접적으로 발생하는 비용인 도로이용자비용과 사회-경제적 손실비용을 포함하고 있다. 이러한 간접적 비용들은 토목분야에서는 다소 생소한 분야로서 주의깊게 고려되어야 할 가치가 있다. 빌딩구조물과 같은 구조물은 빌딩을 사용하는 몇몇의 이용자와 연관되어 있어서 그에 따르는 이용자비용이나 사회-경제적 손실에 끼치는 영향은 적을 것이다. 그러나 교량, 터널, 대수로, 지하구조물 등과 같은 시설들은 관련 지역 전체에 필수적인 서비스를 공급하는 주요한 공공의 투자시설이기 때문에 원래 의도한 바의 기능을 하지 못하는 경우 발생하는 사회-경제적 손실은 빌딩구조물과는 비교할 수 없을 정도로 클 것이다.

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 and Branco, 1995; 조효남 등, 2004). 본 연구에서도 도로이용자비용모델은 시간지연비용과 차량운행비

용만을 고려하여 정식화하였다.

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

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

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

$$\Delta t_{d_i} = \frac{L_{d_i}}{v_{d_{ci}}} - \frac{l_{d_i}}{v_{d_i}}, \quad \Delta t_{d_0} = \frac{l_0}{v_{0_s}} - \frac{l_0}{v_{0_n}} \quad (7d)$$

여기서, C_{TDC} =시간지연비용; C_{VOC} =차량운행비용; i =교통 네트워크의 경로에 대한 인덱스; j = 차량의 종류에 대한 인덱스 (업무 혹은 비업무 자가용, 택시, 버스, 버스, 소형트럭, 대형트럭 등); n_{P_i} = 재차인원; T_{ij} =일일평균교통량 (Average Daily Traffic, ADT); u_{1j} = 도로이용자의 평균 시간가치; u_{2j} = 각 차종에 따른 운전자 평균급여; u_{3j} = 각 우회경로의 단위 길이 당 평균 유료비용; u_{4j} =대상교량이 속해있는 경로의 단위 길이당 평균 유료비용; r_i = 대상교량이 속해있는 경로에서 i 번째 우회경로로의 우회율; Δt_{d0} = 대상교량이 속해있는 경로의 추가적인 시간지연; l_0, l_d = 대상교량이 속해있는 경로의 길이 및 우회경로의 길이; v_{0_s}, v_{0_n} = 정상상태 및 복구공사 시 상태에서 대상교량이 속해있는 경로의 교통속도; v_{d_s}, v_{d_n} = 정상상태 및 복구공사 시 상태에서

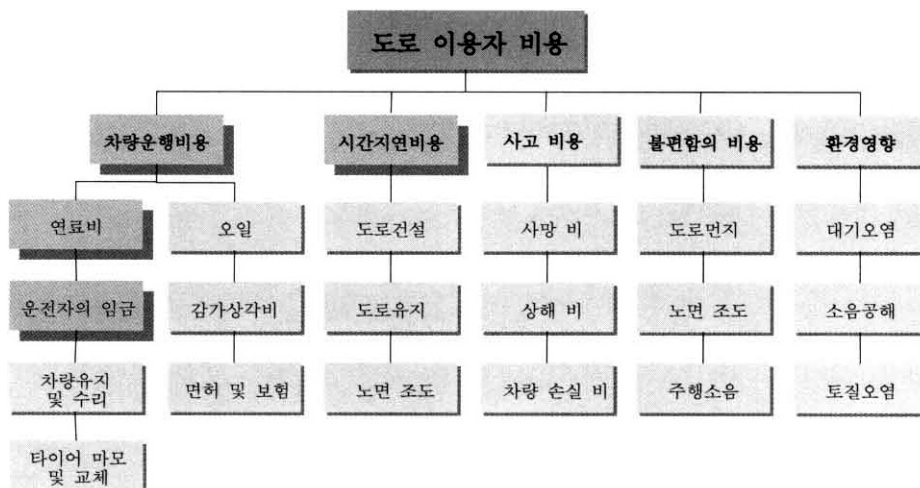


그림 1. 도로이용자비용 구성항목 (Berthelot et al.,1996)

우회경로의 교통속도

식 (7)과 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 교통해석을 수행하여 얻을 수 있다. 이에 본 연구에서는 교통해석프로그램인 EMM/2 v5.1(Inro Consultants Inc., Montreal, Canada)을 이용하였다. EMM/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 도로 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-Nothing 법, 반복과정법(iterative assignment), 분할배분법(incremental assignment), 다중경로배분법(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.

사회-경제적손실비용은 교량이 복구공사로 인해 재기능을 다하지 못하는 경우 발생하는 경제적인 파급효과의 결과이다. 이재철 (1996)은 지진으로 인한 빌딩구조물의 손상으로 인해 발생하는 사회-경제적 파급효과를 산정하기 위해 신설시 경제적 효과를 산정하기 위한 투입-산출(Input-Output: 이하 I-O) 모델 (Kuribayashi and Tazaki, 1983)을 수정하여 새로운 정식화를 제안한 바 있다. 이재철 (1996)의 정식화에서는 복구공사로 인한 경제적 파급효과는 직접적인 손실인 1차 손실 (First Round Losses)과 1차 손실에 따른 경제적 파급효과를 고려할 수 있는 2차 손실(Second Round Losses)에 의해 산정 되도록 하였다. 빌딩구조물의 경우, 사회-경제적 손실은 그 빌딩에 거주하는 노동자의 노동력에만 연관되지만 교량의 경우는 복구공사로 인해 재기능을 발휘하지 못하는 대상교량의 이용자뿐만 아니라 그 교량이 위치한 곳의 교통 네트워크안에 모든 도로이용자와 그 지역의 산업전반에 영향을 미친다.

교량의 LCC산정과 관련하여 이러한 사회-경제 손실비용은 투입산출모델을 활용한 조효남 등(2004)의 연구를 활용하여 산정할 수 있다. 하지만 조효남 등(2004)의 모델은 사회-경제 손실비용평가를 위해 특정지역에 대한 교통해석 뿐 아니라 산업연관표 (혹은 투입-산출 테이블), 직종분포 등의 자료와 방대한 매트릭스 연산이 필요하기 때문에 이러한 사항들을 매번 비용해석 때마다 적용하는 것은 대단히 어렵고 실용적이지 못하다. 특히 국내의 경우는 서울을 제외한 지역별 산업연관표는 작성되어 있지 않기 때문에 더욱 적용이 난해하다. 따라서 본 연구에서는 근사적 사회-경제손실비용을 산정하기 위해 Seskin (1990)의 연구결과가 사용되었다. Seskin(1990)의 연구결과에 의하면 사회-경제손실은 대도시, 중도시, 소도시로 구분되어서 제시되어 있으며 각각 도로이용자 비용의 약 150%~50%의 범위를 가진다고 제시되어 있다.

3. 시간이력신뢰성 해석과 최적설계 알고리즘

3.1 강교의 시간이력신뢰성해석 모델

3.1.1 기본 한계상태함수의 정식화

식(5)에서 기대복구비용을 산정하기 위해서는 비용모델에서 고려된 모든 파손한계상태에 대한 신뢰성해석이 필요하다. 여기서 신뢰성해석은 파손한계상태에 대한 초과확률의 산정으로 실제적인 한계상태모델이 각 파손한계상태에 대해 정식화되어야 한다.

예를 들어 강교의 콘크리트 바닥판의 공칭 휨강도와 주거더의 휨 또는 전단의 강도에 대한 한계상태는 각각 콘크리트 바닥판과 플랜지 및 복부의 극한한계상태로서 정의될 수 있다. 합성형 강교의 경우에 대한 강도 한계 상태는 다음과 같이 정식화 될 수 있다.

주형의 휨강도:

$$g(\cdot) = Z_G \cdot F_y \cdot \gamma_{mfg} - \sum_{i=1}^L M_{G_{ni}} \cdot \lambda_{G_{ni}} - M_{G_L} \cdot DF \cdot I_{beam} \quad (8)$$

여기서, Z_G = 주형의 극한 휨강도; F_y = 주형의 항복응력; γ_{mfg} = 주형의 휨에 대한 모델불확실계수; $M_{G_{ni}}$ = 아스팔트, 주형의 자중, 바닥판 하중 등에 의해 주형에 작용하는 휨모멘트; M_{G_L} = 활하중에 의해 주형에 작용하는 휨모멘트; $\lambda_{G_{ni}}$ = 사하중요소 i 에 대한 불확실계수; DF = 활하중 분배에 대한 불확실계수; I_{beam} = 충격계수에 대한 불확실계수

주형의 전단강도:

$$g(\cdot) = S_G \cdot F_y \cdot \gamma_{msg} - \sum_{l=1}^L S_{G_{DL}} \cdot \lambda_{G_{DL}} - S_{G_L} \cdot DF \cdot I_{beam} \quad (9)$$

여기서, S_G = 주형의 극한 전단강도; γ_{msg} = 주형의 전단에 대한 모델불확실계수; $S_{G_{DL}}$ = 아스팔트, 주형의 자중, 바닥 판 하중 등에 의해 주형에 작용하는 전단력; S_{G_L} = 활하중에 의해 주형에 작용하는 전단력

식 (8)과 (9)에서 주형의 극한 힘과 전단강도는 조밀단면 인지의 여부, 브레이싱여부, 합성단면인지의 여부와 관련이 있다. 이러한 주형의 힘과 전단강도의 산정을 위한 구체적인 사항은 AASHTO(1996)나 AISC(1994)에 구체적으로 제시되어 있다.

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

$$g(\cdot) = \delta_{all} - \delta_L \cdot DF \cdot I_{beam} \quad (10)$$

여기서, δ_{all} = 시방서에서 제시한 허용 처짐; δ_L = 활하중에 의한 처짐

한편, 강교량의 경우 피로한계상태는 다른 어느 한계상태보다 지배적인 요소 중에 하나이다. 이러한 피로한계상태에 대한 정확한 신뢰성 해석을 위해서 Zhao와 Haldar (1994)가 제안한 피로로 인한 파괴 메커니즘에 기초한 방법이 사용될 수 있다. 하지만 Zhao와 Haldar (1994)가 제안한 방법은 피로 원인규명을 위한 정확한 피로 신뢰성 해석을 위한 용도로 주로 사용되며, 강교의 설계단계는 정확한 신뢰성 해석을 수행하기보다는 근사적이지만 실용적인 식을 사용하는 것이 더욱 효과적이다. 이러한 경우에는 Pedro Albrecht의 실용식 (Albrecht, 1983)이 효과적으로 적용될 수 있다.

$$\beta = \frac{\log N - \log N_d}{\sqrt{(S_R)^2 + m(S'_Q)^2}} \quad (11)$$

여기서, β = 신뢰성 지수; N , N_d = 각각 등가 응력 범위와 하중 사이클에 대한 사이클의 수; S_R , S'_Q = 저항과 하중의 사이클의 수의 표준편차; m = S-N 선도의 경사와 관련된 계수

3.1.2 생애주기 극한활하중 모델

교량의 신뢰성해석에 있어서 생애주기동안 시간이 지나면서 더욱 무거운 중차량 통과할 확률을 가지고 있으므로 활하중에 의한 교량의 단면력은 시간이 지남에 따라 증가할 확률을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 활하중의 시간에 따른 효과를 모사하기 위해 Nowak (1993)의 활하중 모델을 사용하였다. Nowak(1993)의 활하중 모델은 시간이 지남에 따라 중차량이 통과하면서 교량에 발생하게 되는 최대 힘과 전단력의 증가 효과를 잘 모사해주는 것으로 알려져 있다. Nowak의 모델은 교량을 통과하는 중차량의 수가 증가함에 따라 활하중분포의 상한에서 중차량이 통과할 확률이 증가한다는 Type-I 극치통계에 근거를 두고 있다. 이러한 Nowak의 모델을 교량의 신뢰성 해석에 적용하기 위해 단면력에 대한 Type-I 극치분포의 평균 μ_{Mn} 과 표준편차 σ_{Mn} 의 값을 필요로 한다. 이는 다음의 식 (12)를 이용하여 구할 수 있다(Ang and Tang, 1984).

$$\mu_{Mn} = \sigma \cdot u_n + \mu + (\gamma \cdot \sigma / \alpha_n) \quad (12a)$$

$$\sigma_{Mn} = (\pi / \sqrt{6}) \cdot (\sigma / \alpha_n) \quad (12b)$$

$$\text{여기서: } \alpha_n = \sqrt{2 \cdot \ln(n)}; u_n = -\frac{\ln[\ln(n)] + \ln 4 \cdot \pi}{2 \cdot \alpha_n}$$

+ α_n , n = 중차량의 누적통과횟수; μ , σ = 교량을 통과하는 중차량에 의한 단면력의 초기분포(일반적으로 정규분포)의 평균과 표준편차; $\gamma = 0.577216$ (오일러 수)

3.1.3 시간이력 저항모델

시간이 지남에 따라 대부분의 구조용 강재는 부식이 발생한다. 이러한 구조용 강교량의 부식은 거더의 복부와 플랜지의 두께 감소를 초래한다. 그림 2는 강교에서 일반적으로 부식이 발생할 수 있는 위치를 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 강교의 중앙지간부분에 발생하는 부식의 형태는 하부 플랜지와 복부의 아래쪽 1/4부분에 걸쳐 주형단면의 감소를 유발하게 된다. 한편 지점부의 일반적인 부식은 하부 플랜지와 복부의 전체에 걸쳐 발생한다.

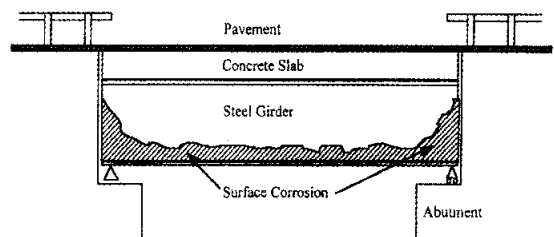


그림 2. 강교의 전형적인 부식위치

부식에 대한 예측은 매우 중요한 문제이다. 오랜 기간동안 점검을 수행하지 않아 부식을 방치해 둔다면 주형의 저항을 감소시키게 되어 치명적인 구조적 파손이 발생할 수 있다. 일반적으로 부식의 정도는 강재의 종류, 온도, 상대적인 습도, 노출 상태 등의 부식환경에 따라 다르다(Albrecht, 1984). 여러 연구자들이 실제 부식의 진행 과정을 시간에 따라 예측하기 위한 모델을 제안해 왔다(Albrecht and Naeemi, 1984; Ellingwood 등, 1999). 하지만 이러한 부식모델들은 부식의 예측에 있어서 주기적인 재도장의 영향을 무시한 것으로 실제 교량의 부식에 의한 저항의 감소를 예측함에 있어서 실제적이지 못하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 식 (13)과 같이 Ellingwood 등(1999)이 제안한 부식모델에 주기적인 재도장의 효과를 반영한 수정된 부식예측모델을 제안하였다.

$(i) \cdot T_{REP} + T_{CI} \leq t < (i+1) \cdot T_{REP}$ 의 경우

$$p_i(t) = C \cdot (t - i \cdot T_{REP} - T_{CI})^m \quad (13a)$$

이외의 경우

$$p_i(t) = p_{i-1}(i \cdot T_{REP}) \quad (13b)$$

여기서, $p_i(t)$ = i번째 재도장주기 중 임의의 t년 동안부식이 진행된 깊이(단위: μm); C = 부식률과 관련된 매개변수; m = 시간과 관련된 매개변수; T_{CI} , T_{REP} = 부식개시와 재도장 주기

본 연구에서는 위의 식 (13)을 이용하여 극한 휨 및 전단강도와 같은 강교의 저항에 대한 시간적 효과를 신뢰성해석시 반영하였다. 하지만 식 (13)에서 C , m , T_{CI} , T_{REP} 은 일반적으로 불확실성이 강한 랜덤변수로서 임의의 시간 t에서의 저항 또한 불확실성을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 구조저항에 대한 평균과 표준편차를 구하기 위해 총 50,000회의 시뮬레이션을 수행한 뒤 각 데이터들에 대해 빈도분석을 수행하였다.

3.1.4 연 파손확률 및 신뢰성 해석

식 (5)와 같이, 기대복구비용을 추정하기 위해서는 비용 모델이 고려된 한계상태 k에 대한 연 파손확률 산정은 필수적이다. 강교가 지난 임의의 T년간의 하중을 지탱해온 경우, T년 이후의 t년 동안에 파손될 확률은 다음과 같이 구할 수 있다(Stewart, 2001).

$$p_{fk}(\bar{X}, t | T) = \frac{p_f(\bar{X}, T+t) - p_f(\bar{X}, T)}{1 - p_f(\bar{X}, T)} \quad (14)$$

여기서, $P_f(\bar{X}, T+t)$, $P_f(\bar{X}, T)$ = 교량에서 임의의 기간 T+t 및 T년 동안의 누적파손확률

식 (14)에서, 생애주기동안의 누적파손확률은 본 연구에서 제안된 극한확률중모델, 시간이력 저항모델 및 한계상태모델 고려하여 구할 수 있다. 누적 파손확률을 구하기 위한 생애주기동안 1년 단위의 각 한계상태에 대한 신뢰성 해석이 수행되어야 하는데 본 연구에서는 반복법의 일종인 개선된 1계-2차 모멘트(Advanced First-Order Second-Moment, AFOSM) 방법이 본 연구에 사용되었다. 한편 강교의 설계단계의 피로신뢰성해석은 식 (11)과 같은 Pedro Albrecht의 실용식이 적용되었다.

신뢰성해석을 수행함에 있어서 주의해야 할 점은 강교의 강도 한계 상태에 대한 신뢰성 해석을 수행함에 있어 LCC 정식화에 고려된 이벤트가 반영되어야 한다는 것이다. 즉 일반적으로 교량시스템의 신뢰성 해석은 붕괴에 대한 파손확률을 구하기 위해 전단과 휨모멘트로 구성된 직-병렬 시스템(Parallel-Series System) 모델이 사용되어왔다. 하지만 강도에 대한 기대복구비용을 산정하기 위한 파손확률은 교량시스템의 붕괴가 아니라 국부의 강도한계상태에 대한 사항을 고려해야 하기 때문에 시스템의 신뢰성 해석보다는 요소신뢰성해석에 의한 파손확률을 적용하는 것이 더욱 적합하다 할 수 있다.

3.2 강교의 최적설계 알고리즘

그림 3은 강교의 LCC 최적설계를 위해 일반적으로 사용될 수 있는 최적설계 알고리즘이다. 그림에 나타난 바와 같이 LCC 최적설계 알고리즘은 구조해석모듈(Structural Analysis), 신뢰성해석모듈(Reliability Analysis), 최적설계모듈(Optimization), 그리고 LCC 산정모듈(LCC Evaluation)로 구성되어있다. 그러나 실제로 강교는 부재수가 많고 복잡한 구조거동을 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), 구조재해석 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(이광민, 2000)에서 구체적으로 찾아볼 수 있다.

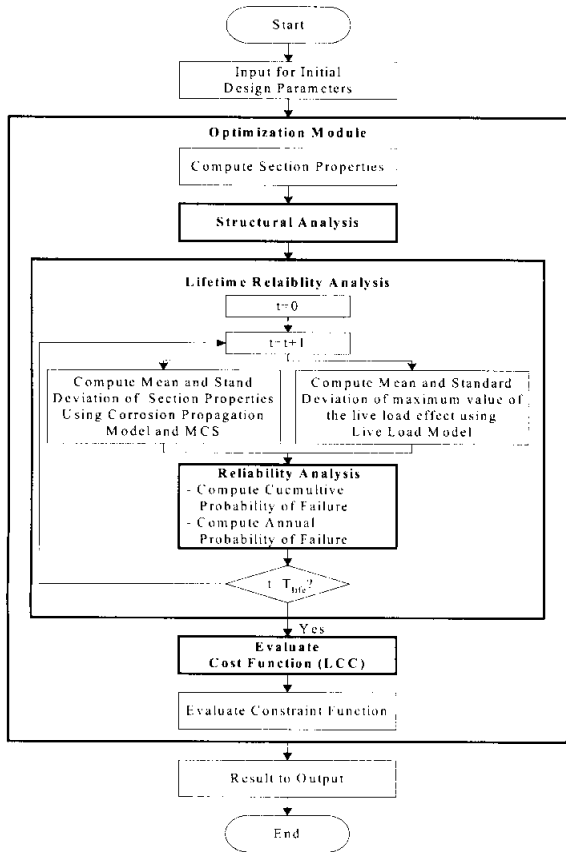


그림 3. 강교의 LCC최적설계 알고리즘

4. 수치예제 및 고찰

4.1 가정사항

본 연구에서 제안한 강교의 LCC 최적설계에 대한 효과를 고찰해보기 위해, 3경간 연속의 총 길이 130m(=40m+50m+40m)인 강상자형교를 수치해석 예제 대상교량으로 선정하였다. 대상 교량의 일반사항은 표 1에 나타내었으며, 그림 4에는 대상교량의 단면도와 평면도 및 교량전지간에 걸친 설계그룹을 나타내었다.

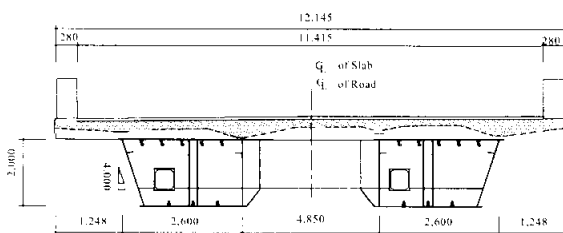
본 적용예의 대상교량은 실제로 경상남도 양산에 건설되어 사용 중인 교량이지만 수치적인 고찰을 위해 많은 일평균교통량(ADTV-L)을 부담하는 대도시와 작은 일평균교통량(ADTV-S)을 가지는 소도시 상의 도로상에 건설되었다고 가정하였다.

그림 5와 6은 각각 본 연구에 사용된 인접 도로망과 EMME/2를 사용하여 교통해석을 수행하기 위해 모델링을 보여주고 있다. 또한 표 2와 3은 시공 후 20년 동안의 대도시와 중소도시상의 도로에 대한 가정된 일평균교통량을 나타내고 있다.

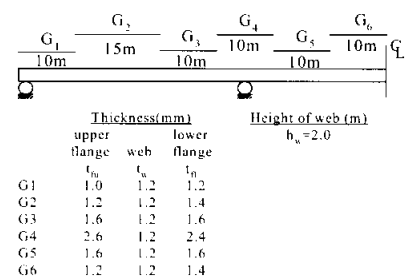
그림 7은 대상교량의 LCC최적설계에 사용된 설계변수들을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구서 주형의 설계변수는 그림 4(b)의 설계그룹별로 상·하부 플랜지의 두께(t_{fu} , t_{fl}), 복부판의 두께(t_w)와 교량전체에 걸치 복부의 높이(h_w)를 설계변수로 하였다.

표 1. 대상교량의 일반 데이터

교량형식	3경간 연속 강상자거더교(명곡교)		
교량 연장(m)	40m+50m+40m=130	강 재원	SM490($f_y=3,200\text{kgf/cm}^2$, $f_u=1,900\text{kgf/cm}^2$)
교량 폭(m)	12.145m		
(Skew)	90°	콘크리트 재원	강도 : $f_{ck}=270\text{kgf/cm}^2$ 계수비 : 8 철근 : SD40($f_y=4,000\text{kgf/cm}^2$)
차선수(설계차선수)	4(3)		
Box의 수	2		
설계 하중	DB/DL-24 (HS-20/0.75)		



(a) 단면도



(b) 교량 제원과 설계 그룹

그림 4. 강박스거더교의 단면도 및 제원과 설계그룹

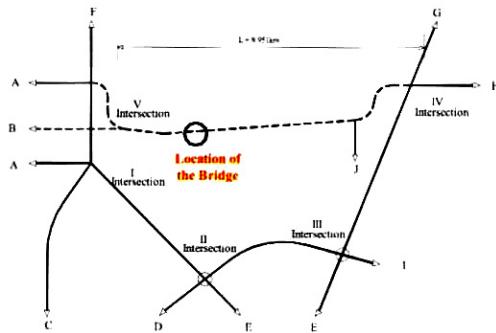


그림 5. 인접 고속도로의 교통네트워크

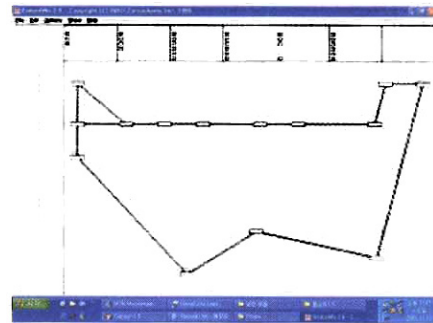


그림 6. 인접 고속도로의 교통네트워크 모델링

표 2. 20년간 기대 일평균교통량 (소도시: ADTV-S)

Year	2007	2011	2015	2019	2023	2027
승용차	I 15,419	18,487	21,276	23,850	25,936	26,758
	II 15,606	19,047	21,914	24,562	26,711	27,557
	III 14,424	17,596	20,262	22,716	24,703	25,486
버스	I 1,793	2,076	2,290	2,456	2,554	2,575
	II 1,847	2,139	2,358	2,529	2,630	2,653
	III 1,707	1,977	2,180	2,339	2,433	2,452
트럭	I 10,057	11,984	13,531	14,882	15,883	16,238
	II 10,360	12,347	13,937	15,325	16,358	16,723
	III 9,576	11,406	12,886	14,174	15,129	15,467

I : 교차로V ~ 대상교량; II : 대상교량 ~ J지역; III : J지역 ~ 교차로IV

표 3. 20년간 기대 일평균교통량 (대도시: ADTV-L)

Year	2007	2011	2015	2019	2023	2027
승용차	I 29,450	42,486	55,760	69,408	81,320	86,162
	II 29,762	43,774	57,432	71,480	83,750	88,734
	III 27,508	40,430	53,103	66,108	77,455	82,065
버스	I 3,419	4,771	6,002	7,147	8,008	8,292
	II 3,522	4,916	6,180	7,360	8,246	8,543
	III 3,225	4,543	5,713	6,807	7,628	7,895
트럭	I 19,179	27,541	35,462	43,310	49,800	52,286
	II 19,757	28,376	36,525	44,599	51,289	53,848
	III 18,262	26,213	33,772	41,249	47,436	49,804

I : 교차로V ~ 대상교량; II : 대상교량 ~ J지역; III : J지역 ~ 교차로IV

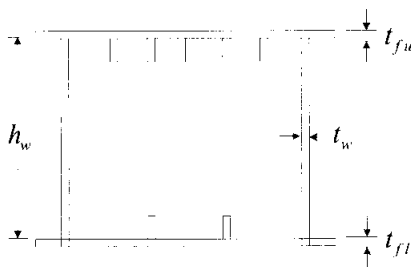


그림 7. 강박스거더교의 설계변수

한편 본 적용예에서 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 (Broy don-Fletcher-Goldforb-Shanno)방법을 사용하였다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법 (Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램

램으로 형성하고 있는 ADS (Automated Design Synthesis; Vanderplaats, 1986)를 이용하여 수행하였다.

4.2 생애주기비용의 산정을 위한 데이터

본 연구에서 대상교량인 강상자형교의 초기비용을 산정하기 위한 구조용강재의 단위건설비용의 적용기준은 포항산업연구원(RIST,1998)의 가격정보를 이용하였다. 그리고, 설계비용과 재하시험비용은 각각 시공비용의 7%와 3%로 가정하였다 (De Brito and Branco, 1995).

표 4. 대상교량의 단위 시공비용

항목 및 단위	비용 (×10,000원)
노무 비용(ton)	133.09
재료 비용(ton)	41.99
도장 및 채도장비용(m ²)	23.60

앞서 언급된 바와 같이 복구비용은 직접 복구비용과 간접 복구비용으로 분류할 수 있다. 직접 복구비용은 LCC에 고려된 한계상태가 초과된 경우에 발생하는 직접적인 보수, 보강

표 5. 직접복구비용 산정에 사용된 데이터

한계상태	강도	피로
복구방법	Retrofit	Bolting repair
단위 직접 복구비용 (×10,000 원)	175 /ton 3.12 /ton (폐기비용)	450 /위치
기대복구주기	4 개월	3 주
작업 지역 조건	부분 교통 통제(2 차로)	교통 통제 없음

표 6. 간접복구비용 산정에 사용된 데이터

항 목	값	단위	참고자료
할인율	4.00	%	건설교통부 (2003)
교통 사고 비용	1.2	억원	한국교통개발 연구원 (http://traffic.metro.seoul.kr)
복구 공사중 교통 사고율	220	만대 / km	
평상시 교통 사고율	190	만대 / km	
사망 비용	35	억원	이수범과 심재익 (1997)
부상 비용	2,100	만원	
운전자 시간당 평균급여	21,517	원/인	한국교통개발 연구원

표 7. 복구방법에 따른 설계 초기치에 대한 직간접복구비용의 산정결과

복구방법	Retrofit		Bolting repair	
	소도시교통량 적용시	대도시교통량 적용시	소도시교통량 적용시	대도시교통량 적용시
직접 복구비용(× 10,000 원)	38,196 (3%)	38,196 (1%)	450 (100 %)	450 (100%)
간접 복구비용(× 10,000 원)	1,425,450 (97%)	7,127,250 (99%)	-	-
총 복구비용(× 10,000 원)	1,463,646 (100%)	7,165,446 (100%)	450 (100%)	450 (100%)

표 8. 랜덤변수의 통계적 불확실 데이터

랜덤변수 명칭 및 단위	부호	분포형태	평균	변동계수	참고문헌
주형에 사용된 강재의 항복 응력 (kgf/cm ²)	F_y	정규분포	3552.0	0.12	Nowak (1993)
주형의 휨에 대한 모델불확실계수	γ_{mfg}	정규분포	1.11	0.11	Nowak (1993)
주형의 전단에 대한 모델불확실계수	γ_{msg}	정규분포	1.14	0.12	Nowak (1993)
아스팔트의 단위중량에 대한 불확실계수	$\lambda_{asphalt}$	정규분포	1.00	0.25	Nowak (1993)
콘크리트의 단위중량에 대한 불확실계수	λ_{conc}	정규분포	1.05	0.10	Nowak (1993)
강재의 단위중량에 대한 불확실계수	λ_{steel}	정규분포	1.03	0.078	Nowak (1993)
활하중에 대한 불확실계수	DF	정규분포	0.926	0.124	Zokaie 등 (1991)
충격계수에 대한 불확실계수 (시간 1, 시간 3)	I_{hcom}	정규분포	1.045	0.10	Nowak 등. (1994)
충격계수에 대한 불확실계수 (시간 2)	I_{hcom}	정규분포	1.027	0.10	Nowak 등. (1994)
하중과 저항에 대한 불확실 계수 (식 11)	S_r	대수정규분포	-	0.1718**	Albrecht (1983)
부식개시 시간	T_{CI}	대수정규분포	15	0.3	Nowak (1999)
재도장 주기	T_{REP}	정규분포	20	0.25	Maunsell Ltd (1999)
부식률 / 시간과 관련된 매개변수 (ENV-R)	C, M	정규분포	34/0.65	0.09/0.10	Albracht와 Naeemi (1984)
부식률 / 시간과 관련된 매개변수 (ENV-U)	C, M	정규분포	80/0.593	0.42/0.40	

** : 용접상세 C에 대한 표준편차 수치임 (도로교설계기준, 2000)

혹은, 교체 비용이며, 간접적 복구 비용은 인적 혹은 물적 손실비용, 도로이용자 비용, 간접적 사회-경제적 손실로 분류된다.

본 연구에서는 기대복구비용의 산정에 필요한 년 파괴확률을 구하기 위하여 주형의 강도 및 피로 한계상태를고려하였는데, 표 5와 6에는 대상교량의 LCC 산정을 위해 고려된 한계상태에 대한 직·간접 복구 비용산정을 위한 데이터(보수·보강방법, 단위 보수·보강 비용, 보수보강 공사기간, 교량구간 시간지연)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. 위의 표 7은 교량의 기 설계된 값의 직·간접복구비용에 대한 산정결과를 보여주고 있다. 전술된 바와 같이 본 적용 예에서는 일평균교통량이 많은 대도시와 적은 소도시에 대해 도로이용자 비용에 대한 사회-경제 손실 비율을 각각 150%와 50%를 적용하였다. 표 7에서 제시된 바와 같이 간접 복구비용은 총 복구비용의 97~99%정도이기 때문에 교통통제가 발생하는 복구공사의 경우에는 간접비용이 LCC산정에 있어서 매우 중요하게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구에서 LCC를 산정하기 위해 필요한 시물레이션 및 신뢰성해석에 사용된 각 랜덤변수의 확률 특성치인 분포형태, 평균 및 분산정도는 표 8에 정리하여 놓았다. 표 8에 제시된 데이터는 다양한 문헌(Nowak, 1993, 1994, Zokaie et. al., 1991; Albrecht, 1983; Albracht and Naeemi, 1984; Maunsell Ltd, 1999)에 기초하고 있다.

4.3. 연 파손확률에 대한 부식환경 및 교통량효과

LCC최적설계에 앞서 부식환경 및 교통량이 연 파손확률에 미치는 효과를 고찰해 보기 위해 대상교량의 기설계된 값과 표 9와 같은 4가지 Case에 대해 분석을 수행하였다.

표 9. 연 파손확률에 대한 부식환경 및 교통량효과의 고찰을 위해 적용된 Case

Case ID	일 평균교통량	부식환경
Case 1	ADTV-L	ENV-U
Case 2	ADTV-L	ENV-R
Case 3	ADTV-S	ENV-U
Case 4	ADTV-S	ENV-R

ADTV-L : 많은 일평균 교통량 ENV-R : 일반 부식환경
ADTV-S : 적은 일평균 교통량 ENV-U : 심각한 부식환경

그림 8은 설계그룹 2의 생애주기동안의 극한 휨강도에 대한 평균과 표준편차를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 일반 부식환경(Case 2, 4)인 경우는 극한 휨강도의 감소가 심각한 부식환경(Case 1, 3)과 비교할 때 적게 나타나고 있으며, 본 연구에서 제안한 주기적인 재도장효과를 반영한 부식모델을 사용하고 있어 지수적인 감소라기보다는 마치 계단적인 감소를 보이고 있음을 알 수 있다. 한편 일반 부식환경의 경우 보다 심각한 부식환경의 경우 시간에 따른 평균 극한 휨강도에 대한 표준편차가 크게 증가하는 것을 확인해 볼 수 있는데, 이는 단순히 표 8에 제시된 불확실 데이터에 기인된 결과이다. 그림 9는 일평균교통량에 의한 활하중이 생애주기동안의 대상교량 설계그룹 2의 최대 모멘트에 미치는 영향을 나타내고 있다. 시간에 따른 활하중에 의한 최대 단면력의 평균과 표준편차를 산정하기 위해, 본 예제에서는 건설교통부 도로교설계기준에서 제시된 DB-18 하중과 상응하는 HS-20 트럭에 대해 제시된 Nowak의 그래프(Nowak, 1993)를 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이, HS-20 트럭에 대한 활하중 모멘트 비는 많은 일평균교통량(혹은 많은중차량통행량)을 적용한 Case 1, 2에서 1.0~1.55이고, 적은일평균교통량(혹은 적은중차량통행량)을 적용한 Case 3, 4(보통 ADTV가 적용)에서 1.0~1.53으로 나타났다. 즉 교통량이 많은 경우 생애주기 동안 더 큰 단면력이 발생할 수 있음을 본 예를 통해 확인할 수 있다.

그림 10에서는 설계그룹2의 휨에 대한 생애주기동안의 연 파손확률에 대한 부식환경과 교통량의 영향을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, Case 1, 3과 같이 심각한 부식환경에서는 시간이 지남에 따라 연 파손확률이 증가되며, 특히 Case 1과 같이 교통량이 많고 심각한 부식환경인 경우는 더욱 현저한 결과를 나타낼 수 있다. 반면 일반 부식환경인 Case 2, 4에 대한 연 파손확률은 일평균교통량에 관계없이 점차 감소함을 알 수 있다.

이상의 결론으로부터 부식환경과 교통량은 모두 구조물의 연 파손확률에 중요한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

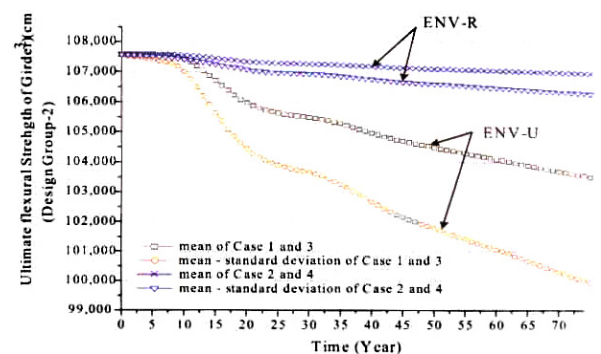


그림 8. 대상교량 설계그룹 2의 생애주기 극한 휨강도

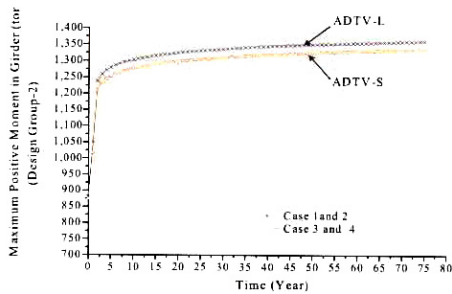


그림 9. 대상교량 설계그룹 2의 생애주기 최대 휨 모멘트

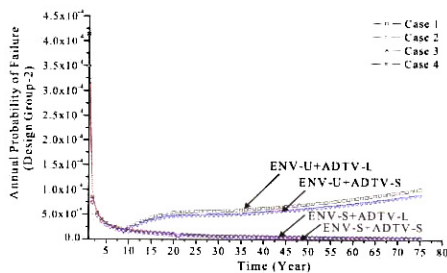


그림 10. 대상교량 설계그룹 2의 생애주기 연 파손확률

4.4. 최적설계 결과 및 고찰

4.4.1. 적은 일평균교통량을 부담하는 교량에 대한 고찰

본 연구에서 제안된 접근방법이 LCC측면에서의 경제성을 검토해보기 위해 대상교량이 표 2에 제시된 바와 같은 적은 일평균교통량을 부담하는 경우에 대해 일반적인 부식환경과 심각한 부식환경에 대해 LCC최적설계를 수행하였다(표 10 참조). 이들의 결과는 표 11에 나타내었다.

또한 등가 LCC 최적설계(equivalent LCC optimum design)를 얻기 위해 실제 재래적 설계에서 사용되는 응력한계와 같은 적정 허용응력비가 사용될 수 있으므로 (조효남, 1998), 적정응력비가 적용된 초기비용 최적설계와 LCC 최적설계 결과를 비교·분석하기 위해 허용응력의 60%~100%에

대해 5%간격으로 초기비용 최적설계를 수행하였다. 각 허용응력별 얻어진 초기비용 최적설계결과에 대해 역시 2가지의 부식환경을 적용하여 LCC최적설계를 추가적으로 수행하였다(표 10참조).

표 10. 대상교량의 LCC 최적설계에서 고려된 조건

구 분	설계방법	부식환경
Case A4	재래적설계	ENV-U
Case B4	초기비용 최적설계	ENV-U
Case C4	LCC최적설계	ENV-U
Case D4		ENV-R
Case I	등가 LCC최적설계	ENV-U
Case II		ENV-R

그림 11은 설계응력수준 변화에 따른 Case I, II의 초기비용 및 총기대 LCC를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와같이 부식환경에 상관없이 Case I, II 모두 허용응력의 85%인 경우에 LCC최적설계가 되는 것으로 나타났으며, 총기대 LCC도 거의 같음을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 8에 나타난 결과에서 예상할 수 있는 관점과는 다소 벗어나는 결과로 판단될 수 있다. 하지만 이러한 결과는 기대복구비용에 중요한 영향을 미치는 있는 교통량 변화를 통해 설명될 수 있다. 이는 다음 절에 구체적으로 설명하였다.

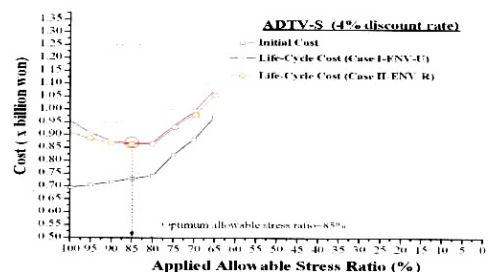


그림 11: 적은 교통량을 부담하는 교량의 허용응력변화에 따른 초기비용 및 LCC

표 11. 수치해석 대상 교량의 최적설계 결과 (4% 할인율)

구 분		재래적설계 (Case A4)	초기비용 최적설계 (Case B4)	LCC 최적설계 및 등가 LCC 최적설계			
				심각한 부식환경(ENV-U)		일반부식환경(ENV-R)	
				Case C4	Case I	Case D4	Case II
복부 높이 (m)		2.00	2.09	2.50	2.50	2.50	2.50
상부플랜지 두께 / 복부두께 / 하부플랜지두께 (mm)	설계그룹 1	10/12/12	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10
	설계그룹 2	12/12/14	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10
	설계그룹 3	16/12/16	10/10/10	11/10/10	12/10/10	11/10/10	12/10/10
	설계그룹 4	26/12/24	14/10/13	19/11/18	20/11/18	19/11/18	20/11/18
	설계그룹 5	16/12/16	10/10/10	11/10/10	12/10/10	11/10/10	12/10/10
	설계그룹 6	12/12/14	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10	10/10/10
비용 (billion won)	초기비용	0.81755	0.68687	0.71826	0.71994	0.71595	0.71994
	기대유지관리비용	0.09259	0.09505	0.10611	0.11245	0.10611	0.11245
	기대강도복구비용	0.01541	0.12052	0.00863	0.00801	0.00319	0.00299
	기대피로복구비용	0.04950	0.10911	0.03233	0.02603	0.03446	0.02011
총 기대 LCC		0.97505	1.01155	0.86533	0.86643	0.85971	0.85549

표 11에는 각 Case에 따른 설계변수의 최적값들을 나타내고 있다. 최적설계 결과들을 검토해 보면, 복부의 높이는 Case B4의 경우 2.09m로 설계되었고, Case C4, D4, I 및 I의 경우에는 2.50m로 설계되었다. 즉 LCC최적설계의 경우가 초기비용최적설계의 경우보다 19.6% 정도 크게 설계되었다. 최대부모멘트 구간(설계그룹 4)에서의 플랜지나 복부의 두께의 경우도 이와 유사한 경향으로 결과가 나타났음을 표 11를 통해 알 수 있다. 즉 이상의 결과를 정리하면, LCC 최적설계의 관점에서는 지배단면의 크기를 감소하는 것보다 오히려 증가하는 것이 더욱 효과적이라고 판단 할 수 있다.

한편 표 11에서는 각 Case들에 대한 초기비용과 LCC 측면에서의 경제적 효과를 나타내고 있다. 각 비용들은 그림 12에 알기 쉽게 도식화하여 놓았다.

표 11과 그림 12에 나타난 바와 같이 초기비용 최적설계인 Case B4의 총 기대 LCC는 10.12 억원이며, LCC 최적설계인 Case C4, D4, I 및 I의 경우는 8.55~8.66억원 으로 초기비용최적설계의 경우가 약 16.8~18.4%비 경제적인임을 알 수 있다. 이러한 결과는 초기비용최적설계의 경우는 단지 교량의 경량화만을 유도하기 때문에 LCC 산정에 고려된 한계상태에 대한 파손확률이 높으며, 이로 인해 기대 복구비용이 증가하기 때문으로 판단된다.

한편 표 11과 그림 12로부터 허용응력비 85%를 적용한 초기비용 최적설계는 LCC 최적설계의 총 기대LCC와 비교해 볼 때 심각한 부식환경과 일반부식환경에 대해 각각 0.127%와 0.493%로 매우 적은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 초기비용 최적설계를 수행하더라도 LCC 측면에서 최적의 설계를 유도 할 수 있도록 최적의 목표 신뢰수준을 간접적으로 반영하는 허용응력 비율을 사용한다면 LCC 최적설계와 유사한 설계결과를 얻을 수 있음을 보여주는 것으로 암시적으로 LCC를 고려한 최적설계를 실용적으로 수행할 수 있다는 것을 의미한다.

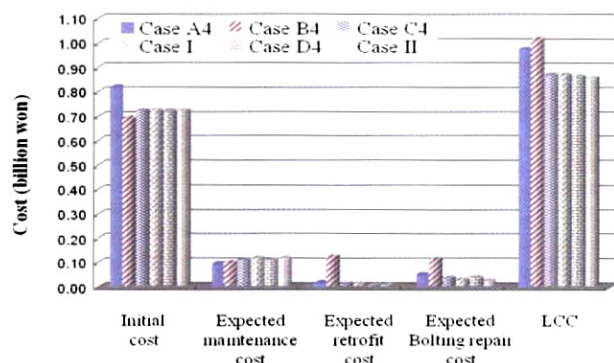


그림 12. 적은 교통량을 부담하는 교량에 대한 Case별 비용

4.4.2. 많은 일평균교통량을 부담하는 교량에 대한 고찰

앞서 언급된 바와 같이 부식환경에 상관없이 Case I, II의 최적설계의 결과들이 유사하게 나타났다. 이러한 결과에 대한 원인을 알아보기 위해, 기대 복구비용의 산정에서 가장 중요한 요소 중에 하나인 일평균교통량이 많은경우의 심각한 부식환경(Case III)과 일반 부식환경(Case IV)에 대한 등가의 LCC 최적설계를 수행하였고, 적정허용응력비 결과에 중점을 두어 추가적으로 고찰해 보았다.

그림 13은 설계응력수준 변화에 따른 Case III, IV의 초기 비용 및 총기대 LCC를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 Case III의 경우의 적정허용응력과 총기대 LCC는 각각 65%와 11.95억원이며, Case IV의 경우는 각각 70%와 10.73억원으로 나타났다. 이는 초기비용과 기대복구비용간의 상대적인 비율이 적은 일평균교통량을 부담하는 교량의 경우보다 더 높아서 부식환경도 LCC최적설계에 영향이 더욱 현저하게 나타나기 때문이다. 즉 많은 교통량을 부담하는 중요한 교량의 경우에는 간접복구비용(도로이용자비용, 사회-경제손실비용)이 크기 때문에 LCC최적설계시 부식환경 또한 중요한 인자로 고려하여 LCC 최적설계가 수행되어야 한다는 것을 보여주고 있는 결과이다.

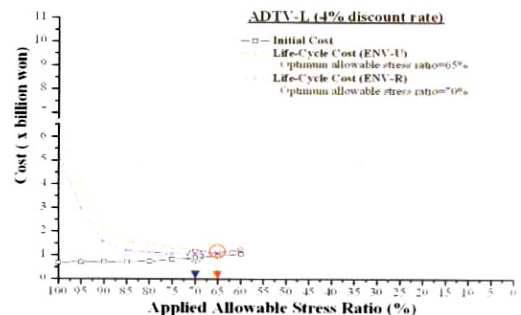


그림 13. 많은 교통량을 부담하는 교량의 허용응력변화에 따른 초기비용 및 LCC

5. 결 론

본 논문에서는 생애주기동안 발생하는 부식이나 중차량의 통행량과 같은 사용환경에 의존하는 강교의 생애신뢰성에 기초한 생애주기비용(Life-Cycle Cost: 이하 LCC) 최적설계 방법론을 제안하였으며, 이를 실제 강박스꺼더교에 적용하여, 다양한 조건에 대한 LCC의 효율성에 대해 비교·고찰하였다. 이와 같은 강교의 LCC 최적설계로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) LCC를 이용한 강교량의 최적설계는 기존의 재래적 설계나 초기비용 최적설계와는 확실히 다른 설계가 유도

된다. 본 논문에서 적용된 강상자형교의 경우에서 알 수 있듯이 지배적인 단면의 크기를 증가시키는 것이 LCC 효과 측면에서 경제적이다.

- (2) 비록 LCC 최적설계에 의한 초기비용이 초기비용최적 설계에서의 초기비용보다 조금 더 비경제적이지만 총 기대 LCC측면에서는 LCC 최적설계에 의한 총 기대 LCC가 초기비용 최적설계에 의한 총 기대 LCC보다 경제적이다. 이는 초기비용 최적설계의 경우 부재의 경량화만을 목적으로 하고 있기 때문에 한계 상태에 대한 초과확률이 LCC 최적설계에서의 초과확률보다 크다는 데에 주 원인이 있다.
- (3) 초기비용최적설계 역시 적정허용응력이나 강도감수계수를 사용한다면 LCC최적설계에 근접한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 방법은 간접적으로 LCC 최적설계를 수행할 수 있어 실용적인 방법으로 실무에서 활용 가능한 방법이라 할 수 있다.
- (4) 또한 본 논문에서는 일평균교통량에 따라 일반 부식환경과 심각한 부식환경에 대해 LCC최적설계를 수행하였다.
 - 심각한 부식환경에서는 시간이 지남에 따라 연 파손 확률이 증가되며, 특히 일평균교통량이 많아 그 에 따라 중차량이 많은 심각한 부식환경인 경우에 더욱 현저한 결과를 주는 것을 알 수 있었으며, 일반 부식 환경의 경우에는 일평균교통량에 관계없이 점차 감소 할 수 있음을 알 수 있었다.
 - 하지만 LCC최적설계의 경우는 물리적인 현상뿐 아니라 경제적인 조건이 동시에 고려되어 나타나는 결과이므로 연 평균파손확률의 결과와 유사한 경향을 나타내지 않을 수 도 있음을 알 수 있었다.
 - 많은 교통량을 부담하는 중요한 교량의 경우에는 간접복구비용(도로이용자비용, 사회-경제손실비용)이 크기 때문에 LCC최적설계 시 부식환경 또한 LCC최적 설계에 중요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

건설교통부(2003) 강교의 최적설계와 경제적인 유지관리를 위한 LCC분석 기법 및 시스템개발, 1차년도보고서.
 건설교통부/시설안전기술공단(2000) 도로교의 공용수명 연장방 안 연구, 시설안전기술공단 연구보고서, BR-2000-R1-37.
 과학기술부(2001) 엔지니어링 사업대가 기준.
 경기개발연구원(1999) 경기도 물류비용 분석 및 물류체계 개선

연구, 최종보고서.
 사단법인 도로교통협회(2000) 도로교설계기준.
 서울특별시건설안전관리본부(2002) 도로관리사업소 시설물유지 보수공사 설계지침.
 서울특별시건설안전관리본부(2002) 도로관리사업소 시설물유지 보수공사 설계지침.
 이광민(2000) 강상판교의 Life-Cycle Cost 설계, 한양대학교 석사학위논문.
 이수범, 심재익(1997) 교통사고비용의 추이와 결정요인, 교통개발연구원 연구보고서, 연구총서, pp.97-09.
 조효남(1998) 강상형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb) 개발, 삼보기술단, 1차년도 보고서.
 한국강구조학회(1997) 고속철도의 강교량 활용화에 관한 연구, 최종보고서.
 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.
 Albrecht, P. and Naeemi, A.H.(1984) Performance of Weathering Steel in Bridges, National Cooperative Highway Research, Report 272.
 Ang, A. H-S., and Tang, W. H.(1984) Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol I and II, John Wiley, 1984.
 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*, 1996;122(5): pp. 337-341.
 Cho, H. N., and Lee, K. M., Choi, Y. M.(2004) Life-Cycle Cost Effective Optimum Design of Steel Bridges, *Journal of constructional Steel Research*, Vol. 60, No. 11, 1585-1613.
 De Brito, J. and Branco, F. A.(1995) Road bridges functional failure costs and benefits, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25: 261-270.
 Ellingwood, E.R., Naus, D.J.(1999) Condition Assessment and Maintenance of Aging Structure in Critical Facilities A probabilistic Approach, Case Study in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructure Systems, ASCE, pp.45-5.
 EMME/2 User's Manual(1999) Software Release 9.0, INRO. 1608-1623.

- 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, University of California Irvine.
 - Maunsell LTD. and Transport Research Laboratory (2000) Optimum Maintenance Strategies for different Bridge Type: Bridge Data, Final Report, The Highways Agency, London
 - Melchers, R. E.(1987) Structural Reliability, Analysis and Prediction, Ellis Horwood Ltd., West Sussex, England.
 - Nowak, A.S.(1993) Calibration of LRFD Bridge Design Code, National Cooperative Highway Research: Final Report.
 - Nowak, A.S., Yamai, A.S., and Tabsh, S.W.(1994) Probabilistic Model for Resistance of Concrete Bridge Girder, *ACI Structure Journal*, Vol. 91, No. 3, pp.269-276.
 - 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, Proc. 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(1994) Fatigue-reliability evaluation of steel bridges, *Journal of Structural Engrg.*, ASCE, 120(5): pp.1608-1623.
- (접수일자 : 2004. 12. 15 / 심사일 2004. 12. 23 /
심사완료일 2005. 3. 15)