

## 경량 콘크리트를 이용한 슬래브교의 생애주기비용 최적설계 Life-Cycle Cost Optimization of Slab Bridges with Lightweight Concrete

정지승\*      조효남\*\*      최연왕\*\*\*      민대홍\*\*\*\*      이종순\*\*\*\*\*  
Chung, Jee-Seung      Cho, Hyo-Nam      Choi, Yun-Wang      Min, Dae-Hong      Lee, Jong-Soon

### ABSTRACT

This study presents a life-cycle cost (LCC) effectiveness of a concrete with lightweight aggregate. A number of researchers have made their efforts to develop a lightweight concrete, since it is difficult to apply conventional concrete using general aggregate to heavy self-weight structures such as long span bridges. In this study, an optimum design for minimizing the life-cycle cost of concrete slab bridges is performed to evaluate the life cycle cost effectiveness of the lightweight concrete relative to conventional one from the standpoint of the value engineering. The data of physical properties for new concrete can be obtained from basic experimental researches. The material properties of conventional one are acquired by various reports. This study presents a LCC effectiveness of newly developed concrete, which is made by artificial lightweight aggregate. A number of researchers have made their efforts to develop a lightweight concrete, since it is difficult to apply conventional concrete using general aggregate to heavy self-weight structures such as long span bridges.

From the results of the numerical investigation, it may be positively stated that the new concrete lead to, the longer span length, the more economical slab bridges compared with structures using general concrete

### 1. 서 론

근래까지 토목재료로 널리 사용하고 있는 일반적인 콘크리트는 다른 재료에 비해 중량이 무겁기 때문에 철근콘크리트만으로 교량을 가설하기 위해서는 여러 가지 제약사항이 존재하였다. 특히 고정하중의 증가로 인한 단기간 교량의 적용과 활하중을 저항하는 내하성능이 떨어지는 점이 대표적인 단점이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 일반 콘크리트보다 자중이 적게 하기 위하여 경량 잔골재를 사용한 콘크리트를 슬래브교에 적용하였다. 경량 잔골재는 기존의 골재에 비하여 단위 중량이 적고 강도가 떨어지지만 콘크리트를 배합할 때 물/시멘트비를 조절하면 기존 콘크리트가 가지는 압축강도를 가지면서 단위중량이 적은 콘크리트를 얻을 수 있다. 하지만 기존 재료에 비해 단위부피당 비용이 비싸다는 단점을 가지고 있다. 이러한 경량 철근콘크리트를 슬래브교에 적용하는데 있어 합리적인 경제성 분석을 위해서는 가치공학(Value Engineering)적 접근방법을 사용하여야 하는데 최근 구조수명간 총기대비용의 최적설계가 설계의 새로운 패러다임으로 부각되고 있는 상황에서 초기건설비용뿐만 아니라 교량의 유지관리, 교통의 원활한 소통 또는 적

\*      정희원 · 동양대학교 지구환경시스템공학과 전임강사  
\*\*     정희원 · 한양대학교 토목환경공학과 정교수  
\*\*\*    정희원 · 세명대학교 토목공학과 조교수  
\*\*\*\*    정희원 · 안산공과대학 토목과 겸임전임강사  
\*\*\*\*\* 한양대학교 토목환경공학과 박사과정

체 등에 따른 비용, 교량의 손상에 따른 보수보강 및 교량의 해체·재건설 등 추가적인 사회비용에 대한 이해가 날로 커지고 있으며 이러한 생애주기비용(Life Cycle Cost : LCC)을 설계단계에서부터 체계적이고 합리적으로 고려해야한다.

최근 LCC를 고려한 설계에 관한 국외 연구로 Brito와 Branco(1994)는 교량의 관리해석 시스템 내에서 발생할 수 있는 이익 및 교량의 기능상의 비용을 포함한 총기대 LCC를 제시한 바 있으며, Frangopol(1997)은 시간경과에 따라 열화손상을 입은 교량의 보수·보강계획을 고려한 LCC 최적화에 대한 연구를 수행하였고, Ellingwood(1997)는 신뢰성에 기초한 프리캐스트 콘크리트 구조의 LCC를 최소화하는 설계를 연구한 바 있다. 국내에서는 조효남(2001)의 강상자형교의 LCC 최적설계에 관한 연구가 있다. 본 연구에서는 경량 철근콘크리트를 적용한 슬래브교와 기존의 콘크리트를 사용한 슬래브교의 생애주기비용 최적설계를 통하여 경제성을 분석하고자 한다.

## 2. LCC 최적설계 문제의 정식화

### 2.1 설계변수

콘크리트 슬래브교의 LCC 최적설계를 위한 대상구조물은 기존의 슬래브교와 경량 잔골재를 사용하는 슬래브교의 총생애주기비용을 비교하기 위하여 가장 일반적인 지간이 9m~14m인 단순교를 선정하였고 설계변수는 구조거동에 가장 지배적인 구조요소인 슬래브의 두께 및 주철근량으로 정하였다. 배력철근은 ‘철근콘크리트 설계기준’(1999)에 근거하여 주철근량에 따라 정하도록 하였으며 그 외에 고정하중을 발생시키는 비구조적인 구조물은 설계상수로 하였다.

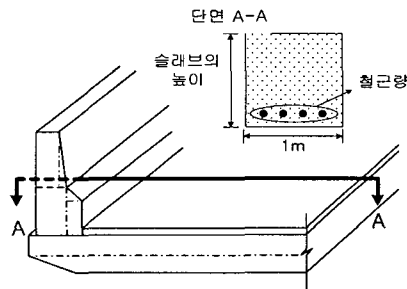


그림 1. 슬래브교의 설계변수

### 2.2 목적함수

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

$$C_T = C_0 + C_M + P_{fu}C_{fu} + P_{fs}C_{fs} \quad (1)$$

여기서,

$C_T$  = 슬래브교의 총기대비용(LCC);  $C_0$  = 초기비용;  $C_M$  = 유지관리비용;  $C_{fu}$ ,  $C_{fs}$  = 강도 보강비용, 사

용성 보강비용;  $P_{fu}, P_{fs}$  = 강도 파손확률, 사용성 파손확률

초기비용은 건설비용과 설계비용, 그리고 하중재하시험비용을 고려하였는데, 설계와 하중재하시험비용은 전문가의 경험에 의한 시공비용의 비율로 결정하였다(de Brito and Branco, 1995). 교량의 유지관리비용은 국내의 교량의 건설계획시 검토한 경제성분석 보고서 자료와 적용대상 교량에 적합한 사례 등을 참조하여 산출하면 되지만 시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령(1995)에 따라 초기비용의 10%로 정식화하였다. 보강비용( $C_{fu}, C_{fs}$ )은 파손확률( $P_{fu}, P_{fs}$ )과 한계상태에 따른 인명과 장비의 손실 비용, 보수·보강 기간동안 교량의 기능상의 장애로 인하여 발생할 수 있는 도로이용자 비용, 환경적 영향과 사회적 비용을 고려하였다(de Brito and Branco, 1995, 1997; Seskin, 1990; Rosenblueth, 1986; Cho et al, 1999). 본 연구에서는 교량이 붕괴에 이르기 전에 보수·보강작업을 수행하는 것으로 가정하였으므로 인명과 장비의 손실 비용은 고려하지 않았다.

### 2.3 제약조건

콘크리트 슬래브교의 LCC 최적설계에 사용되는 제약조건은 실무에서 주로 사용하는 극한강도설계법에 의한 제약조건으로 표 1과 같이 정식화하였다.

표 1. 콘크리트 슬래브교의 제약조건

설계제약조건		기호설명
휨모멘트	$G_1 = \gamma M_n / \phi M_u - 1 \leq 0$	$M_n$ : 공칭모멘트, $M_u$ : 계수모멘트 $\gamma$ : 하중증가계수, $\phi$ : 강도감소계수
최대철근비	$G_2 = \rho / \rho_{\max} - 1 \leq 0$	$\rho$ : 사용철근비 $\rho_{\max} = 0.85 \times 0.75 \times \beta_1 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{f_y} \right) \cdot \left( \frac{6000}{6000 + f_y} \right)$
최소철근비	$G_3 = 1 - \rho / \rho_{\min} \leq 0$	$\rho$ : 사용철근비, $\rho_{\min} = \frac{0.8\sqrt{f_{ck}}}{f_y} \times b_w d \geq \frac{14}{f_y}$
슬래브 최소두께	$G_4 = h_{\min} / h - 1 \leq 0$	$h$ : 슬래브 사용높이, $h_{\min}$ : 슬래브 최소두께
허용처짐	$G_5 = \delta_l / \delta_{all} - 1 \leq 0$	$\delta_d$ : 사하중에 의한 처짐 $\delta_l$ : 활하중에 의한 처짐 $\delta_{all}$ : 허용처짐 (L/360)

## 3. 한계상태모형 및 신뢰성 해석

### 3.1 한계상태 모형

LCC 함수에 정의된 구조물의 파손확률을 고려하기 위하여 각 구조요소의 극한 한계상태모형을 강도파괴인 경우 휨모멘트에 의한 파손으로 정의하고 식(2)에 나타내었으며 활하중 처짐에 대한 사용성 한계상태모형은 식(3)에 나타내었다.

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

$$g(\cdot) = \delta_{all} - \delta_l \quad (3)$$

여기서,

$M_{MR}$  = 실공칭 모멘트;  $M_{MD}, M_{ML}$  = 실작용 고정하중/활하중에 의한 모멘트;  $\delta_{all}$  = 활하중 허용처짐

(L/360);  $\delta_1$  = 활하중에 의한 처짐.

### 3.2 신뢰성 해석

본 연구에서는 제안한 한계상태함수의 요소신뢰성 해석을 위하여, 랜덤변수의 추정, 평균과 분산 또는 공분산에 의해 표준화된 공간에서 파괴면 경계역까지의 최소거리인 신뢰성지수  $\beta$ 를 구하는 개선된 1계 2차 모멘트법(AFOSM)을 사용하였다. 또한 요소신뢰성 해석결과를 이용해 교량의 주요요소의 파괴모드로 구성된 직렬시스템 해석시, 대상 교량의 파손확률을 산정하기 위하여 Ditlevsen 구간해법을 적용하였다.

## 4. 최적화 방법

본 연구의 최적화 방법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM(Augmented Lagrange Multiplier) 방법과 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldforb-Shanno) 방법을 사용하였다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS (Automated Design Synthesis)를 이용하여 수행하였고 구조해석은 유한요소법을 사용하였다.

## 5. 적용예

### 5.1 대상구조물의 일반사항

기존의 재료와 경량 철근콘크리트를 사용한 슬래브교의 LCC 최적설계를 통하여 각각의 LCC를 비교·분석하기 위하여 경부고속도로 상의 한지점에 9m~14m의 단순교로 가정하여 적용하였다. 폭원은 20.9m이고 설계하중은 DB24, DL24를 적용하였다. 그 외 대상구조물의 사용재료는 표 2에 나타내었다.

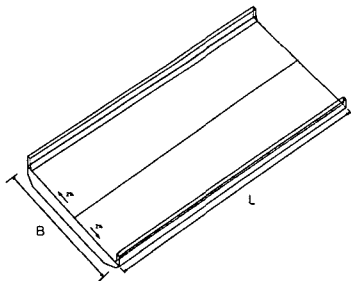


그림 2. 대상구조물

표 2. 대상구조물의 사용재료

	일반 철근 콘크리트	경량 철근콘크리트	
		경량 잔골재 50%	경량 잔골재 100%
설계기준강도(kg/cm <sup>2</sup> )	240	240	240
탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )	2.324 × 10 <sup>9</sup>	2.208 × 10 <sup>9</sup>	2.092 × 10 <sup>9</sup>
단위중량(kg/m <sup>3</sup> )	2500	2300	2150
철근항복응력(kg/cm <sup>2</sup> )	3000	3000	3000
재료비(만원/m <sup>3</sup> )	6	7	8

### 5.2 생애주기비용의 계산

#### 5.2.1 초기비용 및 유지관리비용의 정식화

초기비용은 교량의 설계와 시공 그리고 개통전 하중시험에 관련된 비용이다. 이 중에서 시공비용의 산정은 그와 관련된 도로공사 실시설계기준[2000]을 참고해 일반 콘크리트인 경우 단위부피당 20.9만원, 경량 잔골재가 50%인 경량 철근콘크리트의 경우 단위부피당 21.9만원, 경량 잔골재가 100%인 경량 철근콘크리트의 경우 단위부피당 22.9만원, 철근의 경우 단위중량당 165만원으로 정하였다. 또한 설계비용과 하중시험에 관한 비용은 각각 시공비용의 7%와 3%로 정하였으며 다음과 같이 정식화하였다.

$$C_0 = C_{0D} + C_{0C} + C_{0T} \quad (4)$$

여기서,

$C_0$ = 초기비용;  $C_{0D}$ = 설계비용(건설비용의 7%);  $C_{0C}$ = 건설비용;  $C_{0T}$ = 하중시험비용(건설비용의 3%)

유지관리비용( $C_M$ )은 국내의 교량의 건설계획서 검토한 경제성분석 보고서 자료와 적용대상교량에 적합한 사례 등을 참조하면 산출되지만 관련자료[시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령, 1995]에 따라 초기비용의 10%로 정식화하였다.

### 5.2.2 보강기대비용의 정식화

보강기대비용은 보수·보강과 같은 직접비용과 도로이용자비용 및 간접적 지역 경제손실비용과 같은 간접비용으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 강도파손과 파다치짐시 직접비용을 산정하기 위해 전문가의 견해, 각종 공사자료에 근거하여 교량의 보수·보강 방법 및 공사기간을 정하였고 표 3에 나타내었다.

표 3. 보강기대비용 계산을 위한 보강방법 및 공사기간

파손종류	강도파손	사용성(치짐)파손
적용공법	부분교체	프리스트레싱
공사기간	3개월	2주

간접비는 크게 도로이용자 비용과 간접적 지역경제 손실비용으로 나눌 수 있다. 일반적으로 도로이용자비용( $C_T$ )은 차량운행비용, 시간지연비용, 사고비용, 불편함의 비용, 환경영향비용 등 5가지 항목으로 크게 평가되어 왔다[Berthelot 등, 1996]. 이 중 가장 중요하게 고려되는 항목은 시간지연비용( $C_{TDC}$ )과 차량운행비용( $C_{VOC}$ )으로서 이 두 비용의 합으로 도로이용자비용을 모델링하였다. 일단 손상이 발생하면 위관조사나 보수, 복구기간 동안 모든 차량이 우회하는 것으로 가정하였다.

$$C_T = C_{TDC} + C_{VOC} \quad (5)$$

$$C_{TDC} = t_R \sum TN_p u_t \Delta t_d \quad (6)$$

$$C_{VOC} = t_R \sum [\sum T u_f \Delta t_d + \sum T (u_{cd} l_d - u_{co} l_o)] \quad (7)$$

여기서,

$t_R$  = 복구기간(일);  $T$  = 우회도로에서의 일일평균교통량;  $N_p$  = 평균재차인원수;  $u_t$  = 1인당 시간가치(원/시간/인);  $\Delta t_d$  = 증가차량에 의한 지연시간;  $u_f$  = 차량의 단위고정비(원/시간/대);  $u_{co}, u_{cd}$  = 교통통제 전/후의 단위유류비용(원/시간/대);  $l_o, l_d$  = 원래도로연장과 우회한 도로연장(km)이다.

시간지연비용은 승용차, 택시 그리고 버스에 대한 각각의 업무교통량 및 비업무교통량에 대한 단위 시간가치가 다르므로 구분하여 적용하여야 한다. 택시운전자의 시간가치는 차량운행비용의 고정비인 운전자의 인건비에서 고려되므로 운전자에 대한 비용의 중복계산을 피하기 위해 비용산출시 각 차량별 평균 재차인원에서 1명씩을 감하여 구하였다. 차량운행비용은 고정비와 변동비의 항목으로 분류하였는데 고정비의 경우는 택시, 버스 그리고 화물차의 각각에 대한 차량 1대 당 고정비용과 각각의 차종별 교통량을 곱하여 구할 수 있으며 주로 운전자의 인건비를 고려하여 각각의 차종에 따른 시간당 고정비용을 통해서 산정하였고 변동비의 경우

는 정상도로에서 우회도로를 이용함으로써 발생할 수 있는 추가된 연장이나 차량속도저하로부터 발생할 수 있는 추가 연료비의 항목으로 추정될 수 있으며 차량의 종류 및 주행속도에 따른 단위거리 당 연료소모량은 교통개발연구원(손의영, 1992) 연구에서 제시한 방법을 이용하여 연료비를 추산하였다

도로이용자 비용이 결정되면 간접적 지역경제 손실비용은 도로이용자 비용의 함수로 나타낼 수 있다. Seskin(1990)은 이러한 간접적 지역경제편익은 도로이용자편익의 50~150%정도로 산정되어짐을 제시한 바 있다. 따라서 본 논문에서는 간접적 지역경제 손실비용을 구체적으로 모델링하지는 않았지만 적용교량의 사회적 중요성을 감안하여 도로이용자비용의 150%로 가정하였다.

이에 따라 본 연구에서 간접비용을 산정한 결과 사용성과손과 강도손의 비용은 초기비용의 2240배, 4810배인 것으로 나타났으며 이는 보강기간에 근거한 간접비용이 보강비용의 산정에 있어서 가장 지배적인 인자이며, 이것은 LCC의 평가에서 실제 기대되는 보강 작업시간을 사용하는 것이 매우 중요하다.

### 5.3 통계적 불확실량

본 연구에서 체계신뢰성해석을 수행하기 위한 통계적 불확실량은 재료강도와 하중변수를 제외하고는 불확실량의 본질적인 특성이나 관련 데이터의 부족으로 인하여 국내·외의 관련연구[Ellingwood, 1980; Cho, 1989; Hart, 1982]를 참조하였고, 주로 경험과 판단에 의존하여 국내의 현실을 고려하는 값으로 추정하였다. 저항의 경우 평균공칭비는 1.1, COV는 0.12, 분포형은 Normal분포이며, 사하중의 경우 평균공칭비는 1.05, COV는 0.1, 분포형은 Normal분포이고 활하중의 경우 평균공칭비는 1.24, COV는 0.25, 분포형은 Lognormal 분포로 가정하였다.

### 5.4 결과 및 분석

경량 잔골재와 일반 콘크리트를 사용한 슬래브교의 기간별 총기대비용을 분석하기 위하여 초기비용 최적설계와 생애주기비용 최적설계를 수행하였으며 수치해석 결과를 표 4와 표 5에 각각 나타내었다. 또한 그림 3과 그림 4는 초기비용 최적설계와 생애주기비용 최적설계에서 얻은 총기대비용을 교량의 기간별로 나타내었다.

표 4. 초기비용 최적설계 결과

	일반 콘크리트			경량 철근콘크리트					
				경량 잔골재 50%			경량 잔골재 100%		
기간(m)	10	12	14	10	12	14	10	12	14
슬래브두께(cm)	51.95	72.26	95.68	51.95	69.68	99.75	51.95	67.87	95.68
단위폭당 철근량(cm <sup>2</sup> )	60.77	64.00	64.00	59.27	64.00	64.00	58.07	64.00	64.00
초기비용(×만원)	4835.81	7997.50	12820.52	4940.06	7890.10	13071.21	5045.21	7855.98	12820.52
유지관리비용(×만원)	483.58	799.75	1282.05	494.01	789.01	1307.12	504.52	785.60	1282.05
강도기대파손비용(×만원)	12687.78	17888.96	26801.58	13265.66	18543.12	26660.54	14018.63	19248.09	26801.58
사용성기대파손비용(×만원)	4399.23	2.12	0.01	5166.04	3.11	0.08	5874.05	28.70	1.50
총기대비용(×만원)	22406	26688	40904	23866	27225	41039	25442	27918	40906

표5. 생애주기비용 최적설계 결과

지간(m)	일반 콘크리트			경량 철근콘크리트					
				경량 잔골재 50%			경량 잔골재 100%		
	10	12	14	10	12	14	10	12	14
슬래브두께(cm)	61.88	91.80	134.93	60.75	89.53	127.74	60.08	84.87	118.14
단위폭당 철근량( $\text{cm}^2$ )	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00
초기비용(×만원)	5731.58	10104.70	17213.61	5754.61	10078.39	16671.71	5815.50	9771.43	15771.63
유지관리비용(×만원)	573.16	1010.47	1721.36	575.46	1007.84	1667.17	581.55	977.14	155.16
강도기대파손비용(×만원)	496.58	1008.36	2879.40	460.92	805.34	2552.11	426.42	1087.75	2868.24
사용성기대파손비용(×만원)	0.06	0.03	0.01	0.09	0.05	0.02	0.19	0.07	0.03
총기대비용(×만원)	6801	12124	21814	6791	11892	20591	6824	11836	20217

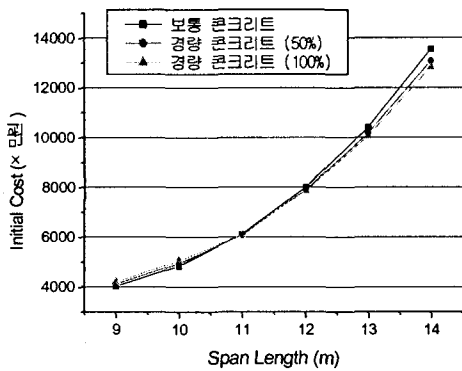


그림 3 초기비용 최적설계에 의한 초기비용

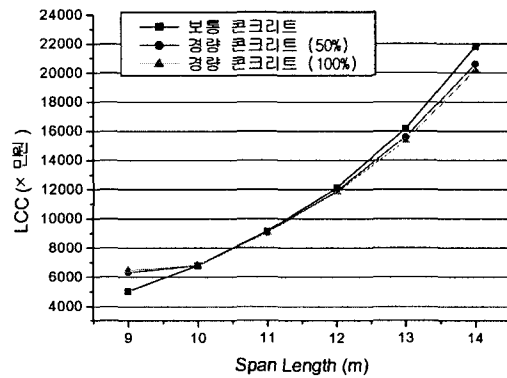


그림 4. 생애주기비용 최적설계에 의한 LCC

생애주기비용 최적설계에서 설계변수인 철근량이 단위폭당  $64\text{cm}^2$ 로 나온 이유는 슬래브교의 주철근배근이  $D29@100$  이상이 되면 순간격이 나오지 않아 배근이 되지 않기 때문에 이에 대한 한계계약조건에 수렴한 것으로 보여진다. 또한 경량 철근콘크리트 슬래브교의 경우 약 17m까지 설계가 가능하지만 일반 콘크리트를 사용한 슬래브교의 경우 15m 이상이면 단면두께가 최소철근비 제약조건을 만족하지 않아 수렴하지 않기 때문에 각각의 재료에 따른 상대적인 비교를 위하여 본 예제에서는 교량지간을 14m까지만 설계결과를 나타내었다. 이는 경량 철근콘크리트를 사용할 경우 자중인 고정하중의 효과를 줄일 수 있어 보다 긴 지간에 적용이 가능하다는 것을 보여주는 것이다. 표 4의 초기비용 최적설계의 경우 총기대비용이 표 5의 생애주기비용 최적설계의 약 2~3.3배정도로 나타나 초기비용은 약 15~20%정도 절감되지만 구조물의 생애주기 동안의 가치를 평가하는 총기대비용 측면에서 비경제적임을 알 수 있다. 따라서 새로운 재료를 이용한 구조물의 총기대비용을 평가하기 위해서는 생애주기비용 최적설계가 필수적이다.

그림 3의 지간별 초기비용 최적설계의 초기비용과 그림 4의 생애주기비용 최적설계의 총기대비용에서 교량의 지간이 11m 보다 적을 경우 일반 콘크리트를 사용하는 것이 경제적이고 11m 이상일 경우는 경량 철근콘크리트를 사용하는 것이 초기비용과 총기대비용 측면에서 모두 경제적임을 알 수 있다. 이는 경량 잔골재를 사용한 콘크리트의 경우 단위중량이  $2.15\text{ton}/\text{m}^3$ 으로 일반 콘크리트  $2.5\text{ton}/\text{m}^3$ 의 86% 정도인 반면에  $1\text{m}^3$  당 초기공사비는 일반 콘크리트의 경우 20.9만원에서 경량 철근콘크리트의 경우 22.9만원으로 경량 철근콘크

리트의 초기비용 증가효과가 약 4%에 지나지 않아 시간이 길어서 자중의 영향이 큰 경우 보다 경제적인 것으로 보여진다.

## 6. 결 론

본 연구에서 경량 잔골재를 이용한 슬래브교의 생애주기비용 최적설계를 통해 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 경량 잔골재와 같은 새로운 재료를 이용한 구조물은 초기비용을 줄이는 것보다 생애주기동안의 기대되는 총기대비용의 경제성을 효과적으로 분석하는 것이 중요하며 이를 위해서는 생애주기비용 최적설계가 필수적이다.
- 2) 본 연구의 슬래브교에서 11m이상의 지간을 가질 경우 경량 철근콘크리트를 적용하는 것이 생애주기 동안의 총기대비용 뿐만 아니라 초기비용 측면에서도 경제적이다. 또한 경량 철근콘크리트는 자중의 영향이 적어 일반 콘크리트 슬래브교보다 장지간에 적용할 수 있다.
- 3) 현재의 경량 잔골재를 굵은 골재까지 확대하여 개발하고 실구조물에 적용하기 위하여 생애주기비용을 최소화하는 과학적이고 합리적인 생애주기비용 최적설계를 활용한다면 보다 합리적인 구조물 설계가 이루어질 것이다.

## 참고 문헌

1. Ang, A. H-S. and Tang, W. H. (1984). "Probability Concepts in Engineering Planning and Design." Vol. I and II, John Wiley.
2. de Brito J. and Branco, F. A. (1994). "Bridge Management Policy using cost analysis." Proc. Instn Civ. Engrs Structs and Bldgs, 104, Nov., 431-439.
3. Frangopol, D. M., and Lin, K. Y. (1997). "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures." J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 10.
4. Hart, G. C. (1982). "Uncertainty Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering." Prentice-Hall.
5. Koskito, O. J., and Ellingwood, B. R. (1997). "Reliability-Based Optimization of Plant Precast Concrete Structures." J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 3.
6. Lin, K. Y. (1995). "Reliability-based minimum Life-Cycle Cost Design of Reinforced Concrete Girder Bridges." PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Colorado, Boulder, Colo.
7. Melchers, R. E. (1987). "Structural Reliability, Analysis and Prediction." Ellis Horwood Ltd., West Sussex, England.
8. 도로교설계기준(2000). 사단법인 도로교통협회
9. 손의영(1992). "교통혼잡비용 예측 연구", 교통개발연구원, 교통92-17
10. 이광민(2000). "강상판교의 최적 Life-Cycle Cost설계.", 석사학위논문, 한양대학교
11. 조효남, 민대홍, 권우성(2001). "강상차형교의 LCC 최적설계", 전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집
12. 조효남, 민대홍, 조준석(2001). "고속철도 강교량의 총기대비용 최적설계.", 대한토목학회논문집, 제21권, 제5A호.
13. 철근콘크리트 구조설계 기준(1999). 한국콘크리트 학회
14. 한국과학재단(1999). "장대 PC교량의 설계 및 성능개선을 위한 신뢰성에 기초한 지진안전도 및 최적성능 규준 개발" 보고서.