

강상형교의 최적 Life Cycle Cost 설계 Optimum Life Cycle Cost Design of Steel Box Girder Bridges

조 효 남* 민 대 홍** 김 구 선***
Cho, Hyo-Nam Min, Dae-Hong Kim, Koo-Sun

ABSTRACT

This paper presents an optimal decision model for minimizing the life-cycle cost of steel box girder bridges. The point is that it takes into account service life process as a whole, and the life-cycle costs include initial (design, testing, and construction) costs, maintenance costs and expected failure costs. The problem is formulated as that of minimization of expected total life-cycle cost with respect to the design variables. The optimal solution identifies those values of the decision variables that result in minimum expected total cost. The performance constraints in the form of flexural failure and shear failure are those specified in the design code. Based on extensive numerical investigations, it may be positively stated that the optimum design of steel box girder bridges based on life-cycle cost approach proposed in this study provides a lot more rational and economical design, and thus the proposed approach will propose the development of new concepts and design methodologies that may have important implications in the next generation performance-based design codes and standards.

1. 서 론

근래까지는, 신설교량에 대한 건설계획을 세울 때에 일반적으로 건설이후에 수반되는 중·장기적인 추가비용보다는 설계 및 건설 등의 초기비용에 국한해서 고려하는 경우가 많았다. 그러나, 최근에는 초기비용 이외에도 교량의 유지관리, 교통의 원활한 소통 또는 적체 등에 따른 비용, 교량의 손상에 따른 보수보강 및 교량의 해체·재건설 등 추가적인 비용에 대한 이해가 날로 커지고 있으며 이러한 일련의 공용간 총기대비용(Life Cycle Cost : LCC)을 설계단계에서부터 체계적이고 합리적으로 고려하고 있는 추세이다.

본 연구의 목적은 교량의 전 공용과정과 설계비용, 초기비용(설계비용, 시험비용, 건설비용) 및 유지보수비용과 기대파괴비용 등을 포함하는 LCC에 근거한 최적의 비용함수모형을 이용하여 강상형교의 최적설계에 적용·분석하는 것이다. 즉, LCC에 근거하여 설계기준을 결정하기 위한 모델과 방법을 제시하고, 이를 각기 다른 허용응력 적용비율에 따라 최적설계를 수행함으로써 최적의 LCC를 제시하며 구조물 파괴비용에 관한 민감도 분석을 통하여 효율적이고 합리적인 비용산정의 근거를 제시하고자 한다. 강상형교의 기대파괴비용을 결정하는 파괴확률을 구하기 위한 체계신뢰성 기법으로는 직렬파괴모드를 적용한 Ditlevsen 구간해법을 이용하여 극한강도 한계상태 파괴확률을 구하였고, 여기에 교량의 전 공용간 파괴비용을 예측·적용함으로써, 구조물의 LCC를 설계단계에서 효율적으로 최소화하는 모형을 제시하고자 한다.

* 한양대학교 토목·환경공학과 교수
** 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정
*** 한양대학교 토목공학과 석사과정

2. 강상형교의 LCC 최적설계 문제의 정식화

2.1 설계변수

강상형교의 설계변수는 강상형교의 형고와 주형의 폭 등을 포함하는 전 구조요소의 크기를 사용할 수 있으며 설계자의 판단에 따라 선택적으로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 강상형교의 상부구조 건설공비에 직접영향을 주는 플랜지·웨브의 두께, 바닥판의 두께를 설계변수로 정하였다.

2.2 목적함수

구조물의 설계에 있어 비용해석에 관계된 결과값들이 비용의 가치항으로 표현될 때 기대비용이라 할 수 있으며, 이러한 총기대비용을 최소화하는 것이 바람직하다[Melchers, 1987].

본 연구에서는 LCC 최적설계를 위해 공용간 총기대비용(Expected Total LCC)을 최소화 하기 위한 비용함수를 식 (1)과 같이 목적함수로 정식화하였다.

$$C_T = C_0 + C_M + P_f C_f \quad (1)$$

여기서, C_T = 총기대비용, C_0 = 초기비용 ($C_0 = C_{OD} + C_{OC} + C_{OT}$), C_{OD} = 설계비용

C_{OC} = 건설비용(= $\gamma_M \cdot C_{EM} \cdot P \cdot \sum W_{Mi}$), C_{OT} = 시험비용, C_M = 유지관리비용

C_f = 극한강도 파괴비용, P_f = 극한강도 시스템 파괴확률

W_{Mi} = 주형의 i번째 부재의 중량, C_{EM} = 주형의 단위비용(= $C_{EM}^M + C_{EM}^L + C_{EM}^W$)

$C_{EM}^M, C_{EM}^L, C_{EM}^W$ = 단위 재료비, 인건비 및 제작비, γ_M = 주형제작의 공비계수

P = 교량의 단위면적당 중량에 대한 보정계수

교량설계시 고려할 수 있는 초기비용(C_0)은, 교량의 설계비용(C_{OD}), 건설비용(C_{OC}) 및 교량의 건설이후 개통전 검증재하시험, 교량건설로 인한 교통량계획 등을 포함하는 시험비용(C_{OT})으로 정식화 하였고, 건설비용을 예측함으로써 교량의 설계비용과 시험비용은 현재의 각종 성능시험에 대한 경험 등을 바탕으로 건설비용의 백분율로 적용하였다[Brito & Branco, 1995]. 교량의 유지비용(C_M)은 국내의 교량의 건설계획시 검토한 경제성분석 보고서 자료와 적용대상교량에 적합한 사례 등을 참조하여 산출하였다[시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령, 1995]. 또한, 교량의 공용간 휨응력 및 전단응력에 의한 한계상태로 모형화한 파괴확률(p_f)과 한계상태에 따른 교량의 파괴 및 교체비용, 인명손실, 기능손실, 교통체증에 따른 손실, 사회적 손실 등 교량의 환경과 조건에 적합한 기대비용을 평가하여 파괴비용(C_f)을 산출하였다[Koskito & Ellignwood, 1997].

2.3 한계상태 모형

LCC 함수에 정의된 구조물의 파괴확률을 고려하기 위하여 각 구조요소의 극한 한계상태모형을 휨모멘트에 의한 플랜지의 파괴와 전단력에 의한 웨브의 파괴로 정의하였다. 전체구조시스템 파괴확률을 구하기 위하여 각각의 요소파괴확률을 직렬시스템으로 정의하고, 구조물의 일부 또는 전체가 구조적 파손을 일으키는 극한강도 한계상태모형을 제안하였다. 휨 모멘트 및 전단을 고려한 각각의 파괴모드에 대한 한계상태함수를 식 (2), (3)과 같이 선형한계상태함수로 정의하였다.

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

$$g(\cdot) = \tau_{SR} - (\tau_{SD} + \tau_{SL}) \quad (3)$$

여기서, σ_{MR} : 실공칭 휨응력, τ_{SR} : 실공칭 전단응력, σ_{MD}, σ_{ML} : 실작용 사하중 및 활하중에 의한 휨응력

τ_{SD}, τ_{SL} : 실작용 사하중 및 활하중에 의한 전단응력

2.4 제약조건

강상형교의 최적설계에 사용되는 제약조건은 거동, 응답, 한계에 대하여 실무에서 주로 사용하는 허용응력설계법(ASD)에 의한 제약조건으로 정식화 하였고 파괴확률산정에 대한 제약조건을 추가로 고려하였다. 이들 제약조건은 표 1에 요약하여 나타내었다.

표 1. 각 부재별 제약조건

구분	제약조건			
바닥판	G_1 =휨강도	G_2 =최소철근비	G_3 =최대철근비	G_4 =최소두께규정
가로보	G_5 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합1)	G_6 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합2)	G_7 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합3)	G_8 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합4)
	G_9 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합5)	G_{10} =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합6)	G_{11} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합1)	G_{12} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합2)
	G_{13} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합3)	G_{14} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합4)	G_{15} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합5)	G_{16} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합6)
	G_{13} =허용전단응력	G_{14} =상연 합성응력	G_{15} =하연 합성응력	G_{16} =최소두께규정
주형	G_1 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합1)	G_2 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합2)	G_3 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합3)	G_4 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합4)
	G_5 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합5)	G_6 =상부플랜지의 허용휨응력(하중조합6)	G_7 =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합1)	G_8 =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합2)
	G_9 =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합3)	G_{10} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합4)	G_{11} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합5)	G_{12} =하부플랜지의 허용휨응력(하중조합6)
	G_{13}^* =바닥판상부의 허용휨응력(하중조합1)	G_{14}^* =바닥판상부의 허용휨응력(하중조합2)	G_{15}^* =바닥판상부의 허용휨응력(하중조합3)	G_{16}^* =바닥판상부의 허용휨응력(하중조합4)
	G_{17}^* =바닥판상부의 허용휨응력(하중조합5)	G_{18}^* =바닥판상부의 허용휨응력(하중조합6)	G_{19}^* =바닥판하부의 허용휨응력(하중조합1)	G_{20}^* =바닥판하부의 허용휨응력(하중조합2)
	G_{21}^* =바닥판하부의 허용휨응력(하중조합3)	G_{22}^* =바닥판하부의 허용휨응력(하중조합4)	G_{23}^* =바닥판하부의 허용휨응력(하중조합5)	G_{24}^* =바닥판하부의 허용휨응력(하중조합6)
	$G_{25}^†$ =상부철근의 허용휨응력(하중조합1)	$G_{26}^†$ =상부철근의 허용휨응력(하중조합2)	$G_{27}^†$ =상부철근의 허용휨응력(하중조합3)	$G_{28}^†$ =상부철근의 허용휨응력(하중조합4)
	$G_{29}^†$ =상부철근의 허용휨응력(하중조합5)	$G_{30}^†$ =상부철근의 허용휨응력(하중조합6)	$G_{31}^†$ =하부철근의 허용휨응력(하중조합1)	$G_{32}^†$ =하부철근의 허용휨응력(하중조합2)
	$G_{33}^†$ =하부철근의 허용휨응력(하중조합3)	$G_{34}^†$ =하부철근의 허용휨응력(하중조합4)	$G_{35}^†$ =하부철근의 허용휨응력(하중조합5)	$G_{36}^†$ =하부철근의 허용휨응력(하중조합6)
	G_{37} =허용전단응력	G_{38} =상연 합성응력	G_{39} =하연 합성응력	G_{40} =최소두께규정
강도에 대한 파괴확률	$G_{41} = p_{fu} - 6.21 \times 10^{-3} \leq 0$			

(*:정모멘트부분, †:부모멘트부분)

여기서, 하중조합1=합성전 사하중, 하중조합2=합성전 사하중+합성후 사·활하중, 하중조합3=합성전 사하중+합성후 사·활하중+크리이프하중, 하중조합4=합성전 사하중+합성후 사·활하중+크리이프하중+건조수축하중, 하중조합5=합성전 사하중+합성후 사·활하중+크리이프하중+온도차하중, 하중조합6=합성전 사하중+합성후 사·활하중+크리이프하중-온도차하중

3. 신뢰성 해석 및 최적화 방법

3.1 신뢰성 해석

본 연구에서는 제안한 한계상태함수의 요소신뢰성해석을 위하여, 랜덤변수의 추정, 평균과 분산

또는 공분산에 의해 표준화된 공간에서 파괴면 경계역까지의 최소거리인 신뢰성지수 β 를 구하는 개선된 1계2차모멘트법(AFOSM)을 사용하였다. 또한, 요소신뢰성 해석결과를 이용해 교량의 주요 요소의 파괴모드로 구성된 직렬시스템(Series System) 해석시, 대상 교량의 파괴확률을 산정하기 위하여 Ditlevsen 구간해법을 적용하였다.

3.2 최적화 기법 및 프로그램

바닥판, 가로보 및 박스주형의 최적설계는 ALM(Augmented Lagrange Method)을 이용하였고 무제약 최소화기법으로는 Variable Metric중 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno)방법을 사용하였으며 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 최적화에 사용된 프로그램은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS(Automated Design Synthesis) [G. N. Vanderplaats, 1985]를 이용하여 수행하였다. 가로보와 주형의 최적설계를 위한 구조해석은 가로보 간격의 변화에 따라 SAP90-BRIDGE 입력파일을 자동 생성하여 합성 전 사하중(콘크리트 바닥판+강재자중)과 합성후 사하중(연석+포장) 및 활하중(DB·DL)에 대한 최대 단면력을 자동으로 탐색하는 최적설계 프로그램[조효남, 1998]을 사용하였다.

4. 적용에 및 고찰

4.1 대상구조물의 일반사항

본 연구에서 제안한 LCC 함수와 각종 시방기준에 의해 정식화된 제약조건을 이용하여 강상형교의 비용최적설계를 수행하였다. 이를 위하여 실제적인 3경간연속 강상형교를 선정하였다. 대상 교량의 일반사항과 사용재료는 표 2, 3에 나타내었고 대표적인 횡단면도와 종단면도를 각각 그림 1, 2에 제시하였다.

표 2. 대상구조물의 일반사항

교량형식	형식	3경간 연속 상자형 강합성교
	지간	50m+60m+50m
	폭	6.5m(1연 상자형)
설계차선평	연석간교폭	5.5m
	차선수	1차선
	설계차선평	5.5m
설계하중	설계하중	DB24, DL24

표 3. 대상구조물의 사용재료

강재	사용강재	SWS 490
	항복응력(kg/cm ²)	3,200
	허용인장응력(kg/cm ²)	1,900
	허용전단응력(kg/cm ²)	1,100
콘크리트	탄성계수(kg/cm ²)	2.04×10 ⁹
	설계기준강도(kg/cm ²)	270
	탄성계수(kg/cm ²)	2.5×10 ⁹
	탄성계수비	8
	사용철근	SD40

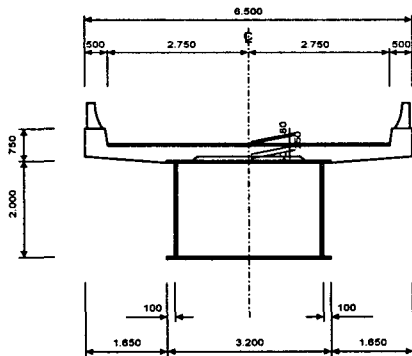


그림 1. 횡단면도

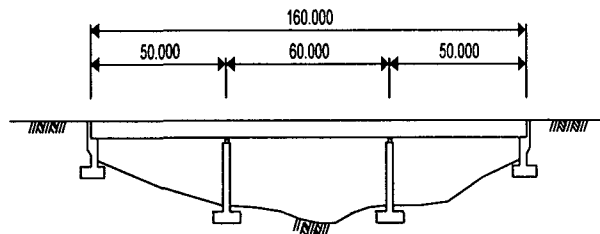


그림 2. 종단면도

4.2 설계변수 및 단위경비

최적설계를 위하여 본 예제에 적용된 강상형 연속교의 설계변수는 상·하 플랜지의 두께, 웨브의 두께, 수평·종방향보강재의 높이 및 두께, 바닥판의 두께로 선정하였고, 설계상수는 주형의 높이와 폭, 보강재의 개수(인장축 2개, 압축축 5개), 바닥판의 폭으로 선정하였다. 상부구조의 초기비용은 97년도 실시설계기준[도로공사, 1997]을 참고로 산정하였다. 파괴비용산정시 적용된 비용계수 10,000 ~ 90,000은 교량의 파괴에 따른 파급효과 및 손실 등에 관계된 비용과 초기비용 및 파괴확률에 미치는 영향을 고려하여 초기건설 비용의 적용계수를 적용하였다 [Brito & Branco, 1995 ; Koskito & Ellignwood, 1997 ; Frangopol et al., 1997].

최소기대비용을 구하기 위하여 식 (1)의 목적함수에 적용된 각 비용들에 대한 세부내용을 표 4에 제시하였다.

표 4. 강상형교의 총기대비용 항목

구 분	내 용	적 용	구 분	내 용	적 용
초기비용 (C_I)	• 설계비용	건설비용의 7%	극한강도 파괴비용 (C_D)	• 구조파괴비용	(10,000 ~ 90,000) $\times C_{oc}$
	• 시험비용	건설비용의 3%		• 교량교체비용	
	• 건설비용	초기비용의 90%		• 인명 및 물자손실비용	
유지관리비용 (C_M)	• 정기점검비용	초기비용의 10%		• 기능손실 손해비용	
	• 정밀안전진단		• 교통지연 손해비용		
				• 교통량 우회비용	
				• 교통체증 손해비용	
				• 환경, 사회적 손실비용	

4.3 통계적 불확실량

본 연구에서 체계신뢰성해석을 수행하기 위한 통계적 불확실량은 표 5에 나타난 바와 같다. 그러나 재료강도와 하중변수를 제외하고는 불확실량의 본질적인 특성이나 관련데이터의 부족으로 인하여 국내·외의 관련연구[Ellingwood, 1980; Cho, 1989; Hart, 1982]을 참조하였고, 주로 경험과 판단에 의존하여 국내의 현실을 고려하는 값으로 추정하였다.

표 5. 저항, 사하중, 활하중 불확실량

구 분	저 항				사 하 중			활 하 중		
	X_M	X_F	X_P	X_{vi}	X_{DAi}	X_{Do}	X_{Di}	X_{LAi}	X_{Lo}	X_{Li}
램덤변수										
평균공칭비	1.1	1.0	1.0	1.1	1.05	1.0	1.05	1.24	1.0	1.24
C O V	0.1	0.05	0.05	0.12	0.08	0.05	0.1	0.22	0.11	0.25
분포형	Normal				Normal			Lognormal		

4.4 수치해석 결과 및 분석

본 연구에서는 최적의 LCC 설계를 수행하기 위하여 파괴비용은 초기건설비용의 5만배로 하여 허용응력 적용비율에 따른 최적설계를 하였고, 식 (1)에서 제시한 초기비용, 파괴확률 및 총기대비용의 결과를 표 6에 나타내었으며, 이를 근거로 내측지간 지점부의 상부플랜지의 두께변화를 그림 3에, 초기비용의 변화를 그림 4에, 파괴확률의 변화를 그림 5에, 그리고 총기대비용의 변화를 그림 6에 나타내었다. 또한, 표 4에서 제시한 파괴비용을 초기건설비용의 1만배에서 9만배까지 적용비율을 변화해가며, 설계치가 가장 큰 내측지간 지점부 플랜지·웨브 두께 및 초기비용, 파괴확률 등의 최적설계 결과를 표 7에 나타내었고, 이때 초기비용 및 파괴비용의 변화를 그림 7과 8에 나타내었다.

표 6. 허용응력 적용비율 변화에 따른 최적설계결과 ($C_f = 50,000 \times C_{oc}$)

	외측지간 지점부(mm)			외측지간 중앙부(mm)			내측지간 지점부(mm)			내측지간 중앙부(mm)			파괴확률 ($\times 10^{-2}$)	초기비용 (억원)	총기대비용 (억원)	
	플랜지		웹	플랜지		웹	플랜지		웹	플랜지		웹				
	상부	하부		상부	하부		상부	하부		상부	하부					
허용응력 적용비율 (%)	90	10.0	10.0	10.0	10.0	13.5	10.0	25.2	25.0	17.6	10.0	10.0	10.0	0.4494	17.96698	2356.982
	85	10.0	10.0	10.0	10.0	14.7	10.0	27.0	26.9	18.7	10.0	10.2	10.0	0.4373	18.17925	2320.090
	80	10.0	10.0	10.0	10.2	16.1	10.0	29.2	28.9	20.2	10.0	11.0	10.0	0.4257	18.44698	2293.104
	75	10.0	10.0	10.0	10.4	18.2	10.0	32.1	31.6	22.4	10.0	12.1	10.0	0.4094	18.84961	2253.944
	70	10.0	10.0	10.0	10.5	19.2	10.0	34.1	33.5	23.7	10.0	13.0	10.0	0.4070	19.14204	2275.954
	65	10.0	10.0	10.3	10.5	21.6	10.0	37.9	37.2	26.0	10.0	14.2	10.0	0.4052	19.64974	2325.719
	60	10.0	10.3	11.6	10.6	23.9	10.0	42.3	41.4	28.3	10.0	15.8	10.0	0.3987	20.30016	2364.142

표 7. 허용응력 및 파괴비용 적용비율에 따른 최적설계결과

허용응력 적용비율 (%)	파괴비용 적용비율 (C_f)	내측지간 지점부(mm)			파괴확률 ($\times 10^{-2}$)	초기비용 (억원)	총기대비용 (억원)
		플랜지		웹			
		상부	하부				
85	$10,000 \times C_{oc}$	27.1	26.9	18.7	0.4358	18.19503	473.3153
	$30,000 \times C_{oc}$	27.0	26.7	19.0	0.4362	18.18954	1395.0150
	$50,000 \times C_{oc}$	27.0	26.9	18.7	0.4373	18.17925	2320.0900
	$70,000 \times C_{oc}$	27.1	26.8	18.8	0.4372	18.18522	3244.4730
	$90,000 \times C_{oc}$	27.0	26.8	18.9	0.4379	18.18290	4173.9780
75	$10,000 \times C_{oc}$	31.9	31.5	21.6	0.4086	18.77283	458.6788
	$30,000 \times C_{oc}$	31.7	31.3	22.0	0.4174	18.83261	1382.5340
	$50,000 \times C_{oc}$	32.1	31.6	22.4	0.4094	18.84961	2253.9440
	$70,000 \times C_{oc}$	31.6	31.2	22.0	0.4136	18.76603	3167.6840
	$90,000 \times C_{oc}$	31.5	31.1	22.0	0.4180	18.76182	4111.5160

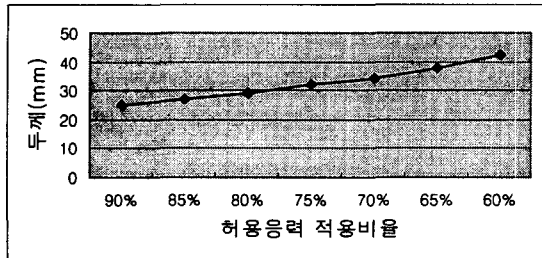


그림 3. 허용응력 적용비율 변화에 따른 내측지간 지점부 상부플랜지의 두께변화

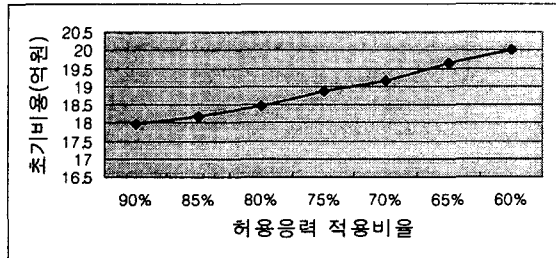


그림 4. 허용응력 적용비율 변화에 대한 초기비용의 변화

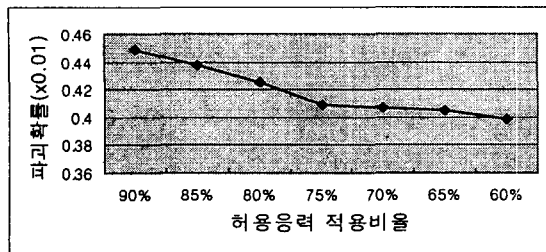


그림 5. 허용응력 적용비율 변화에 대한 파괴확률의 변화

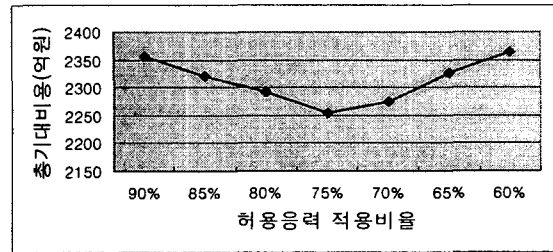


그림 6. 허용응력 적용비율 변화에 대한 총기대비용의 변화

그림 3에서 보는 바와 같이 파괴비용 적용비율이 초기건설비의 5만배로 하고 허용응력 적용비율을 90%에서 60%까지 변화시켜 적용하였을 때, 내측지간 지점부의 상부플랜지 두께는 25.2mm에서 42.3mm로 67.9% 증가하고 있어, 플랜지의 두께가 허용응력 적용비율에 직접적으로 영향을 받는다고 판단된다. 그림 4는 파괴비용 적용비율이 초기건설비의 5만배로 하고 허용응력 적용비율 90%에서 60%까지 변화 함에 따라 초기비용이 17억 9천만원에서 20억 3천만원으로 13%증가하고 있음을 보여주고, 그림 5는 허용응력 적용비율을 90%에서 60%로 변화함에 따라 파괴확률이 0.4494×10^{-2} 에서 0.3987×10^{-2} 로 12.7% 감소하고 있음을 보여주고 있다. 그리고 허용응력 적용비율 90%일 때 파괴확률은 0.4494×10^{-2} 이고 허용응력 적용비율 60%일 때의 파괴확률은 0.3987×10^{-2} 이다. 이와 같은 파괴확률은 본 적용예에서 교량의 시스템파괴 모델링을 주요부재파괴에 대하여 직렬체계로 정식화한 데 따른 해석결과로 사료된다.

그림 6의 총기대비용결과를 살펴보면, 총기대비용은 허용응력 적용비율이 90%에서 75%일 때 감소하다가 75%에서 60%일 때 증가하고 있다. 즉, 허용응력 적용비율이 90%에서 75% 일 때 파괴확률은 0.4494×10^{-2} 에서 0.4094×10^{-2} 로 9.8% 감소하는 반면, 초기비용은 17억 9천만원에서 18억 8천만원으로 4.9% 증가하였으며, 이때 전체적인 총기대비용은 2357억원에서 2253억 9천만원으로 4.6% 감소하였다. 또한 허용응력 적용비율이 75%에서 60%구간에서 파괴확률은 0.4094×10^{-2} 에서 0.3987×10^{-2} 로 2.7% 감소하고 초기비용은 18억 8천만원에서 20억 3천만원으로 8% 증가하였으며, 이때 전체적인 총기대비용은 2253억 9천만원에서 2364억 1천만원으로 4.9% 증가하였다. 이는 최적 LCC가 허용응력 적용비율이 90%에서 75%일 초기비용 보다는 파괴확률에 더욱 민감하고, 허용응력 적용비율이 75%에서 60%일 때 초기비용 보다는 파괴확률에 더욱 민감하기 때문이라 판단된다. 따라서, 본 적용예의 LCC는 허용응력 적용비율이 75%일 때 가장 경제적임을 알 수 있다.

표 7에서 파괴확률 적용비율이 1만배에서 9만배 까지 변화함에 따라 내측지간 지점부 상부플랜지의 두께는, 허용응력 적용비율이 각각 85%, 75%일 때 평균 27mm 와 31.8mm로 거의 변함이 없다. 그림 7에서 허용응력 적용비율이 각각 85% 및 75%일 때, 파괴확률 적용비율이 1만배에서 9만배까지 변화함에 따라 초기비용의 최대변화율은 0.09%로 거의 변함이 없고 그림 8에서 허용응력 적용비율 85% 및 75%일 때 파괴확률도 거의 0.4358×10^{-2} 과 0.4086×10^{-2} 에서 변화를 보이지 않고 있다. 이는 파괴비용 산정을 위해 교량의 사회적, 경제적 중요도에 따른 파괴비용 적용율이, 설계단계에 있어서 초기비용 및 파괴비용에 민감하지 않아 최적 LCC에 큰 영향을 주지 않는다고 판단된다. 따라서 설계단계에서 파괴비용을 산정함에 있어 정밀한 해석보다는 근사한 추정으로도 최적 LCC 설계를 유도함을 알 수 있다.

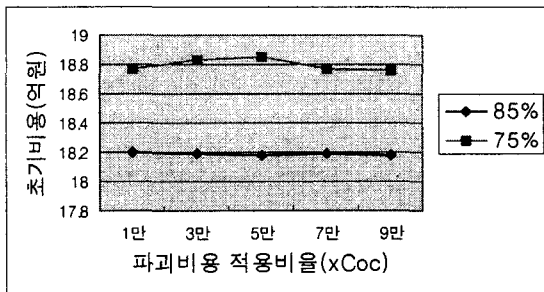


그림 7. 파괴비용 적용비율 변화에 대한 초기비용의 변화

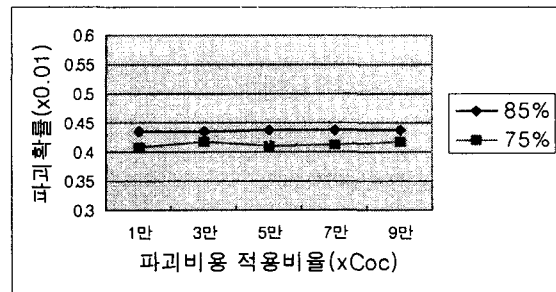


그림 8. 파괴비용 적용비율 변화에 대한 파괴확률의 변화

5. 결 론

본 연구에서 적용예를 통하여 강상형교의 최적 LCC 설계에서 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 강상형교의 최적설계를 통하여 기존의 초기비용에 국한한 설계법과는 달리 공용간 유지관리비용 및 파괴비용을 고려함으로써 LCC를 설계단계에서부터 효율적으로 최소화할 수 있다.
2. 본 적용예와 같은 구조물에서는 허용용력 적용비율이 75%를 적용한 최적설계가 최적 LCC 설계로 이루어지고 있다. 따라서, 기존의 초기비용만을 최소화하는 최적설계보다 합리적인 최적 LCC 설계를 유도하기 위해서는 LCC 최적설계가 필요하다.
3. 최적 LCC 설계에서 파괴비용 산정에 사용한 초기건설비용 적용비율은 설계단계에서 영향이 적으므로 교량의 사회적, 경제적 중요도에 따른 파괴비용산정은 엄밀한 해석보다는 근사적인 방법으로 추정해도 합리적인 최적 LCC 설계를 할 수 있으리라 판단된다.
4. 최적 LCC 설계는 설계자가 원하는 공용간 총기대비용과 안전율을 일정하게 반영할 수 있는 설계법으로 향후 구조물 설계에서 추구해 나가야할 차세대 성능기준 최적설계법(Performance-Based Optimum Design)으로 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

6. 감사의 글

본 연구는 한양대학교 교내연구비 지원과제의 연구비지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

7. 참고문헌

1. Ang, A. H-S. and Tang, W.H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design," Vol. I & II, John Wiley, 1984.
2. Cho, H. N., Ang, A. H-S., "Reliability Assessment And Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges," 5th International Conference on Sturctural Safety and Reliability, pp2235-2238, 1989.
3. de Brito J. and Branco F. A., "Bridge Management Policy using cost analysis," Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 104, Nov., 431-439, 1995.
4. Ellingwood, B., Galambos, T. V., Macgregor, J. C., and Cornell, C.A., "Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58," National Bureau of Standard SP-577, Washington, D.C., 1980.
5. Frangopol, D. M., Lin, K. Y., "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Sturctures," J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 10, 1997.
6. Garret N. Vanderplaats, "ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis," Engineering Design Optimization, INC, Santa Barbara, California, 1985.
7. Hart, G. C., "Uncertainty Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering," Prentice-Hall, 1982.
8. Koskito, O. J., Ellingwood, B. R., "Reliability-Based Optimization of Plant Precast Concrete Structures," J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997.
9. Melchers, R. E., "Structural Reliability, Analysis and Prediction," Ellis Horwood Ltd., West Sussex, England, 1987.
10. Vanderplaats, Garret. N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design," McGraw-Hill, 1984.
11. 건설교통부, "도로교표준시방서," 1996.
12. 조효남, 이두화, 정지승, 민대홍, "신뢰성에 기초한 강상형 연속교의 단면 최적설계," 전산구조학회 가을 학술발표회 논문집, 1997.
13. 조효남, "강상형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb)개발 1차년도 보고서," 1998.
14. 한국도로공사, "97년도 실시설계기준," 1997.