

생애주기비용의 최소화에 의한 현수교의 목표안전수준 결정방법

방 명 석

충주대학교 안전공학과
(2009. 2. 16. 접수 / 2009. 4. 14. 채택)

Decision Method on Target Safety Level in Suspension Bridges by Minimization of Life Cycle Cost

Myung-Seok Bang

Department of Safety Engineering, Chungju National University
(Received February 16, 2009 / Accepted April 14, 2009)

Abstract : Life Cycle Cost(LCC) is adopted to decide the target of safety level in designing suspension bridges. The LCC are evaluated considering two types of uncertainty ; aleatory and epistemic. The nine alternative designs of suspension bridge are simulated to decide the safety level which can minimize the LCC. The LCC is calculated through the probability of failure and safety index including the uncertainty. This method results in the useful tool deciding the optimum safety level with minimal LCC as the main design factor.

Key Words : life cycle cost(LCC), uncertainty, suspension bridge, safety index, probability failure

1. 서론

구조물설계의 주요 목표는 “충분히 안전한가?” 하는 변하지 않는 명제와 관련이 있다. 이 명제는 설계자들에게 매우 부담스러운 문제이다. 왜냐하면 충분한 안전수준이란 어느 정도를 의미하는지 애매하며, 안전수준의 결정시에 고려요소도 구조적 성능(structural capacity) 외에 경제·사회적인 수많은 요소들도 포함되어야 하기 때문이다. 과거에는 파괴수준보다 일정비율 낮은 허용수준을 설정하고, 이 비율을 안전계수(safety factor, SF)라고 정의하여 적용하였고, 이 안전계수는 재료의 사용범위를 탄성 범위에서 극한강도까지 확장시켜 발전하였다. 그리고 최근에는 외부하중과 구조적 성능에 내포되어 있는 불확실성(uncertainty)을 고려한 신뢰성지수(reliability index, β)를 안전지수로 사용하고 있다^{1,9)}. 그러나 이러한 안전지수의 결정을 구조적 성능만으로 결정하는 방법 외에 경제·사회적인 다양한 요소들을 고려해야 할 필요성이 제기되고 있다^{2,4)}. 특히 한정된 투자재원을 고려할 때 경제적 요인이 안전수준 결정에 고려되어야 하고, 그 방법으로서 생애주기비용을 고려해야 한다는 연구결과가 발표되

었다^{2,4)}.

구조물의 설계·시공·공용 중에 투자되는 비용이 생애주기비용이고 구조물의 수명동안 투자되는 총 투자비용이다. 구조물의 생애주기 동안 충분한 안전을 확보하면서 총투자비용을 최소화시키는 것이 설계의 목표이며 최적의 투자 이다. 본 연구에서는 이러한 목표를 달성할 수 있는 방법으로서 생애주기비용의 최소화에 의한 최적의 안전수준을 결정할 수 있는 방법을 연구한다.

2. 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)

2.1. 최소 생애주기비용의 결정

일반적으로 기대생애주기비용의 식은 (1)과 같고, 최소생애주기비용의 결정은 이 식의 최소치를 구하는 문제와 같다.

$$E(LCC) = E(C_I) + E(C_M) + E(C_D) \quad (1)$$

여기에서,

$$E(LCC) = \text{기대생애주기비용}$$

$$E(C_I) = \text{구조물에 대한 기대초기투자비용}$$

$$(C_I = C_{ID} + C_{IC} + C_{IT})$$

$$C_{ID} = \text{구조물 설계비용}$$

$$C_{IC} = \text{구조물 건설비용}$$

$$C_{IT} = \text{공용 전 구조물 안전진단비용}$$

$$E(C_M) = \text{구조물의 사용수명 기간동안 기대유지관리비용(maintenance cost)}$$

$$E(C_F) = \text{구조물의 사용수명 기간동안 기대손상·파괴비용(damage-failure cost)}$$

식 (1)에서 손상·파괴비용은 여러 종류의 비용항목들로 구성되며, 이 비용항목들에는 각각 본질적으로 내재되어 있거나 혹은 인간의 불안전성에 의해서 발생하는 불확실성을 포함하고 있다.

$$C_F = \sum_{i=1}^k C_i \quad (2)$$

여기에서 손상파괴비용을 구성하는 비용항목들은 파괴확률함수(probability function of failure, P_f)로 표현할 수 있다. 식 (1), (2)에서 각 비용항목을 결정하는데 불확실성을 고려하는 것은 필수적인 사항이다.

최소생애주기비용을 결정할 때 유지관리비용을 이론적이나 논리적으로 결정하기는 불가능하다. 이 유지관리비용은 관리주체인 해당 유지관리기관의 과거에 투자된 비용실적을 분석하고 필요한 경우에는 통계적으로 회귀분석(regression analysis)하여 추정해야 한다. 본 연구대상으로 선정된 현수교의 생애주기비용을 산정하기 위하여 기존의 국내·외 논문 및 안전진단보고서와 과거의 유지관리·보수 비용실적을 분석하였다^{2,4,7-9)}. 그러나 국내의 경우에 분석가치가 있는 공용년수를 갖는 유일한 현수교는 1973년에 준공된 남해대교가 있으나, 유지관리비용에 대한 기록이 완전하게 보존되어 있지 않으므로 신뢰할 수 있는 연구자료로 활용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 검증된 국내외의 자료를 이용하여 유지관리비용을 산정하였다^{2-5,8)}.

최소생애주기비용의 개념은 Fig. 1처럼 표현할 수 있다. 즉, Fig. 1(a)의 초기투자비용(initial cost)과 Fig. 1(b)의 손상비용(damage cost)의 합이 Fig. 1(c)의 총생애주기비용(total life cycle cost)이다. 안전수준이나 혹은 신뢰성 ($1 - P_f$) 수준을 높게 설정하면 초기투자비용이 증가하나 공용기간 동안의 유지관리 및 손상·파괴비용은 감소하게 된다. 반면에 낮은 안전수준이나 신뢰성수준의 설정은 초기비용은 감소되나 유지관리나 손상비용의 증가를 가져온다. 안전수준이 증가함에 따라서 Fig. 1(a)의 초

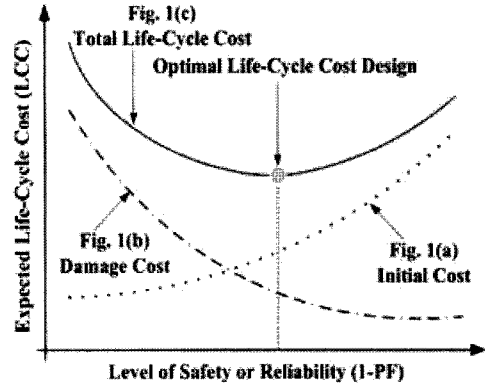


Fig. 1. Minimum Life-Cycle Cost design.

기비용함수의 변화율은 크게 증가하고 Fig. 1(b)의 손상함수의 변화율은 급속히 감소한다. 최적의 안전수준이란 Fig. 1(c)의 총생애주기비용함수가 최저값이 될 때의 안전수준 혹은 신뢰성지수이다.

2.2. 불확실성(uncertainty)

생애주기비용에 큰 영향을 미치는 통행하중(traffic load), 구조물의 성능(structural capacity), 각종 비용(cost) 등에는 피할 수 없는 불확실성이 내포되어 있다. 불확실성은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 즉, 본질적으로 해석요소에 내포된 불확실성(aleatory uncertainty)과 인간의 불안전성에 기인한 불확실성(epistemic uncertainty)이다. 전자는 설계인자 자체에 내재되어 있는 피할 수 없는 불확실성이고, 후자는 설계나 시공, 유지관리에서 인간의 불안전성에 의해서 발생하는 불확실성이다. 이 두 불확실성은 구조물의 파괴확률을 증가시키고 안전수준을 저하시킨다. 구조물의 파괴확률을 산정할 때에는 외부하중과 내적 구조성능의 불확실성을 반영하게 되며, 평균이나 분산을 산정할 때 이 불확실성이 확률변수(random variable)로 표현된다. 최적생애주기비용은 기대생애주기비용(expected LCC)의 최적화과정을 통하여 결정된다. 설계과정에서 하중과 구조성능은 보수적으로 산정되는 경향이 있다. 예를 들어서 안전계수와 위험성은 실제보다 큰 목표치를 고려하여 설계하는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 세 가지 경우 즉, 기대생애비용의 평균값, 평균값의 75%와 평균값의 90% 할중에 대하여 최적생애주기비용을 산정하였다. 그 이유는 위에 언급된 것처럼 설계안전계수가 실제 적절하게 산정된 위험수준보다 높게 설정되는 경향이 있으므로 이 안전계수의 75%와 90% 상향수준에 대하여

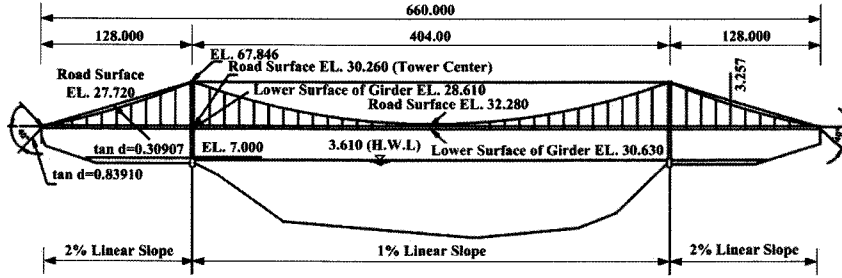


Fig. 2. General layout of suspension bridge.

도 생애주기비용과 안전계수를 해석하고 그 결과를 분석하였다.

3. 생애주기비용을 고려한 최적설계

생애주기비용의 최적설계를 위한 현수교의 신뢰성 해석은 Fig. 2와 같은 교량에 대한 과거의 연구결과를 기초로 하여 수행한다^{10,11)}. 최소생애주기비용에 근거한 최적설계안을 결정하기 위해서 Fig. 2와 같은 현수교의 실제 설계안을 표준안으로 설정하고, Table 1과 같이 9개의 대안(alternatives)을 가정하여 각 대안에 대한 생애주기비용을 구한다. 9개의 대안은 기존설계를 표준안(standard design)으로 설정하고, 이 표준안의 표준단면(standard section)에 분산도를 도입하여 설정한다. 각 대안에 대한 현수교의 신뢰성해석은 전 연구결과에서 개발된 방법에 따라서 수행된다^{10,11)}.

3.1. 초기투자비용 산정

초기투자비용은 설계비, 시공비, 준공 전 안전진단비로 구성된다. 9개의 설계안에 대한 현수교의 초기투자비용은 공사지와 설계도면을 근거로 표준단면적을 5%에서 20% 증가시키거나 5%에서 40% 감소시켜서 산정하였다. 현실적으로 노무비와 경비는 일정한 것으로 가정하고 재료비의 증가만을 고려하였다. 대안설계들의 산정된 초기투자비용은 Table 1과 같다.

Table 1. Initial costs of alternative designs(unit: million USD)

Design	Initial Cost, C_i
80% of Standard Design	164.56
90% of Standard Design	177.65
95% of Standard Design	182.36
Standard Design	187.00
105% of Standard Design	196.35
110% of Standard Design	205.70
120% of Standard Design	233.75
130% of Standard Design	256.19
140% of Standard Design	280.43

3.2. 기대 손상 · 파괴비용의 산정

기대 손상 · 파괴비용은 구조물의 손상 · 파괴에서 유발되는 경미하거나 혹은 치명적인 비용들로 구성되며, 특히 통행금지나 통행제한에 따른 경제적 손실비용이 주요 요소이다. 교량붕괴는 정상적인 조건에서는 거의 발생하지 않지만 손상 · 파괴비용의 산정 시 고려해야 한다. 기대손상 · 파괴비용은 식 (3)과 같이 여러 비용항목으로 구성된다.

$$C_F = C_{FR} + C_{FL} + C_{FH} + C_{FF} + C_{FEN} \quad (3)$$

여기에서, C_{FR} = 교체비용

C_{FL} = 감가상각비용

C_{FH} = 문화 · 역사적 비용

C_{FF} = 기능상실비용

C_{FEN} = 환경 · 사회적 비용

감가상각비는 교량 자체뿐만 아니라 유지관리장비나 제측시설의 사용기간 동안의 가치손실비용이고, 문화 · 역사적 비용은 구조물이 주변사회에 미치는 문화 · 역사적 가치를 유지시키기 위한 비용이다. 기능상실비용은 통행불능에 의한 교통통행대안을 제공하는데 필요한 비용이며, 환경 · 사회적 비용은 구조물이 환경 · 사회적으로 부정적 영향을 미칠 때 이를 해결하는 데 요구되는 비용이다.

모든 손상 · 파괴비용들은 현 시점의 화폐가치 기준이며, 미래손상비용은 다음과 같은 환산현재가치계수(Present Value Factor, PVF)를 곱하여 현 시점의 비용으로 환산해야 한다.

$$PVF = [1 - \exp(-\alpha L)] / (\alpha L) \quad (4)$$

여기에서, $\alpha = \ln(1 + q)$

q = 년할인금리(annual discount rate)

L = 교량의 기대수명

본 연구에서는 현수교의 기대수명은 50년, 년할 인금리는 4%로 가정한다. 따라서 현수교의 기대생애주기비용은 다음 식과 같다.

$$E(C_T) = \bar{C}_I + \bar{C}_M + PV\bar{R}(\bar{C}_{FR} + \bar{C}_{FL} + \bar{C}_{FH} + \bar{C}_{FF} + \bar{C}_{FEN}) \quad (5)$$

여기에서 각 비용항목들은 식 (3)의 항목과 동일하다.

3.3. 총생애주기비용의 구성

초기투자비용에 유지관리비용과 손상·파괴비용을 합산한 총 기대생애주기비용은 Table 2와 같다. 초기비용에 대한 각 비용항목의 비율은 구조물마다 다르다. 본 연구에서는 기존 연구결과를 참고하였으며^{2,4)}, 일부항목에서는 국내사례를 참고하여 조정하였다⁵⁾. 일반적으로 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)은 초기비용과 준공 후 유지관리비용으로 구성된다. 준공 후 유지관리비용은 교량기능이 유지되면서 발생하는 일상적인 유지관리비용과, 기능이 손상되거나 파괴되었을 때의 파괴비용으로 구분된다. 초기비용은 설계비·시공비·준공 전 안전진단비로 구성되며, 보통교량보다는 현수교가 설계비의 비율이 높다. 교량기능이 유지되는 상태에서의 유지관리는 정기점검비나 일상적 보수비를 의미하며 그 비율은 10%로 현수교의 특성상 구조물의 완성도가 매우 높음을 보여 준다. 생애주기비용 산정에서 가장 변수가 큰 것이 파괴비용으로, 붕괴 시 발생하는 모든 종류의 비용, 기능이 손상된 경우에 대책비용, 환경·사회적 비용으로 구성된다. 교량이 붕괴된 경우에는 복구비용과 인적·물적 보상비용, 간접적 피해비용이 발생하는데, 이 중에서 복구비용은 공용기간동안의 물가변동성을 고려하여 50% 정도 증가시킨다. 그러나 인적·물적 보상비용은 피해규모에 따라서 가변성이 크며 인명손실규모가 큰 경우에는 1000%가 넘는 경우도 있다²⁾. 본 연구의 경우에는 과거 교량붕괴사례⁵⁾를 참조하여 500%로 조정하였으나, 매우 특별한 사례로 향후 지속적인 연구가 필요한 항목으로 판단된다. 간접적 피해는 붕괴교량에 사용된 재료나 기술능력에 대한 불신으로 발생하는 제조업체와 건설회사 등의 피해비용이다. 교량기능이 손상되었을 때 발생하는 비용은 통행지연과 교통혼잡비용, 그리고 우회교통대책비용이다. 이 비용들은 교량의 가설위치와 손상 규모에 따라서 매우 다를 수 있다. 특히 교통대책

Table 2. Total expected LCC items

Cost Items	Classification of Cost Items	% of Initial Cost
Initial Cost (C_I)	Design Costs	7% of C_I
	Construction costs	90% of C_I
	Load Testing Costs	3% of C_I
Maintenance Cost (C_M)	Current Inspections Costs (every 1 year) Detailed Inspections Costs (every 5 year) Repair Costs	10% of C_I
Failure Cost (C_F)	Structural Failure Costs	-
	- Bridge Replacement Costs	150% of C_I
	- Loss of Lives and Equipment	500% of C_I
	- Cultural and Historical Costs	10% of C_I
	Function Disruption Costs	50% of C_I
	- Traffic Delayed Costs	-
	- Traffic Detour Costs	
	- Heavy Traffic Costs	
	Environmental and Social Costs	15% of C_I

이 불가능한 경우나 대책추진비용이 크게 요구되는 경우에는 가정된 50% 이상의 비용이 발생할 수 있다. 문화·역사적 비용은 지역사회의 이미지 실추나 관광수입 감소 등을 고려한 피해로 10%를 가정하고, 환경·사회적 비용은 환경피해비용으로 15%를 고려한다. 생애주기비용 항목들의 비율은 충분한 참고자료나 연구실적이 부족하여 그 비율을 가정하거나 기존의 연구결과를 인용하였다^{2,5)}.

3.4. 인간의 불완전성에 의한 불확실성(epistemic uncertainty)

각 대안에 대한 초기투자비용(C_I)과 유지관리비용(C_M)의 산정 시에 인간적 오류에 의한 불확실성을 고려한다. 일반적으로 초기투자비용이나 일상유지관리비용 그리고 파괴비용 중 경미한 보강비용은 투입실적자료가 다른 비용에 비하여 상대적으로 정확한 편이므로, 산정하는 과정에서의 인간적 오류만을 고려하여 $\pm 20\%$ 의 분산도($\Delta C_I = \Delta C_M = 0.20$)를 적용한다. 그러나 손상·파괴비용을 구성하는 각 비용항목은 산정하는 방법이 정립되지 않았거나, 사용된 산정기법과 산정 시 고려한 변수가 매우 주관적 특성을 가지므로 편차를 상대적으로 큰 $\pm 40\%$ 를 적용한다. 환경·사회적 요인은 더욱 가변적이므로 $\pm 80\%$ 를 고려하며 이들을 요약하면 Table 3과 같다.

Table 2와 Table 3에 가정된 값을 근거로 기대생애주기비용의 평균과 표준편차를 구하면 식 (6)과 같다.

Table 3. Epistemic uncertainties in damage cost items

Failure Cost Items	C.O.V. ΔC_i
C_{FR}	0.20
C_{FL}	0.40
C_{FH}	0.40
C_{FF}	0.40
C_{FEN}	0.80

$$E(C_T) = \bar{C}_I + \bar{C}_M + \bar{C}_F,$$

$$Var(C_T) = (0.2\bar{C}_I)^2 + (0.2\bar{C}_M)^2 + (0.28\bar{C}_F)^2 \quad (6)$$

3.5. 최소생애주기비용의 해석

위에 요약된 값을 사용하여 9개 대안의 생애주기비용을 구한 결과는 Fig. 3과 같다. 설계하중이나 부재치수와 같이 본질적으로 내재된 불확실성 (aleatory uncertainty)을 확률변수로 고려하면서 신뢰성지수(β)와 기대생애주기비용의 관계를 구하였다. 파괴확률과 신뢰성지수는 기존에 개발된 방법을 사용하여 산정하였다^{6,10}. Fig. 3은 Fig. 1에서처럼 안전지수가 증가함에 따라서 생애주기비용이 감소하다가 다시 증가함을 알 수 있고, 최소값이 존재하는 안전수준이 존재함을 알 수 있다. 이 경우에 Fig. 1(a)의 초기투자비용 함수는 안전지수가 증가함에 따라서 변화율이 더욱 커지고, Fig. 1(b)의 파괴비용함수는 안전지수가 증가함에 따라서 변화율이 급속히 줄어드는 점을 유의해야 한다. 즉, 파괴비용함수의 변화율이 둔화되고 초기투자함수의 변화율이 커지기 시작하는 변환점에서의 안전지수가 최적값임을 보여 준다.

인간적 불확실성을 고려할 때 기대생애주기비용의 평균값, 평균값의 75%, 평균값의 90%와 신뢰성지수의 관계는 Fig. 4와 같다. 최적값은 평균 신뢰성지수가 2.382일 때 결정되었다($E(\beta) = 2.382$).

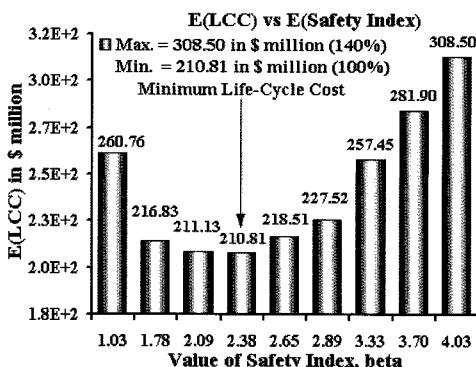


Fig. 3. E(LCC) versus $E(\beta)$ due to aleatory uncertainties.

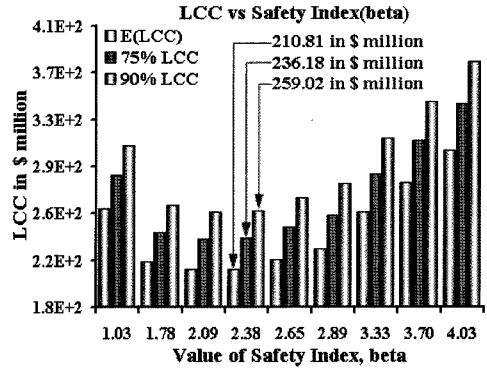


Fig. 4. Mean or % LCC versus epistemic uncertainties($\Delta C_i = \Delta C_M = 0.2$ and $\Delta C_F = 0.28$).

위의 본질적으로 내재된 불확실성을 고려하여 산정된 파괴확률(P_F)과 신뢰성지수(β)도 이 값들의 산정 시에 인간적 오류를 포함하기 때문에 각각 확률변수(random variable)가 된다. 따라서 파괴확률과 신뢰성지수를 산정할 때의 인간적 오류에 의한 불확실성을 고려하기 위해서 10,000개의 표본으로 Monte Carlo 모사운용(simulation)을 실시한다. 이 모사운용에 의한 파괴확률(P_F)과 신뢰성지수(β) 간의 관계는 Fig. 5, 6과 같다. Fig. 5, 6에서 기대생애주기비용의 평균값, 평균값의 75%, 평균값의 90%의 파괴확률과 신뢰성지수를 구하면 Table 4와 같다. 이 값들은 국내의 설계기준에서 제시되고 있는 값과 비슷한 수준이다⁹.

Table 4. Failure probabilities and safety indices

Percentile	P_F	β
Mean	8.558E-03	2.379
25% P_F 75% β	6.554E-03	2.957
10% P_F 90% β	4.634E-03	3.467

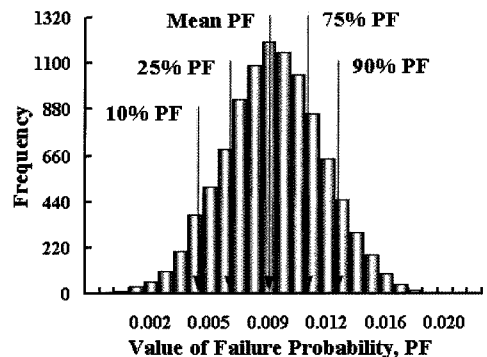


Fig. 5. Frequency diagram of failure probabilities due to epistemic uncertainties.

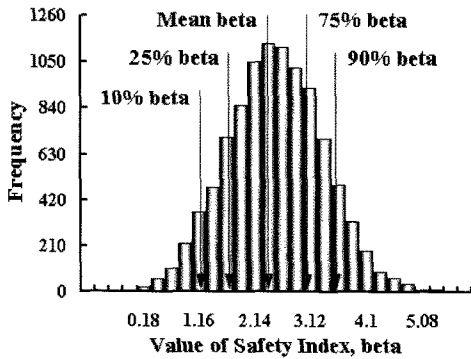


Fig. 6. Frequency diagram of safety indices due to epistemic uncertainties.

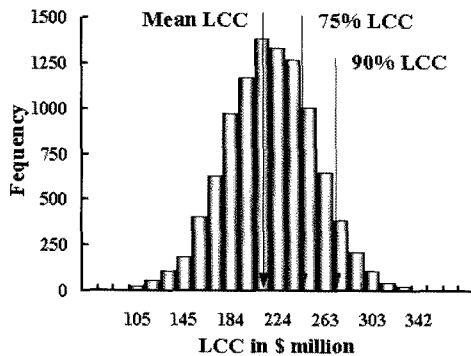


Fig. 7. Frequency histogram of LCC.

Monte Carlo 모사운용에 의한 기대생애주기비용의 발생빈도는 Fig. 7과 같으며 정규분포특성을 보인다. 파괴확률이나 신뢰성지수 산정 시에 인간적 오류를 고려하여 산정한 기대생애주기비용은 평균값에서 210.8, 평균값의 75%는 235.7, 평균값의 90%는 258.6이다. 이 값은 Table 2에서 제시된 비용항목들의 비율을 어떻게 가정하는가에 따라서 변할 수 있으므로 절대적 수치는 아니다. 향후 신뢰성 있는 연구결과를 바탕으로 다른 비율을 적용하여 해석하면 다른 값이 산정될 수 있다.

4. 결론

현수교의 건설 시에 교량의 공용기간 동안 총투자비용을 최소화하면서 목표 안전수준을 확보할 수 있는 해석방법을 연구하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Fig. 3과 Fig. 4는 현수교의 안전수준을 높임에 따라서 기대생애주기비용이 감소하다가 어느 안전수준을 지나면서 증가하는 경향을 보여주고 있

으며, 이 값을 최적의 안전지수로 판단할 수 있다. 따라서 구조적 성능을 나타내는 파괴확률 및 신뢰성지수와 경제적 변수인 생애주기비용의 상관관계를 해석하면 최적의 안전수준을 결정할 수 있다.

2) Table 4에서처럼 생애주기비용의 평균값을 고려한 신뢰성지수가 2.379, 평균값의 75% 상위 수준에서는 2.957임을 보여주며 이 값은 국내기준에서 제시된 값과 비슷하다. 그러나 본 해석결과는 Table 2와 3의 주요변수들의 가정된 값이 변함에 따라서 다른 결과가 나타날 수 있음을 유의해야 한다.

3) 총 생애주기비용을 구성하는 비용항목들 중에서 파괴손상비용을 구성하는 항목 각각에 대한 지속적인 연구와 파괴손상교량에 대한 신뢰성 있는 자료축적이 필요하다.

참고문헌

- 1) A. H-S. Ang, W. H. Tang, "Probability Concepts in Engineering", 2nd Edition, Sohn & Sons, Inc, 2006.
- 2) A. H-S. Ang, "Treatment of Uncertainties in Risk-Based Optimal Design of Marine Structures", OMAE 2004, June, Vancouver, Canada.
- 3) A. H-S. Ang, D. De Leon, "Modeling and Analysis of Uncertainties for Risk-Informed Decisions in Infrastructures Engineering", Journal of Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis, the Netherlands, 2005.
- 4) D. M. Frangopol, K. Y. Lin, "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures", Journal. of Structure Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 10, pp. 1390~1401, 1997.
- 5) Korea Central Prosecutor's Office, "A White Book on the Collapse of SungSoo Bridge", 1995.
- 6) T. J. Cho, M. S. Bang, "The Risk Assessment for the Failure of an Arch Bridge System Based on Response Space Method", J. of The Korean Society of Safety, Vol. 21, No. 6, pp. 74~80, 2006.
- 7) Korea's Ministry of Construction & Transportation, "A Study on Wind Capacity Improvement of Long Span Bridges", 2000.
- 8) Korea's Ministry of Construction & Transportation, Korea Institute of Construction Technology, "Safety Diagnosis Report of Namhae Bridge", 1993.
- 9) Korea's Ministry of Construction & Transportation, "Highway Bridge Specification, LRFD edition", 1999.

10) M. S. Bang, "The Safe Erection Method of Suspension Bridges by Construction Sequence Analysis", J. of The Korean Society of Safety, Vol. 22, No. 6, pp. 55 ~ 62, 2007.

11) J. S. Park, C. Y. Kim, M. S. Bang, "A Study on Non-linear Analysis of a Suspension Bridge", Journal of Korea Society of Steel Construction, Vol. 7, No. 3, pp. 149 ~ 159, 1995.