

## 성능저하모델에 기초한 사장교의 설계단계 생애주기비용 분석

구본성\* · 한상훈\*\* · 조중연\*\*\*

Koo, Bon Sung\*, Han, Sang Hoon\*\*, Cho, Choong Yuen\*\*\*

### Life Cycle Cost Analysis at Design Stage of Cable Stayed Bridges based on the Performance Degradation Models

#### ABSTRACT

Recently, the demand on the practical application of life-cycle cost effectiveness for design and rehabilitation of civil infrastructure is rapidly growing unprecedently in civil engineering practice. Accordingly, in the 21st century, it is almost obvious that life-cycle cost together with value engineering will become a new paradigm for all engineering decision problems in practice. However, in spite of impressive progress in the researches on the LCC, the most researches have only focused on the Deterministic or Probabilistic LCC analysis approach and general bridge at design stage. Thus, the goal of this study is to develop a practical and realistic methodology for the Life-Cycle Cost LCC-effective optimum decision-making based on reliability analysis of bridges at design stage. The proposed updated methodology is based on the concept of Life Cycle Performance(LCP) which is expressed as the sum of present value of expected direct/indirect maintenance costs with expected optimal maintenance scenario. The updated LCC methodology proposed in this study is applied to the optimum design problem of an actual highway bridge with Cable Stayed Bridges. In conclusion, based on the application of the proposed methods to an actual example bridge, it is demonstrated that a updated methodology for performance-based LCC analysis proposed in this thesis, shown applicably in practice as a efficient, practical, process LCC analysis method at design stage.

**Key words** : Life Cycle Cost at Design Stage, Performance Degradation Models, Cable Stayed Bridge

#### 초 록

최근, 엔지니어링의 실무에서 토목 시설물의 설계 및 유지관리 단계를 위한 효과적인 생애주기비용(Life Cycle Cost; LCC) 산정 방법의 실무적인 적용에 대한 요구가 높아지고 있다. 이와 같이, 21세기에 들어 엔지니어링의 최적 의사결정의 실무적 문제에 가치공학과 더불어 생애주기비용 분석은 새로운 패러다임으로 주목받고 있지만 이러한 연구 개발의 괄목할만한 진보에도 불구하고, 대부분의 설계단계 생애주기비용 분석은 확정적, 확률적 분석기법에 그치고 있고 적용 가능한 구조물도 일반 교량에 국한되어 있다. 따라서 본 논문은 설계단계 생애주기비용 분석에 대한 실용적이고 합리적인 신뢰성해석 기반 성능저하 모델을 고려하여 기존의 분석방법을 업데이트하는 분석 방법론을 개발하고 이를 특수교인 사장교에 적용하는데 목적이 있다. 이에 현재가치의 합으로 표현되는 직/간접 유지관리비용을 기존 방법과는 다르게 기대 성능저하모델에 바탕을 둔 최적 유지관리 시나리오를 통한 생애주기비용 분석 기법으로 제시하였다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 업데이트된 생애주기비용 분석의 방법론을 실제 고속도로 사장교 건설 프로젝트의 설계단계 의사결정 문제에 적용하여 합리적이고 체계적인 분석 방법 및 최적의사결정과정 을 제시하였다.

**검색어** : 설계단계 생애주기비용, 성능저하모델, 사장교

\* 정희원 · 전 한남대학교 교수 (kbs69966@yahoo.co.kr)

\*\* 정희원 · 충북대학교 건설공학과 교수 (shhan@chungbuk.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 유니콘스(주) 대표이사 (Corresponding Author · UNICONS · uniconscopy@hanmail.net)

Received October 12, 2012/ revised January 4, 2013/ accepted May 24, 2013

## 1. 서론

현재 국내에서 건설기술관리법 시행령 제38조의 13(2011. 9. 개정)에 의거 총 공사비 100억 원 이상인 공공발주공사에 대하여 LCC(Life Cycle Cost; 이하 LCC) 분석을 시행하도록 의무화하고 있다. 하지만 지금까지 개발된 교량 LCC분석은 일반적인 교량에만 분석 방법론이 국한되어 있어 현재 국내 특수교의 설계 및 시공, 유지관리가 증가하고 있는 추세를 반영하지 못하고 있는 것이 현실이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 특수교에 적용 가능하며, 확정적 분석의 한계를 극복하는 신뢰성 해석 기반 LCC분석 방법이 필요하다고 본다. 따라서 본 논문의 목적은 사장교의 설계단계 LCC 분석을 위한 실용적이고 합리적인 방법론을 개발하는데 있다. 또한, 대부분의 설계단계 LCC 분석에 관한 연구가 확정적, 확률적 분석수준에 그치고 있어 기존의 분석 방법을 업데이트하는 LCC 분석 방법론을 위해 유지관리단계 LCC 분석에서 연구되어 지고 있는 시간이력 신뢰성해석 기반 LCC 분석 기법을 설계단계 LCC 분석에 적합하도록 변환하여 적용하고자 한다. 사장교의 성능저하모델을 위한 성능인자는 보수보강교체를 각각 달리 구분하여 보수항목의 경우 상태평가를 통해 결정되어지는 상태지수를, 보강항목은 사장교의 신뢰성 해석을 통해 얻어지는 신뢰성 지수를, 교체항목의 경우 확률, 통계분석을 기반으로 하는 결정수명으로 고려하였다. 이와 더불어 보수보강교체의 상호영향에 대해 분석하여 각각의 유지관리 행위가 교량에 미치는 정량적 효과를 분석하고자 한다.

## 2. 설계단계 LCC분석 방법

### 2.1 LCC분석 수준

설계 및 유지관리단계에서 LCC분석 방법에 따른 분석 수준은 크게 3가지로 구분할 수 있다. 우선, 확정적 분석 방법인 DLCCA (Deterministic Life Cycle Cost Analysis)는 단순 확정값만을 이용하여 설계단계 최적의 교량형식 선정, 내구성재료 선택, 유지관리단계에서는 교량의 유지관리 전략, 현 단계의 유지관리 공법 선정 문제에 적용 될 수 있다. 하지만 DLCCA는 입력변수의 불확실성을 고려하지 않으므로 최적기대치만을 가지고 분석을 수행하기 때문에 그 결과도 최적기대치 값만을 얻게 되어 분석의 신뢰도와 무척 낮아 민감도 분석을 수행하여야 한다. 확률적 분석 방법인 PLCCA(Probabilistic Life Cycle Cost Analysis)는 입력 변수의 확률적 특성치(분포형태, 최적 기대치, 변동성)를 확률모델에 대한 시뮬레이션이 가능한 시스템에 입력치로 고려함으로써 LCC분석을 수행하는 방법이다. 이는 DLCCA방법 보다 합리적이며 과학적인 방법이지만, LCC분석모델과 관련된 많은 변수에 대한 확률모델

및 특성치에 대한 조사 및 처리가 필요하므로 많은 시간과 노력이 필요하다는 단점을 갖고 있다. 마지막으로 본 논문에서 적용하고자 하는 신뢰성기반 분석 방법은 구조물의 생애주기동안 구조적인 거동과 관련하여 초기비용뿐만 아니라 발생 가능한 모든 한계상태에 대한 기대복구확률과 그에 상응하는 비용이 고려되어야 한다. 이러한 기대복구확률 및 기대비용을 산정하기 위해서는 별도의 신뢰성해석 개념이 고려되어야 한다. 이러한 분석은 시간이력 구조 신뢰성 해석방법의 사용을 통하여만 합리적으로 해결할 수 있다. 실제 교량구조물의 성능은 구조물의 안전성 및 사용성에 영향을 줄 수 있는 작용하중과 사용환경, 보수보강이력에 따라 생애주기동안 변화가 발생하게 된다. 따라서 최근에는 생애주기동안 시간이력 구조신뢰성 해석방법의 필요성이 주요한 요소로서 주목받고 있다. 신뢰성기반 LCC분석은 주로 유지관리단계 LCC분석 연구에 국한되어 있으며, 설계단계에 대한 신뢰성기반 LCC분석 방법은 연구되어 오지 못했다. 이에 본 논문에서 신뢰성해석 기반 사장교의 설계단계 LCC분석 방법을 제시하고자 한다.

### 2.2 기존 LCC분석의 문제점

LCC분석에 있어 유지관리 비용은 여러 비용 항목 중 가장 중요한 분석 요소이다. 이는 앞선 많은 연구에서 증명되어진 바와 같이 교량의 설계단계의 최적의사결정을 위해선 초기비용 최적화가 아닌 유지관리비용과 해체폐기비용의 산정을 통한 총 LCC측면의 분석을 실시해야 하기 때문이다. 설계단계 LCC분석 방법 중 확정적 LCC와 확률적 LCC는 교량의 구성요소의 성능저감에 따른 성능저하모델이 고려되지 않았다. 이에 두 가지 LCC분석 방법에서는 보수, 보강, 교체의 단순 주거나 확률분포만을 이용하여 유지관리 비용을 산정하기 때문에 Fig. 1과 같이 비용항목의 중복발생 효과를 합리적으로 고려하지 못하였다. 이러한 원인은 보수, 보강, 교체의 정확한 효과나 상관관계를 고려하지 못함에 있다. 이렇듯 설계단계 의사결정을 수행하는데 있어 합리적인 절차 없이 추정된 유지관리 주거나 비용 등을 통하여 개략적인 방식으로 비용을 추정할 경우, 유지관리비용의 산정이 실제 발생비용과 다르게 산정됨으로써

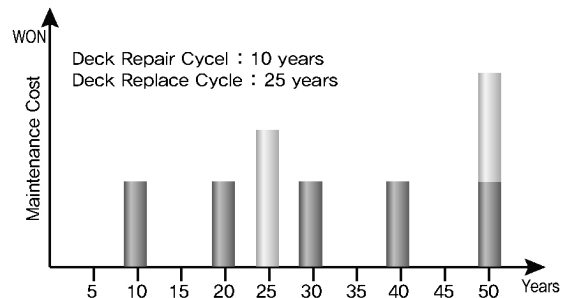


Fig. 1. Problem of Existing LCCA Method

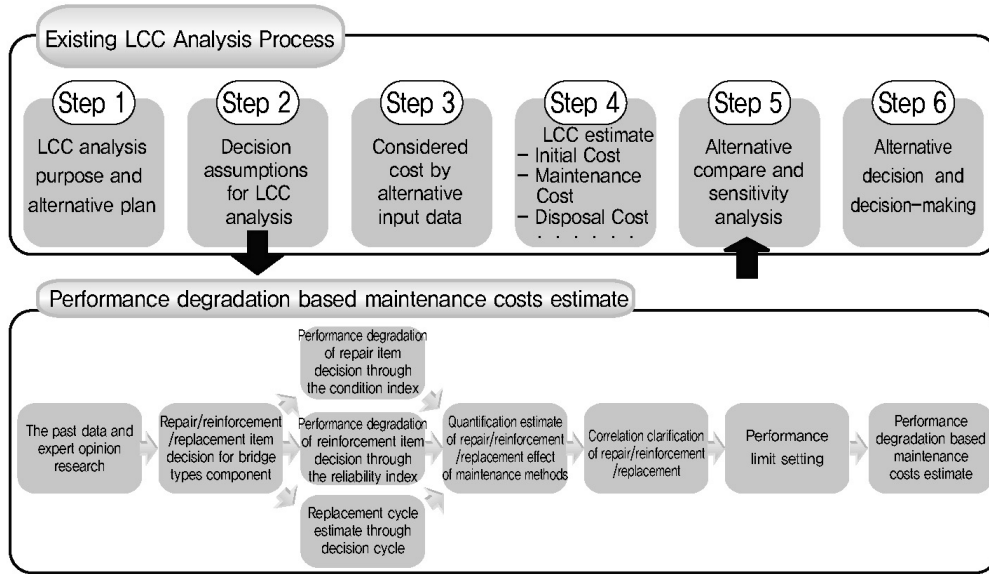


Fig. 2. Performance Degradation LCC Analysis

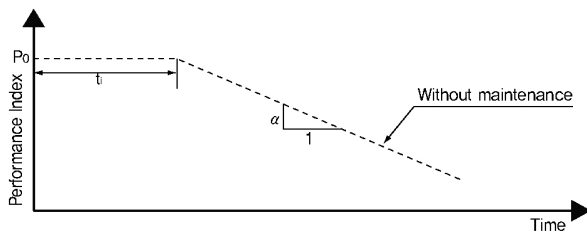


Fig. 3. Performance Index Profile without Maintenance

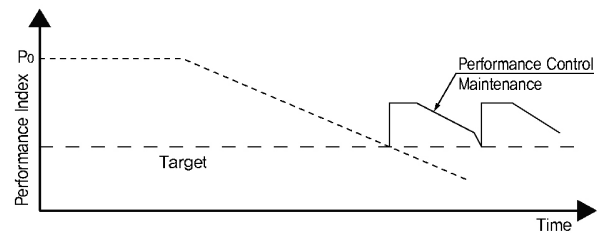


Fig. 4. Performance Control Index Profile

LCC분석 효과를 저해할 수 있다. 이를 위해서 설계단계에서도 보수, 보강, 교체의 정확한 효과나 상관관계를 파악하여 효과적인 유지관리비용 산정이 반드시 필요하며 이는 각 구성요소별 보수, 보강, 교체 특성에 맞는 성능저하 모델의 연구가 수반 되어야 한다.

### 2.3 설계단계 LCC분석을 위한 개선된 방법

#### 2.3.1 성능저하기반 LCC분석

현재 유지관리단계 LCC에서는 성능저하곡선과 최적 유지관리 시나리오에 의해 LCC분석을 실시하고 있으나, 분석의 복잡함과 시간적인 투자, 설계단계에 적합한 모델의 부재로 인해 설계단계를 위한 성능저하기반 LCC분석 기법은 전무하다. 이에 다음 Fig. 2에 기존 분석 방법과의 차이점과 설계단계 성능저하기반 생애주기비용 분석방법론을 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 기존 확정적, 확률적 LCC분석 절차는 성능곡선기반 성능한계치 설정을 통해 유지관리비용을 산정하지 않았다. 이러한 설계단계 성능저하기반 LCC분석을 위해선 일반적인 생애주기 성능모델이 필요하며 이러

한 모델은 유지관리단계에서 사용하는 모델을 설계단계에 적합하게 수정하여 사용한다. 유지관리단계 LCC분석과 설계단계 LCC분석은 서로 목적이 상이하기 때문에 성능인자, 성능감소율의 산정방법은 유지관리단계의 복잡한 모델과는 달리 설계단계에 적합한 모델을 사용하게 된다.

#### 2.3.2 성능지수이력곡선

일반적으로 생애주기 성능모델을 위한 성능지수이력곡선은 전 수명에 걸쳐 점차적으로(거의 선형적으로) 감소하며, 성능지수이력곡선은 선형으로 가정한다(Liu and Frangopol, 2005). 교량에 어떠한 유지관리 조치도 적용되지 않은 경우의 초기 성능이력곡선은 Fig. 3과 같이 가정할 수 있다. 초기 성능이력곡선은 초기성능지수, 어떠한 열화도 발생하지 않을 때까지 손상개시시간, 열화율의 세 가지 파라미터에 의해 특정 지워진다. 각 파라미터들의 불확실성이 고려된다면 이러한 확률변수들은 성능모델에 따라 해석적으로 또는 통계적으로 유도되거나 추정된다. 유지관리 조치의 적용은

주기적이거나 미리 정해진 목표성능에 도달했을 경우와 같이 비주기적일 수 있는데 이것을 시간 제어와 성능 제어로 구분하고 두 가지 유지관리 적용방법을 포함하여 유지관리 전략을 수립할 수 있다. 본 논문은 현재 우리나라의 유지관리 실정에 맞추어 한계상태에 구조물 상태가 도달 했을 경우, 유지보수를 실시하는 것으로 Fig. 4와 같이 성능기반 유지관리 시나리오를 설계단계 LCC분석에 적용하였다.

### 3. 설계단계 생애주기성능을 위한 성능저하모델

#### 3.1 설계단계 교량의 성능인자 및 성능평가 모델

##### 3.1.1 교량의 성능인자에 따른 성능평가 모델

교량의 생애주기 성능 모델을 예측하는데 있어 성능을 나타내는 여러 인자 중 어떤 항목을 선택할 지 여부는 LCC를 분석하는 시점과 관련되며, 보수, 보강, 교체 행위에 따라 구분되어야 한다. 이에 본 논문에서는 아래 Table 1과 같이 유지보수행위를 정의하고 각각 연관된 성능 인자를 토대로 성능저하모델 산정방법을 Fig. 5와 같이 나타내었다.

#### 3.2 보수항목의 성능저하모델

##### 3.2.1 상태평가 성능인자를 통한 성능저하모델 산정

본 논문에서 상태평가에 고려하는 교량 구성부재는 포장, 바닥판, 거더, 신축이음, 받침, 배수시설, 난간 연석 등 교량 대부분의 구조요소나 비구조요소이다. 하지만 현 상태평가 체계에서는 각 교량의 성능은 A, B 등의 문자로 표시되고, 구성요소는 소문자 a, b 등으로 표시된다. 상태평가 인자가 이산적으로 표현되기 때문에 공용년수

에 따른 성능의 대표값을 구하기 위해 각 공용년수마다 발생가능한 상태의 평균을 구하는 등의 방법은 원칙적으로 적용하기 힘들다. 성능인자를 이산적으로 표현하는 현 체계 하에서 평가되는 교량의 성능을 바탕으로 성능저하모델을 개발하는 것은 불확실성을 기증시킬 수 있으므로 연속적인 상태평가를 가능하도록 하는 새로운 평가체계의 적용이 필요한 실정이다. 이와 같은 제반 문제점을 해결하기 위해 한국시설안전기술공단(2003)에서는 교량 구조물의 안전점검 및 안전진단 시 책임기술자의 주관적인 견해를 최소화하고, 객관적인 입장에서 구조물의 상태평가를 수행할 수 있도록 결합지수(0~1)로 표현되는 새로운 평가기준을 제시한 바 있다. 종래의 평가기준은 A, B, C, D, E로 나뉘며 이산화 되어 있기 때문에 각 등급들 간에 상태등급변이에 대한 정량적인 판단이 힘들었던 반면에 결합지수는 0과 1사이의 연속적인 값으로 이루어져 있어 공용년수에 따른 상태등급의 전이를 정량적으로 판단할 수 있다. 그러나 이러한 결합지수는 그래프로 표현하기 힘들기 때문에 본 논문에서는 이를 변환한 성능지수를 이용하였다. 결합지수와 성능지수는 일대일 선형관계를 이루고 있기 때문에 서로변환이 가능하며, 또한 기존에 사용하고 있는 상태등급과도 쉽게 변환이 가능할 것으로 판단된다. 결합지수를 성능지수로 변환하는 식은 시설안전기술공단에서 사용하는 Eq. (1)을 사용하였고, 성능지수, 결합지수, 상태등급사이의 관계는 Table 2에 나타내었다.

$$PI = (1.0 - DI) \times 100 \tag{1}$$

여기서,  $PI$ 는 성능지수,  $DI$ 는 결합지수

Table 1. Concept of Maintenance at Design Stage

Category		Explanation	Performance index
Repair		In case of low effect of structure performance damage recovery ordinary state	Conditions index
Reinforcement	Rehabilitation	Restore to the level of design due to being damaged / destroyed by carrying capacity decrease, overload and disaster load	Reliability index
	Retrofit	Conditions improvement better than considered conditions in the design stage	
Replace		Replacement of accessory structures due to reach service life of component	Determined life

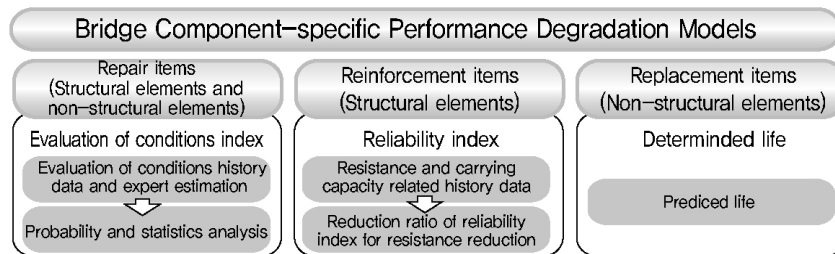


Fig. 5. Performance Degradation Models at Design Stage

Table 2. Performance Index, Defect Index, Condition Grade

Performance index	Defect index	Condition grade
87 < PI ≤ 100	0 ≤ DI < 0.13	A
74 < PI ≤ 87	0.13 ≤ DI < 0.26	B
51 < PI ≤ 74	0.26 ≤ DI < 0.49	C
21 < PI ≤ 51	0.49 ≤ DI < 0.79	D
PI ≤ 21	0.79 ≤ DI	E

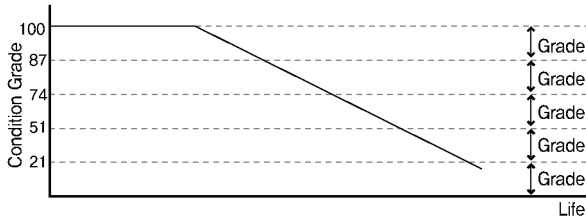


Fig. 6. Index of Condition Grade

Table 2 기준에 따라 시설물정보관리종합시스템(Facility Management System; 이하 FMS), 정밀안전진단, 교량카드 자료를 분석하여 성능저하모형을 산정할 수 있으며, 상태평가등급 기준에 대한 자세한 내용은 한국시설안전기술공단(2003)에서 제공하는 정보를 따랐다.

### 3.3 보강항목의 성능저하모형

#### 3.3.1 구조안전성 개념

보강항목의 성능인자인 신뢰성지수를 산정하기 위해서는 구조 안전성 개념을 바탕으로 신뢰성해석이 수행되어야 하며 한계상태 함수의 파괴확률 계산을 통해 신뢰성지수를 산정할 수 있다. 확률적인 개념에 의한 구조안전성의 척도인 구조물의 신뢰성은 파괴확률(Failure probability)과 보확률의 관계를 갖는다. 구조물의 작용외력과 저항이 무작위변량인 경우, 구조안전성은 역시 무작위 변량인 안전여유(Safety margin)로 표현되며, 안전 여유가 0 이하 일 때 안전성을 상실한 파손 또는 파괴상태가 된다.

$$P_f = P[Z = g(R, Q) \leq 0] = P(R \leq Q) = P(R - Q \leq 0) \quad (2)$$

여기서,  $g(\ )$ 을 한계상태함수라고 하는데 파괴확률은 한계상태의 초과확률과 동일하기 때문에 파괴확률을 일명 한계상태확률(Limit state probability)이라고 한다. 한계상태함수(Z)는 하중(Q)과 저항(R)의 관계로 표현되면 하중이 저항을 초과할 때의 값을 토대로 파괴확률(P)을 산정한다. 이러한 파괴확률은 변환을 통해 신뢰성지수의 값으로 변환된다.

#### 3.3.2 신뢰성지수를 통한 성능저하모형 산정기법

이상 앞서 언급된 구조안전성개념을 이용하여 신뢰성지수를 통한 성능저하모형을 산정하기 위해서는 다음 Fig. 7과 같이 시간변화에 따른 저항 변화율에 대한 예측이 수반되어야 한다. 이러한 저항 변화율을 한계상태함수에 적용하여 구조물 수명간 신뢰성지수의 변화를 예측할 수 있다. 이러한 시간에 따른 저항 감소 데이터는 과거이력데이터 및 전문가 판단을 통해 얻어지고, 이를 바탕으로 구조물 초기 저항에 대한 구조물 수명 간 저항 감소율은 다음 Fig. 7과 같은 방법을 따른다.

#### 3.3.3 사장교의 신뢰성해석 기법

파괴확률에 따른 신뢰성지수의 의미를 상대적으로 평가하기 위해서는 기준이 필요하므로 전 세계적으로 신뢰성 설계에서 대략적으로 인정되고 있는 교량구조물의 통상적인 안전기준은 미국 AASHTO에서 지원하여 수행된 NCHRP (National Cooperative Highway Research Program)의 Report 301(Load Capacity Evaluation of Existing Bridges, 1987)에서 제시된 바와 같이 파괴확률 기준을 0.0002(0.02%, 여유성이 없는 구조; 적은 수의 구성요소 파손으로도 구조물의 붕괴가 발생하는 구조) ~ 0.006(0.6%, 여유성이 있는 구조; 상당히 많은 구성요소의 파손에 의해서만 구조물의 붕괴가 발생하는 구조)로 보고 있으며, 또한 높은 값을 가질수록 안정적인 신뢰성지수(Reliability index)로 나타내면 여유성이 없는 구조는 3.5로, 여유성이 있는 구조는 2.5를 기준으로 적용하는 추세이다. 본 논문에서 제안하는 보강항목의 성능저하모형을 산정하기 위해서 신뢰성해석이 수반되어야 하며 설계단계에서 수행의 어려움이 없도록 기초적 시뮬레이션 기법 중 하나인 MCS(Monte Carlo Simulation) 기법을 사용하였다. 사장교 신뢰성해석을 위한 파괴위험단면은 케이블, 주탑, 보강형으

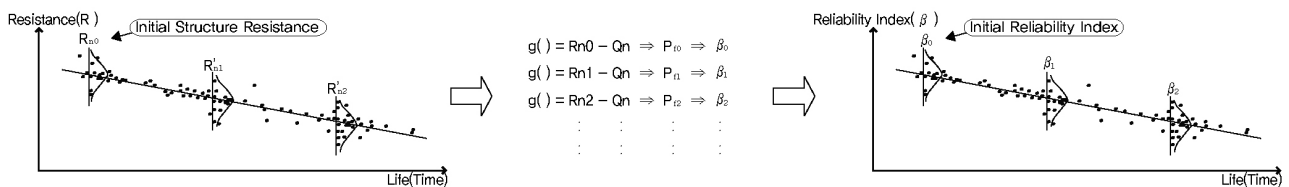


Fig. 7. Rehabilitation Items Performance Degradation Model

Table 3. Failure Event

Element	Main Failure Event
Cable	Tension Failure
Pylon	Compression + 2axis bending moment Failure
Concrete Deck	Compression + 2axis bending moment Failure
	Shear Failure
Steel-Concrete Joint	Shear Failure
Steel-Concrete Deck	Compression + 2axis bending moment Failure

로 나뉘 허용응력설계법 및 강도설계법에 의한 하중조합 중에서 최대 부재력이 발생하거나 안전여유가 작은 위치로 선정하였고, 보강형은 콘크리트와 강합성으로 구분하였다. 본 논문에서는 각각의 부재별 파괴사건을 Table 3과 같이 가정하였다. 케이블, 주탑, 보강형, 접합부, 강합성 보강형의 한계상태함수 및 파괴확률 뿐만 아니라, 신뢰성에 기초하여 각 붕괴시나리오의 발생확률을 평가하기 위해서는 선행적으로 각 확률 변수의 평균공칭비, 변동계수 (Coefficient of variation) 및 분포형태와 같은 불확실량의 정보가 필요하다. 이러한 불확실량의 결정은 공학적인 관점에서 붕괴 시나리오의 신뢰성을 평가하는데 없어서는 안 되는 구성요소이다. 정확한 신뢰성 해석을 위해서 확률분포 변수의 추정이 합리적으로 이루어져야 하며 그러기 위해서는 통상 실험이나 시뮬레이션에 의한 방법이 사용된다. 본 연구에서는 사장교 저항 및 하중효과에 대한 랜덤변수의 확률분포모수와 부재별 파괴사건에 대한 각각의 한계상태 함수는 기존 연구에서 제시된(Yoon, J. H. and Cho, H. N., 2007) 내용을 따랐다.

### 3.4 교체항목의 성능저하모델

#### 3.4.1 결정수명

교량의 구성요소의 대부분은 자연재해나 충돌, 테러 등의 갑자기 발생하는 하중을 제외하고 상시 재하하중에 대해 보수, 보강, 교체의 유지보수행위를 통해 공용년수 안에 성능을 다 발휘되도록 설계된다. 이러한 교량 구성요소 중 본 논문에서 교체 대상 항목으로 간주하는 교량 부속시설물은 이러한 특성을 더욱 잘 나타낸다. 교량의 구조요소가 아닌 비구조요소로서의 부속 시설물은 교면포장, 배수시설, 난간, 연석, 보도, 신축이음매, 교좌장치, 강제도장 등이 있다. 이러한 부속장치들은 유지보수 행위와 관련하여 본연의 내구수명을 가지고 있고, 그 내구수명은 교량의 수명에 비해 굉장히 적으며, 유지보수행위를 상시 수행한다고 하여도 결정되어진 수명에 미치는 영향이 크지는 않다. 결정수명은 부속시설물 시공 업체에 의해 많은 연구가 진행되어 왔고, 그러한 결정수명을 현 실무에서도 따르고 있다. 이에 본 논문에서도 관련 전문가 의견이나 수명데이터를 조사하여 통계적 분석을 수행하고 확률적 분포의 형태로 교체의

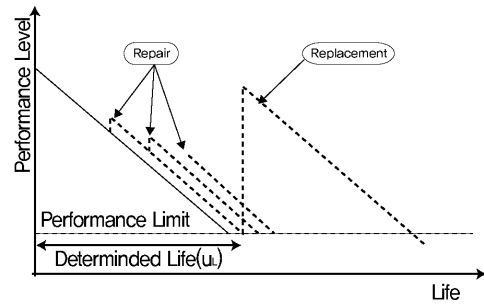


Fig. 8. Determination Life of Replace Items

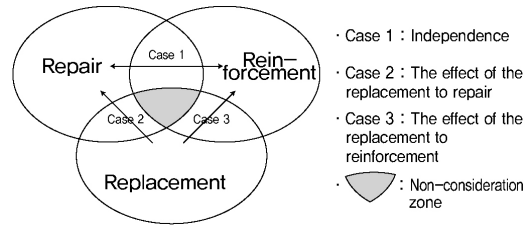


Fig. 9. Mutual Relation of Maintenance

적정 결정수명을 결정하는 기법을 제안한다.

### 3.5 유지보수의 상호관계 및 정량화

유지관리단계에서 교량에 손상이 발생하면 손상의 원인별 적절한 보수보강 공법을 선정하여 유지보수를 실시하게 된다. 이때 어떠한 공법을 적용하여 어느 정도의 효과가 나타나는지에 대한 분석이 필요하다. 하지만 설계단계에서는 미래 시점에 어떤 보수보강 공법을 선택한다거나 아니면 교체를 실시하거나 하는 문제는 미리 예측하기 쉽지 않다. 따라서 각 구성요소별 보수보강 공법의 효과는 해당 손상에 대해 존재하는 여러 공법들을 통합하여 단가 및 정량적 효과를 결정해야 한다. 본 논문에서 보수 및 보강의 정량적 효과는 유지관리행위 관련 전문가 의견이나 과거 이력 데이터를 통해 산출이 가능하며 교체에 대한 효과는 건설 초기상태로의 복귀를 의미하게 된다. 그러나 손상은 다양한 원인에 의해 발생하며, 발생한 다양한 손상은 서로 독립적이지 않지만 본 논문에서 제안하는 설계단계 성능저하기반 LCC분석 방법론에선 보수에 대한 성능인자로 상태평가를, 보강에 대한 성능인자로 신뢰성지수를 사용하기 때문에 이들을 각각 따로 고려한다. 하지만 교체는 그 성능인자가 어떠한 것이던 간에 원래 상태로의 복귀이기 때문에 교체가 보수보강에 미치는 효과는 설계단계에서도 단순하게 고려할 수 있다. 본 논문에서 보수, 보강, 교체의 영향을 다음 Fig. 9와 같이 가정하였다. 보수보강효과 정량화를 위한 성능향상 모델은 구조물의 성능저하모델과 마찬가지로 신뢰할 만한 정량화 모델이 고려되기 어려운 경우이므로, 경험적 통계 방법으로 모델을 적용한

다. 보수보강의 효과는 결과적으로 부재의 상태이력곡선에 변화를 일으키는 의미로 해석할 수 있으며, 성능저하모델과 같이 연속지수 형태인 상태지수의 성능 향상율로 표현될 수 있다. 보통 유지관리단계 LCC분석에선 보수보강 공법의 선정이 중요한 의사결정 문제이므로 적용된 보수보강 공법이 상태지수를 향상시키는 행위인지, 상태지수의 감소를 지연시키는 행위인지 구분되어야 한다. 하지만 설계단계 LCC분석에선 최적 교량형식 문제를 다루기 때문에 유지관리단계 LCC와 같은 상세 분석보다는 동일한 변상에 대해 보수보강 효과를 대안별로 동일하게 적용하는 것이 중요하다. 또한 일반적으로 설계단계에서는 보수보강 행위 결과 상태지수의 향상을 가져올 것이라 예상된다. 이러한 보수보강 공법별 상승효과는 각 공법별

로 따로 고려하지 않고 변상에 대해 적용되며, 유지관리단계 LCC와 같이 부재의 재료적 특성이 변경 교체되는 경우는 고려하지 않는다.

#### 4. 적용 사례의 분석 및 고찰

##### 4.1 기존 LCC분석 방법

본 논문에서 제안된 성능저하 기반 설계단계 LCC분석 방법의 적용성 및 합리성을 판단하기 위해 고속 도로상 교량 건설 사업을 예로 기존 LCC분석 방법과 비교 분석을 실시하였다. 각 대안은 고속 도로상에 위치하는 교량으로 차선수는 왕복 4차선, 총 길이는 990m, 경간구성 및 일반 현황은 아래 Table 4와 같다. 본 적용

Table 4. General Situation

Category	Form and span construction	Cover	Support	Expansion joint
Alternative 1	High-strength PSC beam bridge(3@40=120m) + main span 200m 3main top cable-stayed bridge(100+200+200+100=600m) + high-strength PSC beam bridge(3@50=150m+3@40=120m)	Main bridge (LMC) Connection bridge (SBS PMA)	Main bridge (elasticity) Connection bridge(port)	Finger joint
Alternative 2	PSC box girder bridge(3@50=150m+60m) + main span 300m 2main top cable-stayed bridge(135+300+135=570m) + PSC box girder bridge(60m+3@50=150m)			
Alternative 3	Steel girder (50m+2@55=110m+75m) + main span 170m 5main top cable-stayed bridge(75m+4@170=680+75m)			

Table 5. LCC Input Data

Category		Measure ratio	Cycle	Cost (1,000 won)	Category		Measure ratio	Cycle	Cost (1,000 won)
Main span bridge surface covering	Repair	33.4	6	3.827	Connection bridge support	Repair	18.3	8	219.560
	Re-covering	100.0	17	26.670		Replace	100.0	22	154,368.20
Connection bridge surface covering	Repair	33.4	5	3.783	Main span bridge expansion joint	Repair	20.2	4	398.290
	Re-covering	100.0	15	27.584		Replace	100.0	9	3,904.217
Main span bridge floor deck	Repair	21.0	14	150.220	Connection bridge expansion joint	Repair	20.2	4	398.290
	Reinforcement	22.3	20	249.366		Replace	100.0	9	5,529.120
Concrete connection bridge floor deck	Repair	21.0	14	150.220	Pylon	Repair	24.4	8	174.870
	Reinforcement	22.3	20	249.366		Reinforcement	20.6	20	174.870
Steel connection bridge floor deck	Repair	21.0	13	89.360	Cable	Repair	1.0	10	Construction Cost
	Reinforcement	22.3	21	337.460		Reinforcement	8.0	15	Construction Cost
Main span bridge mold	Repair	18.4	8	124.248		Replace	100.0	75	Construction Cost
	Reinforcement	21.6	12	346.000	Cable Demper	Replace	100.0	10	4,000.000
Concrete connection bridge mold	Repair	18.4	8	124.248	Substructure	Repair	24.4	8	174.870
	Reinforcement	21.6	12	346.000		Reinforcement	20.6	20	174.870
Steel connection bridge mold	Repair	19.8	7	49.390	Drainage system	Replace	50.0	7	146.200
	Re-Painting	19.1	15	151.889	Eail, Curb	Replace	45.0	10	324.300
	Reinforcement	100.0	12	321.456	Connection bridge deck waterproof	Repair	25.0	12	70.260
Main span bridge support	Repair	18.3	8	219.560					
	Replace	100.0	22	14,990.072					

사례는 신뢰성해석 기반 성능저하모델을 토대로 분석된 LCC와 기존 LCC분석의 유지관리비용 차이를 검토하는 것으로 비용분류 체계 및 비용정식화는 기존 LCC분석 기법을 적용하였다. LCC분석을 위한 분석 기간은 100년, 할인율은 3.5%, 사용자비용 산출을 위한 교통조건으로 정상속도는 100km, 지체속도는 20km, 일일교통량은 25,000대를 기준으로 가정하였다. 본 논문의 분석은 상부, 하부구조를 대상으로 하였으며 초기건설비용은 설계자가 제시한 비용, 유지보수비용 산출을 위한 주기, 단가, 조차율은 한국도로공사(2003) 연구를 바탕으로 LCC분석을 실시하였다. 분석을 위한 각각의 비용 자료는 물가상승률을 고려하여 동일시점으로 변환하여 사용하였다. 다음 각 교량형식별 LCC를 산정하기 위한 입력데이터를 Table 5에 나타내었다.

## 4.2 성능저하에 기초한 LCC분석 방법

### 4.2.1 분석 절차

앞서 분석된 기존 설계단계 LCC분석에 반하여 이번에는 본 논문에서 제안하는 성능저하에 기초한 설계단계 LCC분석 기법을 이용하여 동일한 조건에 대한 LCC분석을 실시하였다. 기존 LCC와 본 논문의 LCC분석 방법의 차이는 보수, 보강 항목의 성능저하모델을 통해 합리적인 유지관리비용의 산출에 있다. 비교 분석의 효율성을 극대화하기 위해 기존 설계단계 LCC 기법으로 분석된 총 LCC 중 유지보수비용과 기대복구비용을 제외한 나머지 비용은 LCC분석 기법에 동일하게 적용하였다. 본 논문에서 제안하는 생애 위험도 분석과 생애주기성능저하 모델을 산정하기 위해서는 다음과 같은 분석 과정을 거친다.

1. FMS데이터와 정밀안전진단 등의 과거이력데이터를 통해 신뢰성지수 감소율을 위한 저항 자료와 상태지수 감소율을 위한

- 상태평가 이력자료를 산출
2. 전문가 설문조사 및 판단을 토대로 부족한 정보를 보충
  3. 산출된 데이터를 통해 보수, 보강의 성능저하에 대한 적합식을 산정
    - 보수: 상태평가 이력자료로부터 상태지수 변화율을 산정
    - 보강: 저항 자료로부터 저항 변화율을 산정하고, 한계상태방정식을 통해 신뢰성해석(신뢰성지수 변화율 산정)
  4. 교체주기를 위한 결정수명을 관련 자료로부터 결정
  5. 현재 실무에서 사용 중인 교량의 보수보강 공법을 분석하고 전문가 판단 및 과거 이력자료를 통해 정량적 효과를 가정
  6. 대안별 유지보수비용 산출 후 기존 분석 방법과 본 논문에서 제안하는 성능저하기반 LCC분석 방법 비교

### 4.2.2 성능저하 모델

성능저하모델 기반 유지보수비용을 산정하기 위해서는 우선적으로 성능저하모델 대상 구성요소를 정의해야한다. 각각의 구성요소는 앞서 기존 LCC분석 방법에서 고려하였던 보수, 보강 항목에 대하여 성능저하모델을 결정하였다. 또한 교체 항목은 결정수명에 대한 교체주기를 결정하였다. 보수에 대한 성능저하모델, 보강에 대한 저항 감소율, 보수보강의 정량적 효과, 교체에 대한 결정수명은 FMS데이터와 정밀안전진단보고서, 전문가 설문조사 및 판단에 의해 결정되었다. 1, 2종 시설물에 대하여 1987년 교량의 성능(상태) 이력의 변화를 알 수 있는 자료는 현 시점에서 준공 후 10년이 경과한 1, 2종 시설물에 대해 매 5년마다 수행되는 정밀안전진단보고서와 FMS 뿐이나, 정밀안전진단 보고서는 자료의 분실 등 관리상의 문제로 기존에 수행된 모든 정밀안전진단 보고서를 수집할 수 없으며 각 관리주체가 기록하고 있는 교량카드에는 교량의

Table 6. Data of Past Records

Form	Term	Component	Item	Maintenance	Damage Factor	Alterations	Grade	Treatment measure
PSC box	6	Substructure	Abutment	Repair	Deterioration	Joint damage	C	Mortar injection
PSC box	10	Substructure	Abutment	Repair	Run-off inflow	Efflorescence	C	Surface repair
PSC box	22	Substructure	Abutment	Repair	During use damage	Stone wall damage	C	Section repair
Steel	5	Accessory structures	Support	Replacement	Vibration(live load)	Crack	C	Mortar replacement
Steel	10	Substructure	Abutment	Repair	Temper. and dry shrinkage	Crack	C	Injection repair
Steel	10	Superstructure	Girder	Repair	Environmental factor	Painting damage	C	Steel painting
Steel	10	Superstructure	Girder	Replacement	Vibration	Rivet loosening	C	Bolt replacement
Steel	10	Accessory structures	Support	Repair	Degradation of paint film	Painting detachment	C	Re-painting
PSC box	12	Accessory structures	Support	Replacement	Vibration(live load)	Crack	C	Replacement
PSC beam	15	Substructure	Abutment	Repair	Deterioration	Exfoliation	C	Section repair
PSC beam	15	Substructure	Pier	Repair	Run-offin flow, freezing and thawing	Reticulate crack	C	Surface repair
PSC beam	18	Substructure	Pier	Repair	Dry shrinkage	Crack	C	Injection repair



상태가 기록된 것이 아니라 교량 보수현황만 기록되어 있으므로 이들의 기록을 종합하여 교량의 상태이력을 검토하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 본 논문에서 대상으로 하는 사장교는 정밀안전진단 결과나 FMS자료가 매우 부족한 현실 이므로 사장교 성능저하모델 추정을 위해 타 형식 교량의 거대, 하부구조, 부속시설 등 유사한 구조 항목을 인용하기 위해 데이터 조사를 실시하였다. 정밀안전진단 보고서와 시설안전기술공단 FMS시스템으로부터 교량의 유지관리 이력데이터를 수집하여 이를 통해 교량의 전체 상태등급의 변화 추이를 조사하였다. 이렇게 정리된 데이터는 전문가 설문조사 결과와 함께 성능저하모델 추세를 얻기 위해 사상되는 데이터로 사용된다. 과거 이력 데이터 정리의 예시는 다음 Table 6에 나타내었다.

성능저하모델 개발을 위해서는 국내의 사장교 데이터베이스 구축 기간이 짧고, 수집된 데이터의 정도가 낮아 생애주기비용 분석을 위해 필요한 자료를 합리적으로 획득하는데 어려움이 있다. 따라서 국내 유사 LCC연구에서는 일정한 값을 가정하거나 설문조사를 통해 데이터를 획득하고 있다(Korea Infrastructure Safety Corporation, 2003). 전문가 설문조사란 사전에 설문지를 준비하고 그 설문지에 대한 회답방식을 통해서 회답자의 의견을 알고자 하는 데이터 수집방법을 말한다. 선행방정식을 기본가정으로 사용하여 보수항목의 성능저하모델, 보강항목의 저항 변화율, 교체항목의 결정수명을 결정하기 위하여 아래와 같이 설문조사를 실시하였고 이를 바탕으로 각각의 성능저하모델을 결정하였다. 설문조사 대상은 사장교 관련 설계, 시공, 유지보수, 점검, 관리 업무를 담당하는 기술자로 하였으며, 설문조사 결과를 관련 업무 경력 별로 구분하여 데이터의 신뢰도의 가중치를 결정하였다.

[사장교의 케이블 유지관리를 위한 질문]

※ 사장교 케이블에 발생하는 변상에는 어떤 것이 있습니까.

자주 발생하는 순서대로 적어 주시기 바랍니다.

- ( ) 댐퍼외부 변형 및 고무판의 이탈
- ( ) 케이블 연결부 균열
- ( ) 강재 및 용접부 균열, 파단 및 파손, 부식
- ( ) Sealing 탈락
- ( ) 볼트의 이완 및 파단, 파손
- ( ) 도금의 균열, 부식, 왁스 누출
- ( ) 기타

1. 아래 열화현상 중 구조물의 성능에 크게 영향을 미치지 않는 보수 수준의 변상을 체크해 주십시오.

- ( ) 댐퍼외부 변형 및 고무판의 이탈
- ( ) 케이블 연결부 균열
- ( ) 강재 및 용접부 균열, 파단 및 파손, 부식
- ( ) Sealing 탈락
- ( ) 볼트의 이완 및 파단, 파손

- ( ) 도금의 균열, 부식, 왁스 누출
- ( ) 기타

2. 1번 질문의 사장교 케이블의 보수의 변상요인 중 열화 정도가 어느 수준 일 때 유지보수를 실시하는가?

- ① 매우 심하다 (보수 조치율 30~50%)
- ② 심하다 (보수 조치율 20~30%)
- ③ 보통이다 (보수 조치율 10~20%)
- ④ 약간 발생했다 (보수 조치율 10% 미만)
- ⑤ 발생하지 않았다

3. 사장교 케이블에서 보수가 필요한 발생 주기는?

년수 | \_\_\_\_\_ 기타  
 0 10 20 30 40 50 ( ) 년

4. 사장교 케이블에서 보수에 소요되는 비용의 규모는 어느 정도입니까?

( )  
 [초기공사비 효율(%), 단위비용(원/m, 원/m<sup>2</sup>, 원/EA 등), 댐퍼보수 개략비용 ( )원 등]

<이하 생략>

이결과 보수항목의 상태 변화에 따른 시기의 사상 자료(상태, 시기)와 보강항목의 저항 감소에 따른 시기의 사상 자료(초기신뢰성 해석 × 저항감소율, 시기)는 과거 이력 데이터 및 전문가 판단자료를 바탕으로 각 값을 산정할 수 있고, 이를 통해 추세를 결정하고 이를 통해 선행방정식을 세울 수 있다.

먼저, 보수항목의 유지관리 주기를 위한 상태지수의 성능저하모델은 Fig. 10에 보수에 대한 선행방정식의 예를 나타내었으며, 구성요소별 각각의 결과는 Table 7에 나타내었다. 여기서,  $x$  값은 공용년수를 나타내며  $y$  값은 상태지수를 나타낸다.

다음으로 보강항목의 구성요소별 신뢰성지수에 대한 성능저하모델을 결정하기 위해 보강 항목의 구조요소에 대한 한계상태방정

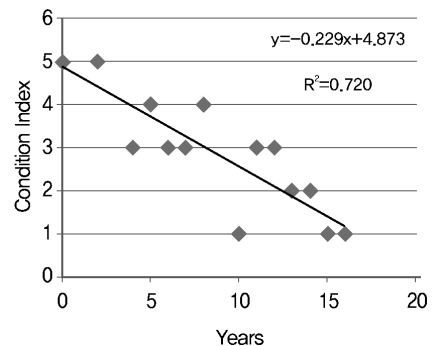


Fig. 10. Condition Index Performance Degradation Models

Table 7. Condition Index Performance Degradation Models

Component	Linear Equation	R <sup>2</sup>	Performance	
			Improvement Rate	Improvement Index
Main span bridge-decks surfacing	y = -0.229x + 4.873	0.720	62.21%	3.11
Connection bridge--decks surfacing	y = -0.215x + 4.514	0.649	57.02%	2.85
Main span bridge floor plate	y = -0.150x + 4.923	0.811	61.86%	3.09
Connection bridge floor plate	y = -0.153x + 4.991	0.819	61.45%	3.07
PSC box girder	y = -0.190x + 5.004	0.783	57.18%	2.86
Steel box girder	y = -0.194x + 4.948	0.859	59.48%	2.97
PSC beam	y = -0.175x + 4.800	0.764	56.57%	2.83
Main span bridge support	y = -0.247x + 4.963	0.878	60.02%	3.00
Connection bridge support	y = -0.263x + 5.210	0.848	58.92%	2.95
Expansion joint	y = -0.340x + 4.659	0.780	61.22%	3.06
Main top	y = -0.161x + 4.974	0.807	58.48%	2.92
Cable	y = -0.203x + 4.991	0.781	61.34%	3.07
Substructure	y = -0.188x + 4.835	0.828	59.70%	2.99
Connection bridge deck waterproofing	y = -0.177x + 4.636	0.632	60.38%	3.02

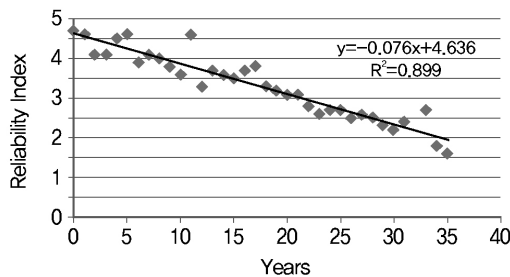


Fig. 11. Reliability Index Performance Degradation Models

식을 고려해야 한다.

본 논문의 적용 예에서의 사장교의 주탑, 보강형, 케이블의 신뢰성해석을 위한 한계상태방정식과 확률변수는 앞서 3.3절에서 설명하였으며, 한계상태방정식을 바탕으로 각 대안별 신뢰성해석을 실시하여 초기 신뢰성지수를 결정하였다. 초기 신뢰성지수는 구조물의 초기 성능치를 결정하며 과거이력데이터와 전문가 판단을 토대로 시간에 따른 저항 감소율을 분석하여 Fig 11과 같이 신뢰성지수의 성능저하 모델을 나타내었다. 적정 성능한계치를 위한 유지보수 시점은 보수항목의 성능저하모델의 경우 D등급이었으나, 보강항목은 신뢰성 지수가 2.5까지 저하된 후 유지보수를 하는 것으로 가정하였다. 사장교는 일반 교량 및 단순 구조물에 비해 여유성을 가지는 구조이므로 여유성이 있는 구조물의 신뢰성지수 2.5를 적용한 것이다. 각각의 결과는 Table 8에 나타내었으며,  $x$  값은 공용년수를  $y$  값은 신뢰성지수를 나타낸다.

마지막으로 현재 설계 및 시공되고 있는 교량 부속시설의 수명

Table 8. Reliability Index Performance Degradation Models

Component	Linear equation	R <sup>2</sup>	Performance	
			Improvement Rate	Improvement Index
Main span floor slab	y = -0.076x + 4.636	0.899	44.33%	2.216
Connection bridge floor slab	y = -0.068x + 4.344	0.933	39.58%	1.979
PSC Box girder	y = -0.106x + 5.712	0.965	69.85%	3.493
PSC beam	y = -0.107x + 5.111	0.972	55.33%	2.766
Steel box girder	y = -0.111x + 5.450	0.952	60.93%	3.047
Pylon	y = -0.127x + 6.086	0.964	53.89%	2.694
Cable	y = -0.060x + 3.425	0.844	57.13%	2.857
Substructure	y = -0.054x + 3.704	0.812	54.98%	2.749

관련 자료와 전문가 판단을 기초로 교체 주기에 대한 결정수명을 Table 9에 나타내었다. 수명 자료와 전문가 의견 설문자료 결과 값을 자료에 사상하여 대수정규분포로 가정하여 분포형의 모수를 추정하였고, 평균값을 결정수명으로 분석에 사용하였습니다. 유지보수 시 교체의 효과는 원상태로의 복귀를 의미하므로 100%의 성능 향상치로 가정하였다.

### 4.3 분석 결과의 비교 고찰

기존 LCC분석 결과와 성능저하기반 LCC분석 기법을 비교하여 보면, 기존 LCC분석에 비해 본 논문의 LCC분석 방법에선 전체적

Table 9. Determination Life of Replace Items

Replace Item	Average	Variance	Remarks
Main span bridge-decks surfacing	23years	0.10	Performance improvement 100% / Lognormal distribution
Connection bridge-decks surfacing	23years	0.14	
Main span bridge support	30years	0.11	
Connection bridge support	30years	0.10	
Expansion joint	18years	0.15	
Cable damper	18years	0.17	
Drainages	12years	0.10	
Rail, Curb	18years	0.10	
Connection bridge mold	22years	0.13	
Cable	50years	0.16	

으로 유지보수비용이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존 LCC분석 방법에 비해 성능저하 모델로 산정된 주기 값들이 기존 확정값보다 크기 때문이다. 이러한 뜻은 실제 유지보수이력자료나 구조물의 신뢰성해석 결과 얻어진 성능저하모델의 유지보수 시점이 기존 LCC분석의 유지보수 시점보다 더 후에 발생되기 때문이다. 특히 이러한 주기 차이는 구조물의 보강 주기에서 두드러지게 차이가 나는데 기존 LCC분석 주기가 구조물의 강도 특성을 잘 반영하지 못함에 있다고 판단된다.

유지보수의 성능저하기반 비용발생의 검토 결과 기존 LCC분석 결과 대안 1이 대안 2보다 LCC차원에서 약 11.8억원 감소하였으나, 개선된 LCC분석 방법에서는 반대로 대안 1이 대안 2보다 9.5억원 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 기존 LCC분석의 비용중복발생 문제 해결과 구조물 특성에 대한 반영의 결과로 판단되어 진다.

### 5. 결론

본 논문에서는 최근 LCC 관련 연구를 바탕으로 설계단계 LCC 분석에 적합한 보다 정확하고 합리적인 성능저하 기반 설계단계 LCC분석 기법의 개선된 방법론을 제안하였다. 제안된 설계단계 LCC분석 방법론에서는 기존의 확정적이거나 확률적인 LCC분석의 한계를 극복하고, 합리적이고 실제적인 유지보수비용 산정이

가능하며, 과거 이력 데이터 및 전문가 판단 자료가 가용한 범위 내에서 현실적 적용이 가능하도록 보다 발전된 접근방법을 제시하였다. 또한 일반 교량에만 국한되어 있는 기존 LCC분석 자료를 업데이트 하여 특수교량인 사장교에 적용 가능한 성능저하기반 LCC분석 기법을 통해 현재 실무에서 분석 방법이 상이하게 적용되고 있는 사장교에 대한 LCC분석 방법을 통합하고 실무에서 손쉽게 적용 가능하도록 제안하였다. 마지막으로 본 논문의 적용성을 높이기 위해 데이터베이스 관리시스템이 현재 BMS 시스템보다 한층 향상된 방향으로 개발되어야 할 것으로 판단된다.

### References

Cho, H. N., Kim, J.-H., Choi, Y.-M. and Lee, K. M. (2003). "Practical application of life-cycle cost effective design and rehabilitation of civil infrastructures." *Proceedings of JSSC03*.

Hawk, H. (2002). *Bridge Life Cycle Cost Analysis - Final Report, NCHRP Project 12-43*, National cooperative highway research program, Transportation Research Board, National Research Council.

Kong, J. S. and Frangopol, D. M. (2003). "Life-cycle reliability-based maintenance cost optimization of deteriorating structures with emphasis on bridges." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 6, 818-828.

Korea Expressway Corporation (2003). *Research of life cycle cost analysis for the highway bridge*, Korea Expressway Corporation (in Korean).

Korea Infrastructure Safety Corporation (2003). *Safety inspection and precision safety diagnosis detailed guideline*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).

Liu, M. and Frangopol, D. M. (2005). "Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 5, pp. 833-842.

Park, K. H., Lee, S. Y., Yoon, J. H., Cho, H. N. and Kong, J. S. (2008). "Optimum maintenance scenario generation for existing steel-girder bridges based on lifetime performance and cost." *Smart Structures and Systems*, Vol. 4, No. 5, pp. 641-653

Yoon, J. H. and Cho, H. N. (2007). "Reliability-based assessment of structural safety of steel-concrete hybrid cable-stayed bridge erected by the FCM and FSM during construction." *Journal of Korean Society of Steel construction*, Vol. 19, No. 5, pp. 515-526 (in Korean).