

# 기능 개선의 내재화를 통한 강상판 교면포장의 LCC 분석

## LCC Analysis of Steel Plate Bridge Deck Pavement Through Internalization of Improved Functions

백재욱<sup>1)</sup>      박대효<sup>2)\*</sup>  
Baek, Jae Wook      Park, Taehyo

### Abstract

LCC analysis is a method that coordinates with function evaluation for value improvement, rather than a separate one for cost evaluation. Although its accuracy is rising, materials and structural types developed or applied relatively recently have yet to obtain a sufficient maintenance profile DB, inducing reliability to reduce from difficulties in estimating maintenance records. Based on the abovementioned background, this paper presents the LCC methodology of coordinating functional intensification matters with cost for analysis on alternatives with difficulties in setting maintenance profile. Recently, steel plate bridge deck pavements are faced with problems such as plastic deformation due to the increase in heavy vehicles and traffic, promoting the development of a new compound pavement. This paper execute LCC analysis by mentioning case studies of SMA, Guss and PSMA pavements to include performance scale compared between alternatives as relative evaluation coefficients into the maintenance profile.

**Keywords** : Bridge deck pavement, Life-cycle cost, Performance scale, Relative evaluation method, Life cycle estimation

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

LCC(Life-Cycle Cost) 분석은 대안의 비용평가를 위하여 총 생애주기 동안의 모든 발생비용을 현재가치화 하는 분석법으로 VE(Value Engineering)의 기능평가와 상호 연계되어 사용 중에 있는 재료나 세부 구성의 기능을 체계적으로 검토하여 그 기능을 좀 더 경제적으로 실현할 수 있는지를 검토하는 방법이다. 기존의 재료나 구성요소를 제거, 단순화, 결합 또는 대체함으로써 비용절감이 가능한지를 그리고 최적의 총비용으로 필요한 기능을 달성하기 위해 재료적이고 요소적인 개선을 수행하는 방법이다<sup>1)</sup>. 이런 이유로 LCC 분석은 비용평가만을 위한 개별적인 분석이 아닌 가치 개선을 위해 기능적인 사항과 상호 연계되어 이루어지는 방법이다.

시설물의 성능등급에 기준을 둔 유지관리 프로파일 연구는 열화모델의 개발 및 퍼지, 유전자 알고리즘 등 과학

적인 방법으로 개선이 되고 있어 LCC 분석의 정확성이 높아지고 있다. 하지만 비교적 최근에 개발·적용되어진 재료나 형식들에서는 여전히 유지관리 이력을 추정하기가 어려워 LCC 분석에 신뢰성이 떨어진다. 이에 본 연구는 유지관리 프로파일을 설정하기 어려운 새로운 형식 대안들에 대해서 기능적인 증감사항이 비용과 연계되어 이루어지는 방법으로 LCC를 추정하고자 한다. 사장교와 같이 장대교량의 강상판 교면포장은 소성변형 등의 문제가 발생하여 새로운 포장의 연구개발이 이루어지고 있다.

사례 적용으로 최근 활발히 적용되고 있는 SMA(Stone Mastic Asphalt), 구스(Guss) 아스팔트 및 PSMA(Polymer Modified Stone Mastic Asphalt) 포장을 들어 대안 간의 성능척도의 비교를 통하여 기능평가가 비용분석에 내재화 되는 LCC 단일화 분석개념을 제시하고자 한다.

LCC 분석은 기능적인 개선이 비용 절감으로 나타나고 비용의 절감을 위해서는 재료적, 요소적으로 기능 개선에 대한 노력이 필요하다. 이런 이유로 VE는 가치분석(value analysis)에서 발전하여 비용효율(cost effectiveness)이

1) 정희원, 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과

2) 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과

\* Corresponding author : cepark@hanyang.ac.kr 02-2220-0321

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

높은 재료나 요소를 사용함으로써 가치(V=F/C)를 높히려는 기법이다. 기능과 비용은 개별적인 것이 아닌 상호 연관되어 하나의 시스템으로 이루어지는 체계인 것이다.

본 연구에서의 상호 연관과정은 비용항목 내에 기능적인 사항의 증감을 연계시켜 즉, 대안 간의 기능적인 개선이 유지관리 프로파일 설정의 척도로써 비교·적용되어 분석되어진다. 이와 같이 LCC 분석에서 성능척도에 근거한 상대평가계수가 고려됨으로 유지관리 이력을 파악하기 어려운 시설물의 경제성 검토 및 대안 선정방법으로 이용이 가능하다.

도로포장의 공용성은 포장의 기능 또는 서비스수준의 시간적 변화를 의미한다. 포장의 공용성이 좋다는 것은 높은 서비스 수준을 오래 유지할 수 있다는 것을 말하며 서비스수준은 노면의 평탄성, 소성변형, 균열 및 미끄럼 저항 등의 항목으로 표현할 수 있다. 따라서 도로포장의 공용성을 평가하기 위해서는 포장의 시간적 변화량을 파악해야한다.

포장의 공용성을 예측·평가하는 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션, 실내·외 시험, 가속시험, 시험도로, 실제 경험 등이 있다. 컴퓨터 시뮬레이션은 장래 수십 년의 현상을 추정해주지만 신뢰성이 떨어지고, 시험도로는 실제 교통하중으로 주행하면서 포장파손을 가속시키는 것으로 구간의 선정 및 시공에 제약이 많으며, 실제 경험은 검증의 방법으로 사용하기에는 시공비용과 시간이 많이 소요된다. 그리고 포장가속시험은 복수의 영향요인 등으로 인해 요구 성능과의 상관관계 정립이 어렵다.

한정된 상황에서 성능열화를 대상으로 하는 평가법은 실제 환경 하에서의 성능저하패턴과는 차이가 있다. 실제의 환경은 구성 재료에 대해 여러 가지 강약의 열화 부하로 복합적으로 작용하므로 열화가 의미하는 것은 각 성능의 평균치도 아니고 최소치도 아닌 종합적인 해석이 필요한 영역이다.

기능평가에 근거한 LCC 분석을 위해 도로포장의 기능 측면을 고려한 유지관리에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다.

도명식 등은 일반포장과 내유동포장의 공용성 평가를 위해 소성변형의 자료를 중심으로 하여 경제성이 분석되었다<sup>2)</sup>. 포장의 유지관리 타이밍의 기준으로 중평탄성, 소성변형, 균열이 고려되었고 경제성 분석항목으로 관리자 및 이용자 비용을 구분하여 장기간(40년) 기능 측면의 경제성이 평가되었다. 또한 유평준과 이동현은 포장의 기능적 상태 변화를 나타내는 공용성 예측모델을 이용하여 수명평가가 분석되었다<sup>3)</sup>. 공용성 조사결과를 토대로 포

장의 상태변화 추이를 예측하기 위해 마르코프(Markov) 확률과정이 전개되었고 파손예측을 토대로 포장 공용성 예측모델이 개발되었다.

이와 같이 포장의 기능에 기초한 공용성 평가연구는 예측모델에서부터 실제 열화를 평가하는 방법까지 다양하게 적용되고 있지만 공용기간이 짧아 유지관리 이력을 파악하기 어려운 형식대안들을 포함하여 적절하게 분석하기에는 한계가 있다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 Fig. 1과 같이 크게 6단계로 구분되는 과정을 거쳤으며 강상관 교면포장의 LCC를 산정하고 공용성을 추정하기 위해 비교적 최근에 개발·적용되고 있는 SMA, Guss 및 PSMA 포장대안에 대한 대상설정이 먼저 이루어졌고 비교·검토되었다.

기능을 연계한 LCC 분석 및 산정을 위해 기능·비용 연계모델 및 성능척도 결정모델 등이 개발되었고 예방유지관리수준에서 유지관리모형을 설정하기 위해 포장의 공용성 및 기능성과 관련된 연구문헌이 검토·분석되었다.

최종적으로 통합적인 성능척도의 산정 및 비율화를 통해 대안별로 유지관리 프로파일이 결정되어 LCC가 산정되어진다. 또한 본 연구에서는 대안 간의 성능 척도화 및 확률적인 LCC 산정은 개발된 프로그램을 통하여 분석이 이루어졌다.

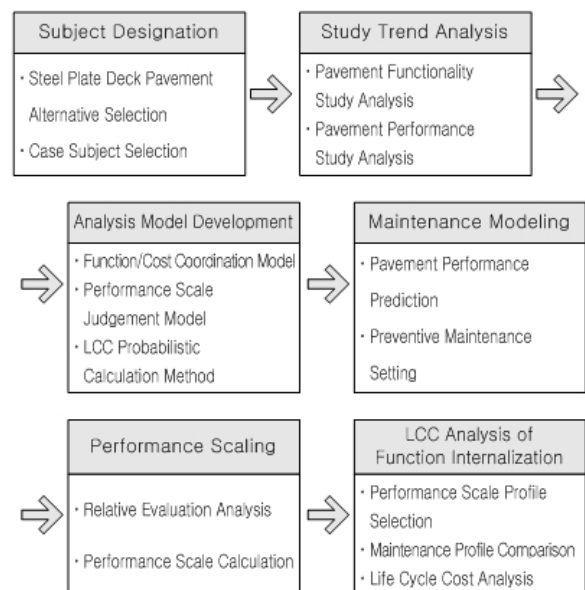


Fig. 1 Performing Process

## 2. 이론 정식화과정

본 연구에서는 생애주기 동안의 모든 발생비용을 고려하기 위해 Ehlen & Marshall의 비용분류모델<sup>17)</sup>을 기본 구성으로 하여 새로운 LCC 추정모델이 개발되었다. 기존 모델은 NIST의 BridgeLCC 프로그램의 개발모델로 입력 변수의 불확실성 및 변동성을 고려하지 않는 간단한 접근 방법이기 때문에 본 연구는 이를 고려하고 상대평가방법<sup>18)</sup>이라는 기능적인 증감사항이 비용에 고려될 수 있도록 새로운 분석모델을 통하여 LCC가 추정되었다. 생애주기비용 산정 식은 다음과 같다.

$$PVLCC = IC + PVOMR + PVD \quad (1)$$

여기서, PVLCC는 총 기대 생애주기비용의 현재가치, IC는 초기비용, PVOMR는 유지관리비용의 현재가치, PVD는 처리비용의 현재가치를 나타낸다.

초기비용(IC)은 관리주체가 최초로 투자하는 기본적인 매개변수로서 시설물의 계획과 설계 및 시공 등 준공되기 전까지 발생하는 비용으로 건설비용, 계획·설계·감리비용 등을 포함한다. 초기비용의 산정 식은 다음과 같다.

$$IC = \sum_{j=1} C_j^{ic}(x) \quad (2)$$

여기서, j는 구성항목, x는 구성항목에 관련된 제반변수,  $C_j^{ic}$ 는 초기비용 항에 관련된 구성항목의 적용비용을 나타낸다.

유지관리비용(PVOMR)은 크게 운영·관리비용, 유지·보수비용, 점검·진단비용이라는 각각의 합으로 표현되며<sup>4)</sup> 대안별로 성능척도를 비교하기 위해 상대평가계수가 고려되었다.

$$PVOMR = \sum_{k=0} \frac{OMR_k}{(1+i)^k}$$

$$OMR_k = \sum_{j=1} OMR_j(x, k) \quad (3)$$

$$OMR_j(x, k) = C_j^{omr}(x, k) \cdot \left\{ RV_j \cdot \int PDF_j(m_n, v_n) dk \right\}$$

여기서,  $OMR_k$ 는 k년도 j항목까지의 유지관리비용 총

합, i는 할인율, k는 LCC 고려 시 유지관리 및 보수·보강의 단위기간을 나타낸다.  $OMR_j$ 는 j항목의 유지관리비용,  $C_j^{omr}$ 는 j항목의 k년에 발생하는 n번째의 적용비용,  $RV_j$ 는 비교대안의 상대평가계수,  $\int PDF_j(m_n, v_n) dk$ 는 k년에 속하는 구성항목의 발생에 대한 확률밀도분포의 합을 나타낸다.  $m_n$ 은 k년도에 발생하는 n번째 산술평균,  $v_n$ 은 k년도에 발생하는 n번째 표준편차를 나타낸다.

본 연구에 제안된 식 (3)의 비교대안 상대평가계수  $RV_j$ 의 산정 식은 다음과 같다.

$$RV_j = \left( \frac{V_a^{min}}{V_a} \right)_j \quad (4)$$

$$V_a = \sum_{i=1}^e W_e Z_e$$

여기서, j항목의 상대평가계수  $RV_j$ 는 대안 중 최소 성능척도  $V_a^{min}$ 에 대한 비교 대안의 성능척도  $V_a$ 의 비율로 나타낸다. e는 결정요소의 수,  $W_e$ 는 e가지 결정요소별 성능도,  $Z_e$ 는 각각의 결정요소에 대한 대안의 성능도를 나타내며 대안별 산정과정에서 분배되어진다.

처리비용(PVD)은 시설물의 내구년한이 끝나는 시점에서 해체·폐기에 의해 발생하는 비용으로 산정 식은 다음과 같다.

$$PVD = \sum_{k=0} \frac{D_k}{(1+i)^k}$$

$$D_k = \sum_{j=1} D_j(x, k) \quad (5)$$

$$D_j(x, k) = C_j^d(x, k) \cdot \left\{ RV_j \cdot \int PDF_j(m_n, v_n) dk \right\}$$

여기서,  $D_k$ 는 k년도 j항목까지의 처리비용 총합을 나타낸다.  $D_j$ 는 j항목의 처리비용,  $C_j^d$ 는 j항목의 k년에 발생하는 n번째의 적용비용을 나타낸다.

참고로 유지관리 및 처리 비용의 산정 식에 고려되는 변수는 예상되는 불확실성을 확률분포의 형태 즉, 확률밀도(probability density) 및 누적분포(cumulation distribution) 함수의 형태로 분석되어진다. 통계이론을 바탕으로 한 확률해석은 불확실성의 제거 및 신뢰성 개선을 위한 방법으

로 고려되었다.

식 (3)와 (5)에서와 같이 생애주기비용 산정은 기능과 비용이 단일화 되어 나타난다. 기능 개선사항이 비용과 연계되어 대안 간에 비교된 성능척도가 상대평가계수로써 비용항목 항에 포함되어 LCC가 분석된다. 본 연구의 상대평가계수는 다기준분석(multi-criteria analysis)의 하나인 계층화분석기법(Analytic Hierarchy Process)에 기초하고 있다<sup>18)</sup>. 결정요소에 대한 대안의 기능 비교치는 상대적 중요도를 나타낸다. 두개 항목 간의 비교이므로 세부요인을 포함하여 전체적인 정합성이 고려되어진다. 최종적으로 연립방정식체계에서 non-zero해를 구하는 고유치문제로 분석된다.

이와 같이 식 (4)는 종합화를 통하여 대안 간의 상대평가계수가 결정되어진다. 대안 간의 결정요소에 대한 성능증감사항은 비율 척도화를 통해 LCC 분석에서 유지관리 프로파일에 영향을 준다.

### 3. 포장 예방유지관리 모형화

일반적으로 도로포장은 신설 이후 교통 하중 및 환경적 요인에 의해 포장 파손이 진전되며 포장 파손상태의 객관적 기준을 포장 공용성(pavement performance)으로 나타낸다. 공용성은 시공 직후 양호한 상태에서 교통 개방 후 서서히 감소하게 된다. 감소 정도는 교통하중 및 환경여건에 따라 다양하며 포장 공용성에 영향을 미치는 요소는 매우 많아 장기 공용성을 예측하는 것은 아직까지 어렵다. 특히, 아스팔트 포장의 경우 포장 상태의 변동 특성이 커 회귀분석된 공용성 예측모델을 제시하기는 어려울 뿐만 아니라 모델의 신뢰성에도 문제가 있다<sup>3)</sup>.

포장이 중심이 되는 도로시설물의 유지관리는 Table 1

Table 1 Concept of Maintenance on Pavement Facilities

Classification	Main Contents
Daily Maintenance	•Partial small-scale maintenance such as joint repair, crack sealing, etc.
Rehabilitation	•Major maintenance on problems such as patching, etc. May require partial overlay and resurfacing on damaged areas.
Pavement Resurfacing	•Overlay, overlay after cutting, extensive repairs for cases unable to recover functionality with partial maintenance.
Resurfacing	•Rather than a resurfacing concept, this is an idea of complete disuse of existing lane existing lane and constructing a new road due to expansion of linear improvement, etc.

과 같이 정의되며 본 연구에서는 재포장이라는 개념성이 도출되었다<sup>5)</sup>. FHWA에서는 포장 LCC 최적설계를 위하여 포장구조체 설계, 재포장 방법 및 LCC 관련 비용모델에 대한 연구를 수행하였다<sup>19)</sup>. 비용모델은 포장의 시공비용, 재포장비용, 폐기처리비용, 상시유지보수비용, 사용자 비용 모델을 포함하고 있다. 하지만 비용모델에 의한 연구의 접근은 한계가 있어 포장의 기능, 유지보수 및 대수선과 관련된 주요 변수의 결정, 도로 점용에 따른 사용자 비용의 추정, 확실적인 분석절차의 정립 등으로 접근되고 있다. 또한 최근에는 환경요소를 고려하여 재료생산 및 유지관리 시 환경오염, 포장의 재활용, 주행 편의성, 에너지 소비, 공기오염 등에 대한 광범위한 요소를 다루고 있다<sup>5)</sup>.

일반적으로 수명(life)은 시스템의 사용 개시 후 폐기에 이르기까지 기간으로 정의된다. 시설물의 수명에는 법적, 물리적, 사회적 내용연수가 있다. 물리적으로 평가한 수명과 사회적 요소에 의해 평가된 수명이 어느 정도 일치하는 것이 이상적이지만 Fig. 2<sup>6)</sup>와 같이 다양한 사회적인 요구와 시설물의 조기 열화나 급증하는 환경부하에 기인하는 물리적 성능의 저하 문제를 복합적으로 고려한다면 수명의 결정은 상당히 복잡하고 어려운 문제가 된다.

시설물의 내용연수에 상응하는 수명예측 즉, 성능 저하의 파악은 적기에 유지관리를 실시하기 위해서 매우 중요한 항목이다. 이러한 개념에서 예방유지관리란 합리적인 수명 예측에 근거해 시설물의 열화가 현저히 진행되기 전의 단계인 관리 상의 성능의 하한을 넘지 않은 시기에 관리하는 것을 말한다. 예방유지관리활동으로 안전한 상태에서 시설물의 기능을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 LCC 저감을 도모할 수 있다. 본 연구도 이와 같이 포장의 예방유지관리 활동 모형화에 의해 분석되었다. 시설물 초기의

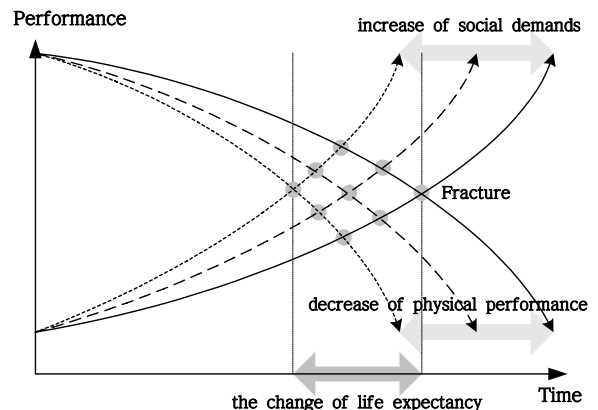


Fig. 2 Life Solution Conceptual Diagram

건전한 상태에서 투자된 비용의 효과가 노후화가 상당히 진행된 후의 투자·효과 보다 훨씬 더 경제적인 것이다. 이러한 유지관리전략으로 구체적인 계획을 세우고 운영 및 유지관리 단계에서 피드백하는 것이 핵심이다. 자세한 사항은 사례적용에서 기술되며 일례로 Table 3은 본 연구의 예방유지관리활동을 위한 포장 유지관리항목의 설정사항이다.

수명예측은 대상이 되는 현상을 주의 깊게 관찰한 후 수학적 모델화를 실시하는 것이 일반적인 순서이다. 정성적인 연구가 원시적인 연구이며 정량적인 연구가 한층 더 진화한 연구라는 인식이 있지만 정성적인 연구에 대해 충분한 데이터베이스가 되어 있지 않으면 정량적인 수식 모델은 극히 일부의 현상의 것 밖에 예측할 수 없던지 전 시스템의 관점에서 의미 없는 결과가 될 우려가 있다.

본 연구도 강상판 교면포장의 열화모델이나 열화메커니즘이 아직 미완성 단계에 있기 때문에 정량적인 분석이 아닌 정성적인 접근으로 평가되었다. 교면포장의 성능을 결정할 수 있는 다양한 요소를 대안별로 비율적대화 하여 그 결과를 유지관리 프로파일에 상호 연관시켜 LCC가 분석되었다. 즉, 교면포장의 성능 향상적인 목표를 달성하기 위하여 복수의 해 중에서 가장 경제적인 생애주기 동안의 대안분석이 성능척도의 비교화로 LCC 분석에 내재화된 것이다.

구조적 시스템의 열화나 수명은 물질 고유의 것이 아니라 재료 자신의 물리적 상황과 외부로부터 각종 부하의 작용에 의해서 복합적으로 변화하므로 상대적인 비교평가방법도 유효할 수 있으며 성능 개선을 위한 기능적인 접근으로 예방유지관리를 도모할 수 있다.

#### 4. 사례 적용

도로교에서 교면포장은 양호한 평탄성을 유지하고 상판을 보호하는 목적으로 적용된다. 교면포장은 구조물의 진동 및 차량하중 그리고 혹독한 기상조건에 노출되어 있고 하중전달이 상판에 집중되어 토공부 보다 초기파손의 발생빈도가 높고 잔존수명도 일반적으로 짧다.

공용기간이 확보되어 유지관리 프로파일의 설정이 가능한 일반 아스팔트 교면포장과는 달리 사장교 강상판 포장은 유지관리 이력 추정에 다소 어려움이 있다. 이와 같이 본 연구의 LCC 분석은 어느 정도 검증된 SMA 포장과의 성능 비교를 통하여 Guss, PSMA 포장과 같은 이력

추정이 어려운 포장대안들을 평가하고자 한다.

#### 4.1 대상 현황

사장교와 같은 장대교량에서는 고정하중을 경감시키기 위해 종래의 RC나 PC 대신 강상판구조를 많이 채택하고 있다. 하지만 강상판은 경량이라는 장점이 있는 반면에 변형성이 커 국부적인 변형은 강상판 포장의 균열을 일으키는 주원인이 되므로 주의가 요구된다. 따라서 강상판 사장교 설계 시 국부적인 변형이 일으키지 않도록 구조상의 고려를 하여야 하며 포장혼합물은 입도가 작으면서도 안전도가 높고 내구성이 풍부한 재료의 선정이 필요하다. Fig. 3과 4는 사례대상물의 현황을 나타낸다(연장 1,480m, 포장 폭 30.4m).

#### 4.2 포장의 구성과 대안 설정

교면포장으로 사용하고 있는 재료는 일반 밀입도 아스팔트 혼합물, 개질 아스팔트 혼합물, 쇠석아스팔트(SMA) 및 구스(Guss) 아스팔트 혼합물 등이 적용되고 있다. 외국의 경우 강상판 포장의 하부층에 수밀성과 치짐추종성이 큰 구스아스팔트 혼합물은 과거로부터 많이 적용되고 있다. 하지만 최근 중차량과 교통량의 증가로 소성변형의 발생으로 저항성이 낮은 구스 아스팔트 혼합물을 대체할 수 있는 혼합물의 개발이 활발히 이루어지고 있다<sup>7)</sup>.

Fig. 5는 사례대상구간 교면포장의 구성을 나타낸다. 교면포장의 구성은 상부층, 하부층, 방수층으로 구성하는 것이 일반적이다. 상부층은 양호한 주행성능을 확보하기 위한 층으로 내유동성, 내균열성 및 미끄럼저항성이 우수해야 한다. 하부층은 상판의 요철부분을 고르고 장수명 혼합물로서 충분한 내구성을 지녀야 하고 차량하중에 의한 강상판의 변형에 잘 저항해야 한다. 방수층은 우수 등이 줄눈부나 포장 등을 통하여 강상판에 직접 닿게 되면 녹이 발생하므로 충분한 방수 불투수성을 지녀야 한다.

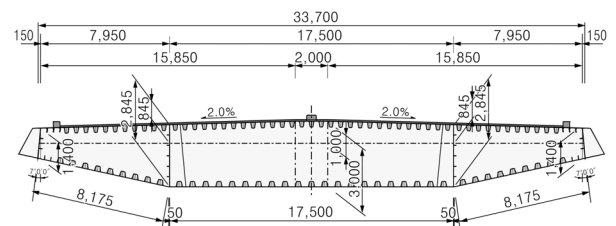


Fig. 3 Sectional Diagram

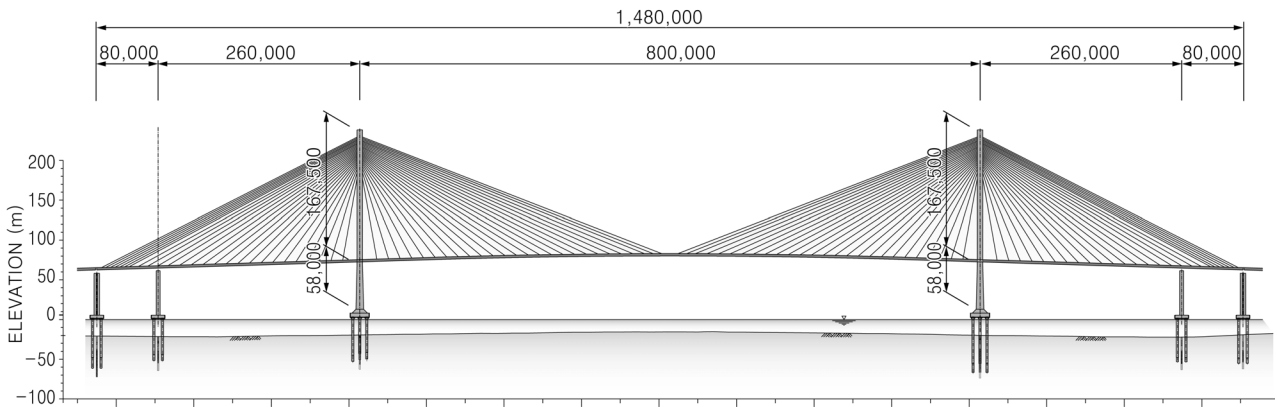


Fig. 4 Case Subject Status

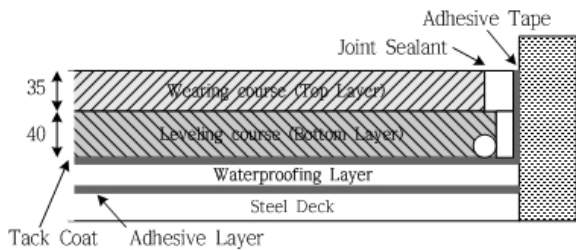


Fig. 5 Bridge Deck Pavement Composition

본 연구에서 고려된 강상판 교면포장의 대안은 다음과 같다.

첫 번째로 SMA 포장은 1968년 독일에서 개발되어 소성변형에 대한 저항성과 내구성의 우수함이 인정되어 널리 사용되고 있다.

두 번째로 구스 아스팔트포장은 수밀성이 좋고 변형에 대한 추종성이 크기 때문에 유럽 및 일본 등에서 강상판 교면포장으로 많이 사용된다. 일반 아스콘으로는 얻을 수 없는 밀도가 얻어짐과 동시에 강상판과의 밀착이 좋은 특성이 있다. 혼합물은 불투수성이므로 상판을 방수 보호까지 겸할 수 있고 진동 및 충격변형에 강하여 교면포장재료로서 적합하다. 하지만 온도가 높은 여름철에 중차량의 통행량이 많은 도로에서는 소성변형이 많이 발생한다.

세 번째로 PSMA 포장은 독일, 미국 등에서 사용이 되고 있다. 혼합물에 사용되는 골재의 맞물림 특성을 최대한 발휘하기 위해 아스팔트 함량을 높이고 고분자 첨가제 등을 사용하며 입형이 좋은 골재 즉, 파쇄면이 많게 하는 등 골재 간의 맞물림현상을 증대시킨 게 특징이다. 소성 변형 및 균열발생에 대한 저항성이 높으므로 강상판에서 20년 이상의 장수명을 갖기 위해서 효율적인 것으로 인

식되고 있다. 또한 사장교 적용에서는 기대수명을 안정적으로 확보할 목적으로 공용성 등급을 상향시켜 개질아스팔트바인더를 조정하면서 적용하고 있다.

#### 4.3 공용수명 분석 및 예측

설계수명 20년을 기준으로 실시하는 아스팔트포장의 설계개념은 내용연수 20년 이후에 재시공을 전제로 하지만 실제로는 조기 파손이 자주 발생한다. 선진국에 비해 50% 이상 공용기간이 짧아 막대한 예산의 손실로 이어지는 등 문제가 있다. 이런 이유로 현재 20년 주기의 아스팔트 포장의 내용연수를 40년 이상 증가시켜 잦은 유지보수를 근본적으로 줄여 사회 및 경제적 손실을 최소화할 수 있는 장수명 아스팔트포장 공법의 개발이 연구되고 있다<sup>8,9)</sup>. 장수명 포장이란 내용연수 동안 주기적으로 표층만 재시공하고 재건설이나 대대적인 보수없이 40년 이상을 견딜 수 있어 공용성이 기존 아스팔트포장의 2배 이상이 되는 포장을 말한다<sup>20)</sup>.

본 연구는 교면포장 대안들의 성능척도 비교를 위해 장수명포장의 장기 공용성인 40년을 기준으로 장수명포장은 모든 기능적인 항목에 대해 만족할 수 있는 성능을 발휘한다는 가정 하에 대안들을 상대적으로 평가하고자 하였다.

다음은 본 연구의 공용성을 예측·분석하기 위해 교면포장의 내용연수를 고려한 기존 연구를 살펴보면 다음과 같다.

유럽의 구스아스팔트 교면포장의 공용성은 대체적으로 양호하며 평균수명도 20년을 상회하지만 포설작업이 주로 인력에 의존해 숙련도에 따라 공용성이 좌우되고 있었다. 또한 개질 아스팔트 교면포장의 평균수명은 10년을

초과하지 못하여 수명을 연장하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있었다<sup>10)</sup>. 포장 상태평가와 기존 공용성 자료에 근거하여 SMA 포장의 수명을 예측한 연구는 도입기간이 짧아 장기 공용성의 자료가 부족하지만 상태평가 분석으로 SMA 포장수명을 15년으로 가정 예측하였다<sup>11,12)</sup>. 심보현 등은 기존 자료와 전문가 면담을 실시하여 SMA 교면포장의 보수(최초 7년, 주기 5년) 및 재포장(최소 및 주기 15년)의 주기를 분석하였다<sup>13)</sup>.

또한 특수아스팔트 혼합물에 대해 휠트랙킹(wheel tracking), 휨(bending beam), 빔피로(flexural beam fatigue) 시험을 통해 특성 분석한 연구를 살펴보면 다음과 같은 결과를 얻었다<sup>14,15)</sup>. 휠트랙킹시험에서 Guss는 PSMA에 비하여 소성변형에 대한 저항성이 상당히 낮은 것으로 평가되었고 처짐 추종성을 평가하기 위한 휨시험에서는 PSMA, SMA, Guss 순서로 평가되어 Guss는 취성파괴의 위험성이 높은 것으로 분석되었다. 빔피로시험에서는 PSMA가 가장 큰 피로수명을 가지는 것으로 그리고 Guss, SMA 순서로 피로 수명을 가지는 것으로 분석되었다. 또한 김대수는 PSMA 포장에 대한 실내시험 결과 소성변형, 피로균열, 수분민감도, 온도 변화에 의한 회복 탄성계수의 변화가 민감하지 않아 우수한 공용성을 확보하는 것으로 분석하였다<sup>16)</sup>.

#### 4.4 LCC 산정

LCC분석은 SMA 포장을 기준으로 하여 Guss 및 PAMA 포장의 성능비교를 통하여 분석하였다. Guss, PSMA 등 최근 적용되고 있는 포장은 유지관리이력 추정에서 어려움이 존재하여 LCC 분석결과의 신뢰성이 떨어진 다. 기능 개선이 내재된 LCC 분석은 이처럼 검증된 유사 포장형식에 대해 즉, 어느 정도 유지관리 프로파일이 객관화된 포장과의 성능 유추분석을 통하여 기능 개선인자가 비용평가의 항목으로 적용되어 분석이 가능해진다.

적용에서 분석기간은 40년을 포함하고 시설물 목표수명인 100년까지 감안하여 분석하였고 실질할인율은 4.5%가 적용되었다. 초기비용은 Table 2와 같이 대부분을 차지하는 건설비용만을 고려하여 분석되었다. 유지관리비용은 운영·관리비용을 제외하여 유지·보수비용 및 점검·진단비용으로 구성되었고 처리비용은 재활용비용을 제외하여 철거 및 폐기비용으로 분석되었다.

이와 같이 본 연구에서의 비용 항목구조는 포장에 대한

Table 2 Calculation Result of Initial Cost per Alternative

Classification (won/m <sup>2</sup> )	SMA	GUSS	PSMA
Waterproofing Layer	48,662	48,662	48,662
Asphalt Layer	34,700	71,778	40,400
Total	83,362	120,440	89,062

Table 3 Preventive Maintenance Item Settings

Item	Maintenance Contents
Wearing Layer Resurfacing Cost	•Wearing layer resurface cost conducted on ○○ year after construction and extensive resurface
Basic Maintenance Cost	•Preventive maintenance activity cost such as foot observation, daily maintenance, etc.
Pavement Condition Survey Cost	•Cost of annual survey (semi-annual), detailed survey (bi-annual), and detailed safety survey (once after initial 5 yrs)
Extensive Resurfacing Cost	•Total resurfacing cost conducted on ○○ year after construction and total resurfacing
Disposition Cost	•Removal and disposition cost for extensive and wearing layer resurfacing

예방유지관리 모형화를 통해 Table 3과 같이 마모층 재포장비용, 기본유지관리비용, 포장상태조사비용, 전면 재포장비용, 처리비용으로 대별하여 분석되었다.

포장상태조사비용은 시투법에 따른 안전관리활동에 관련된 비용을 말하고 기본유지관리비용은 일상보수 등 장수명화를 위한 예방유지관리활동의 일환으로 시행되는 비용을 말한다. 재포장비용은 공용 후 포장층 및 방수층 등에 대한 전면적인 재포장 활동에 따른 비용이다.

본 연구에서 고려하고 있는 상대평가계수는 Table 3에서 표현되는 유지관리 및 처리 비용의 산정을 위해 고려되어진다. 대안 비교에서 상대적인 성능수준의 차이로 공용수명 동안에 유지관리인자별로 각각의 프로파일이 결정되어진다. 이론 정식화과정의 식 (3) 또는 식 (5)와 같이 성능척도모델은 비용모델에 포함되어 기능 개선사항이 유지관리 프로파일에 연계되어 분석되어진다. 참고로 상대평가계수의 결정을 위한 의사결정요소 및 요소의 중요도는 Table 4와 같다.

대안 간에 선호도평가 및 쌍대비교를 통하여 Table 5와 같이 상대평가척도가 결정되었다. 척도 산정에서는 변동계수(COV)라는 불확실성을 고려하여 표준정규분포로 가정되어 확률적으로 분석되었다. 본 연구는 제약상 도로 시설 관리업무에 관련된 포장 및 유지관리전문가로 한정되었고 앞서와 같이 어느 정도의 유지관리 프로파일이 객관화된 포장과의 성능 유추평가를 통하여 요소화가 이루어지도록 분석되었다.

Table 4 Performance Scale Solution Factors

Factor	Contents	Importance Degree
Workability	•Reviews degree of applicability of various performance under different road traffic conditions	0.051
Durability	•Reviews degree of excellence regarding rut-resistance and durability	0.147
Plastic Deformability	•Reviews degree of excellence regarding resistance against plastic deformation	0.092
Skid Resistance	•Reviews degree of safety regarding skid resistance	0.354
Quality Manageability	•Reviews degree of convenience regarding quality management of pavement material	0.272
Maintainability	•Reviews degree of convenience regarding maintenance and repair of pavement	0.084

Table 5 Analysis Result of Performance Scale per Alternative (Resurfacing)

Solution Factors	SMA		GUSS		PSMA	
	Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV
Workability	2.6	0.141	2.3	0.157	3.3	0.109
Durability	8.1	0.129	11.0	0.094	10.3	0.101
Plastic Deformability	6.3	0.104	5.2	0.126	7.4	0.088
Skid Resistance	18.4	0.105	24.1	0.081	26.9	0.150
Quality Manageability	14.7	0.211	13.3	0.233	19.3	0.161
Maintainability	4.2	0.141	5.2	0.135	7.2	0.064
Total	54.2	0.041	61.1	0.062	74.4	0.094

\* COV = Coefficient of Variation

유지관리인자별로 성능수준은 설계수준, 시공의 품질관리, 지역여건, 교통특성 등에 따라 달라지고 향후 유지관리 의사결정, 일정계획, 정비체계, 관리방안 등에 따라 달라지므로 다양한 영향항목에 대한 결정이 필요하다.

참고로 Table 6은 유지관리항목 중 마모층 및 전면 재포장 활동에 대한 단위비용을 나타낸다. 대안별 각각의 단위비용은 성능척도 및 유지관리 프로파일이 고려·적용되어 생애주기비용이 산정되어진다.

LCC분석에서는 미래의 통화가치 변화량, 분석기간, 교통상황 등 불확실한 변수가 많아 영향을 분석하는 것이 일반적이다. 교통상황의 변화량 중 가장 큰 비중을 차지하는 사용자비용은 이런 불확실성을 줄이기 위해 민감도가 분석되어진다. 사용자비용이란 도로를 주행하는 차량들이 교통 혼잡으로 인해 정상속도 이하로 주행함으로써 발생하는 시간가치의 손실, 차량운행비의 증가 등 추가적

Table 6 Unit Cost for Maintenance and Disposition per Alternative

Classification(won/m <sup>2</sup> )		SMA	GUSS	PSMA
Wearing Layer Resurfacing	Removal	3,220	3,642	3,363
	Resurfacing	17,238	32,783	19,798
	Disposition	1,985	1,985	1,985
	User	1,720	1,289	1,289
	Total	24,163	39,699	26,435
Extensive Resurfacing	Removal	21,510	22,285	21,726
	Resurfacing	90,450	123,759	95,710
	Disposition	4,631	4,631	4,631
	User	3,225	2,578	2,578
	Total	119,816	153,253	124,645

인 사회적비용의 총합을 의미한다. 본 연구에서도 혼잡비용이론에 따른 사용자비용은 고려되며<sup>21)</sup> 대상시설물이 왕복 12차로인 관계로 마모층 및 전면 재포장활동의 제거 및 재포장 시 발생하는 사용자비용은 Table 6과 같이 영향이 작은 것으로 분석되었다.

#### 4.5 유지관리 프로파일 설정

생애주기비용 산정은 포장에 대한 예방유지관리 모형화를 통해 이루어진다. 공용수명 동안에 각각의 대안은 확률적인 유지관리활동 분포모형화가 이루어지고 Table 5와 같이 불확실성이 고려되는 성능평가를 통하여 기능 개선이 내재화된 생애주기비용 산출이 가능해진다. 이처럼 불확실변량의 확률모형화 및 입력변수의 Latin Hypercube sampling에 의한 시뮬레이션 등을 통해 Fig. 6과 같이 본 연구의 대안별 유지관리 프로파일이 도출되었다. 생애주기 동안의 발생비용에 대한 전체전문가의 통합적인 확률분포를 의미하여 최확치 기준으로 마모층 재포장시기는 SMA 포장이 12.4년, Guss 포장이 13.9년, PSMA 포장이 17.0년으로 분석되었고 전면 재포장시기는 최확치 기준으로 SMA 포장이 21.6년, Guss 포장이 24.3년, PSMA 포장이 29.7년으로 산정되었다. 이와 같이 대안별로 성능척도 비교화를 통해 확률적인 유지관리 프로파일을 산정할 수 있었다. 참고로 PSMA 포장의 마모층 재포장시기는 데이터의 변동성에 대한 결과로 최대 19.7년, 최소 13.9년(표준편차 2.9년)인 것으로 전면 재포장시기는 최대 34.5년, 최소 24.3년(표준편차 5.1년)인 것으로 신뢰구간이 분석되었다.



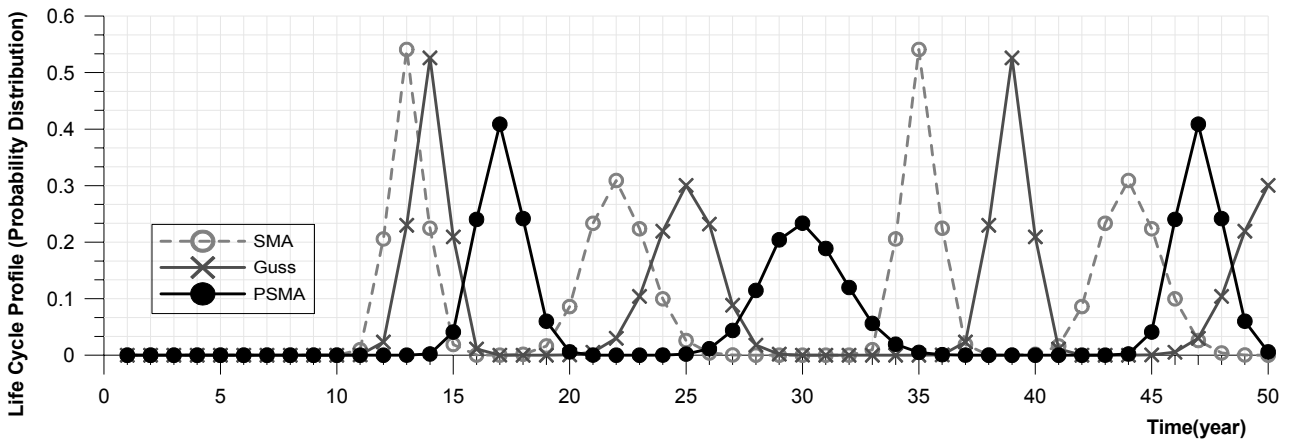
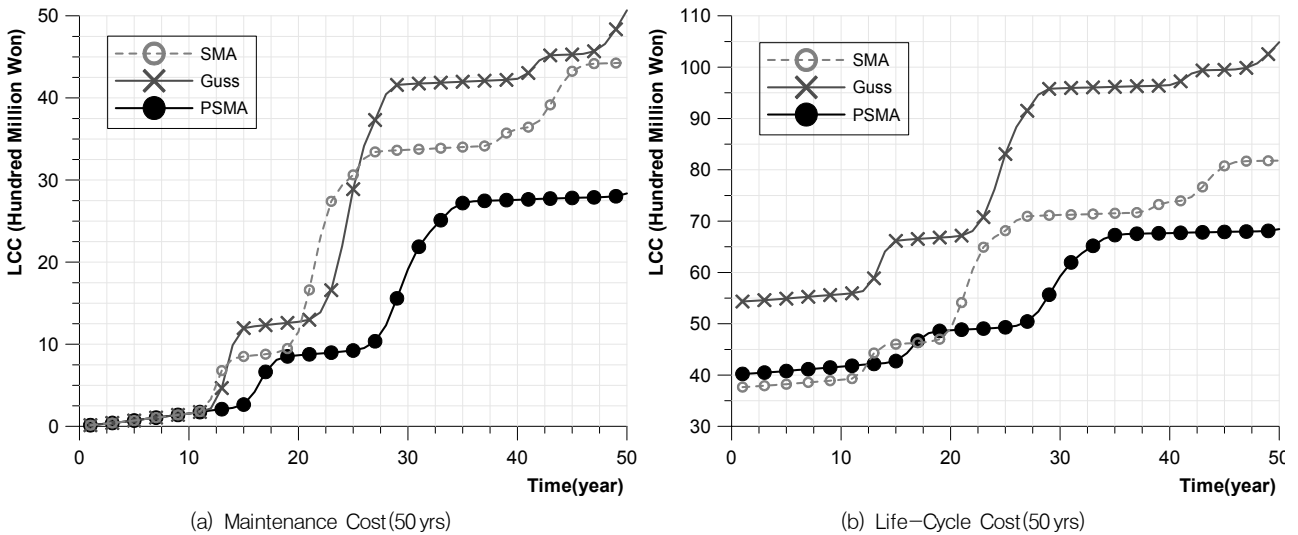


Fig. 6 Comparison of Maintenance Profile per Alternative



(a) Maintenance Cost(50 yrs)

(b) Life-Cycle Cost(50 yrs)

Fig. 7 Life-Cycle Cost Accumulation Graph per Alternative

#### 4.6 LCC 결과 분석

PSMA 포장은 SMA 포장에 비해 초기비용은 증가하나 성능 향상에 따른 유지관리비용이 감소하여 생애주기 동안에 Guss 포장 보다 경제적이고 최적 대안인 것으로 분석되었다.

성능수준을 비교하면 Table 5와 같이 PSMA 포장(최확치 기준으로 74.4)은 SMA 포장(54.2) 및 Guss 포장(61.1) 보다 전체적으로 37.31%, 21.82% 성능 향상이 가능한 것으로 분석되며 유지관리인자별 프로파일과 함께 고려되어 유지관리비용이 Table 7과 같이 분석되었다. PSMA 포장은 미끄럼저항성, 품질관리성, 유지관리성에서 우수한 것으로 분석되었으며 SMA 포장 보다 최소 34.85%, 최대 34.16% 그리고 Guss 포장 보다 최소

Table 7 Analysis Result of Life-Cycle Cost

(Unit: Hundred Million Won)

Classification	SMA	GUSS	PSMA
Initial Cost	37.51	54.19	40.07
Maintenance Cost	37.37	44.97	26.83
- Basic Maintenance Cost	3.31	3.42	3.53
- Pavement Condition Survey Cost	1.76	1.77	1.77
- Wearing Layer Resurfacing Cost	7.35	12.10	5.88
- Extensive Resurfacing Cost	24.95	27.68	15.65
Disposition Cost	9.64	8.39	6.02
Life-Cycle Cost	84.52	107.55	72.92

16.64%, 최대 20.91% 성능 향상을 기대할 수 있었다.

향후 100년간 기능 개선이 내재된 LCC 분석결과 Table 7과 같이 SMA 포장은 84.52억원, Guss 포장은 107.55

억원, PSMA 포장은 72.92억원으로 분석되었다. 또한 FHWA<sup>19)</sup>에서 권장하고 있는 향후 35년간 분석결과 SMA 포장은 69.85억원, Guss 포장은 90.94억원, PSMA 포장은 64.77억원으로 분석되었고 PSMA 포장은 SMA 포장 보다 5.08억원, Guss 포장 보다 26.17억원 절감이 가능한 것으로 보였다.

또한 PSMA 및 Guss 포장은 25년 정도의 공용수명을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. Guss 포장은 강상판 진동에 의한 적응력이 높고 방수성이 우수하여 부식방지 효과 및 불투수성으로 내구성, 내충격성, 점착성이 우수한 것으로 분석되었지만 PSMA 포장에 비해 초기비용이 높고 시공과정에서 엄격한 품질관리가 요구되는 등 장기적인 공용성 확보에 어려움이 있는 것으로 분석되었다. 공용기간 동안에 소성변형에 취약성을 보이므로 성능수준이 낮게, 유지관리 및 보수비용이 증가되는 것으로 보인다. 참고로 Fig. 7은 향후 50년간 유지관리 및 생애주기 누적비용 그래프를 나타낸다.

이와 같이 PSMA 포장은 내유동성이 증가하여 소성변형이 우수하고 미끄럼저항성이 커지는 등 도로의 기후환경과 교통여건 등을 감안하여 성능 향상이 기대되고 경제적인 대안인 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

본 연구는 유지관리이력을 파악하기 어려운 포장에 대해 어느 정도의 실적과 기존 연구결과에서 검증된 포장형식들과의 상대적인 성능비교 척도화를 통하여 기능 개선이 내재된 LCC 산정으로 대안을 선정·비교하고자 하였다.

사례 적용으로 최근 강상판 교면포장으로 흔히 고려되고 있는 SMA, Guss 및 PSMA 포장을 비교하였으며 성능척도에 근거한 상대평가계수를 LCC 분석에 통합하여 기능평가와 비용평가가 상호 연관되는 단일화과정인 LCC 분석법을 제시하였다. LCC는 PSMA 포장이 가장 경제적인 것으로 평가되었으며 유지관리모형화 결과 PSMA 포장은 30년, Guss 포장은 24년 정도 공용수명을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구는 포장형식별로 적정한 유지관리 프로파일을 예측하기 위해 보다 객관화된 포장들과의 유추분석을 통한 LCC 분석법으로 대안 평가 및 설문조사에 의한 기존 LCC 분석의 문제점을 개선시킬 수 있다. 기능평가와 비용평가를 상호 연관시켜 하나의 체계로 단일화하는 LCC

최적화 분석과정은 보다 신뢰할 수 있는 의사결정 및 생애주기비용 산정법으로 유용할 수 있다.

## 참고문헌

1. 김광수, 가치공학실무, 민영사, 2001.
2. 도명식, 한대석, 유인균, 이수형, "LCC를 고려한 내유동포장의 공용성 및 경제성 분석에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제26권 제5호, 2006, pp.783-796.
3. 유평준, 이동현, "확률적 포장 공용성 예측모델 개발 방법론", 한국도로포장공학회논문집, 제4권 4호, 2002, pp.1-12.
4. 백재욱, 주환중, 송유섭, 박대효, "적정 유지관리수준에 기초한 폐도도상구조에 대한 경제성 검토", 한국철도학회논문집, 제10권 제2호, 2007, pp.167-178.
5. 국토연구원, 민간투자사업의 운영관리비산정에 관한 연구: 유지관리비를 중심으로, 2001.
6. 박동천, 안재철, "유기계 건축 재료의 열화 성능 평가방법의 문제점 및 경시 변화를 고려한 수명 예측의 중요성에 관한 해석적 연구", 대한건축학회논문집, 제23권 제4호, 2007, pp.103-111.
7. 이광호, 옥창권, "굴현대교 강상판 쇄석매스틱아스팔트(SMA) 교면포장 시공사례", 도로학회지, 제2권 1호, 2000, pp.64-64.
8. 강민균, 이정훈, 이현중, 최지영, "장수명 아스팔트 포장용 고강성 혼합물의 실내 공용성 평가", 대한토목학회논문집, 제26권 제1호, 2006, pp.73-79.
9. 세종대학교, (주)SK, 한국건설기술연구원, 한양대학교, 장수명 아스팔트포장 공법 개발, 2006.
10. 정두희, "외국 강상판 교량의 교면포장 현황", 도로학회지, 제2권 제1호, 2000, pp.30-39.
11. 이정훈, 이현중, 박희문, 김인태, "아스팔트포장 잔존수명 예측 사례 연구", 한국도로학회논문집, 제10권 제2호, 2008, pp.1-13.
12. 한국도로공사 도로교통기술원, 포장 장기공용성 관측 구간을 활용한 현장 공용성 평가연구, 2006.
13. 심보현, 이홍철, 우성권, "LCC 분석에 기초한 UDpsc 교량의 유지관리비 예측에 관한 연구", 한국건설관리학회 학술발표논문집, 2006, pp.638-641.
14. 옥창권, 김진환, 서정혜, 안진홍, "강상판에 적용되는 아스팔트 교면포장 재료의 특성 연구", 한국도로학회 학술발표논문집, 2004, pp.185-189.
15. 한국도로공사 도로교통기술원, 아스팔트 교면포장의 내구성 증진을 위한 방수층 평가기준 및 강상판 설계기준 연구, 2005.
16. 김대수, 고분자 쇄석아스팔트(PSMA) 공법포장의 타당성 연구, 서울산업대학교 석사학위논문, 2007.
17. Ehlen, M. A. and Marshall, H. E., "The Economics of New-Technology Materials: A Case Study of FRP Bridge Decking", Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, 1996.
18. Jose Holguin-Veras, Comparative Assessment of AHP and MAV in Highway Planning, Journal of Transportation Engineering, vol. 121, No. 2, 1995.
19. Federal Highway Administration, Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design, FHWA-SA-98-079, 1998.
20. M. E. Nunn, A. Brown, D. Weston and J. C. Nicholls, Design of long-life flexible pavements for heavy traffic, TRL Report 250, Transport Research Laboratory, UK, 1997.

---

21. Berthelot, C. F., Sparks, G. A., Blomme, T., Kajner, L. and Nickeson, M., "Mechanistic-probabilistic vehicle operating cost model". Journal of Transportation Engineering, ASCE, 122(5), 1996, pp.337-341.

(접수일자 : 2011년 3월 15일)  
(수정일자 : 2011년 6월 21일)  
(심사완료일자 : 2011년 7월 12일)

---

## 요 지

LCC 분석은 비용평가만을 위한 개별적인 방법이 아닌 가치 개선을 위해 기능평가와 상호 연계되어 이루어지는 방법이다. 점차 LCC 분석의 정확성은 높아지고 있으나 비교적 최근에 개발·적용되어진 재료나 형식들에서는 공용기간이 확보되지 않아 여전히 유지관리 이력을 추정하기가 어려워 신뢰도가 떨어진다. 이런 배경으로 본 연구는 유지관리 프로파일을 설정하기 어려운 대안들에 대해서 기능적인 증감사항이 비용과 연계되어 분석되어지는 LCC 방법론을 제시하고자 한다. 최근 강상관 교면포장은 중차량과 교통량의 증가로 소성변형 등 문제점이 발생하여 기존의 포장을 대체할 수 있는 새로운 혼합물포장의 개발이 활발히 이루어지고 있다. SMA, Guss 및 PSMA 포장을 사례로 들어 대안 간에 비교된 성능척도가 상대평가계수로써 유지관리 프로파일 항목에 포함되어 LCC 분석이 이루어졌다.

**핵심 용어** : 교면포장, 생애주기비용, 성능척도, 상대평가법, 수명예측

---