

## 한국형 포장관리시스템을 활용한 장수명 아스팔트 포장의 경제성 분석

### Economic Analysis of Long-life Asphalt Pavements using KoPMS

도 명 식 Do, Myungsik  
권 수 안 Kwon, Sooahn  
백 중 은 Baek, Jongeun  
최 승 현 Choi, Seunghyun

정희원 · 한밭대학교 도시공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : msdo@hanbat.ac.kr)  
정희원 · 한국건설기술연구원 국가건설기준센터 센터장 (E-mail : sakwon@kict.re.kr)  
정희원 · 서울시청 도로포장연구센터 (E-mail : pocketdream@gmail.com)  
정희원 · 한밭대학교 도시공학과 박사과정 (E-mail : elflie@naver.com)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** Long-life asphalt pavements are used widely in developed countries. In order to be able to devise an effective maintenance strategy for such pavements, in this study, we evaluated the performance of the long-life asphalt pavements constructed along the national highways in South Korea. Further, an economic evaluation of the long-life asphalt pavements was performed based on a life-cycle cost analysis. We aimed to devise a model for evaluating the performance of long-life asphalt pavements using the national highway pavement management system (PMS) database as well as for analyzing the economic feasibility of such pavements, in order to promote their use in South Korea.

**METHODS :** The maintenance history and pavement performance data were obtained from the national highway PMS database. The pavement performances for a total of 292 sections of 10 lanes (5 northbound lanes and 5 eastbound lanes) of national highways were used in this study. Models to predict the performances of hot mix asphalt (HMA) and long-life asphalt pavements under two distinct traffic conditions were developed using a simple regression method. Further, the economic feasibility of long-life asphalt pavements was evaluated using the Korea Pavement Management System (KoPMS).

**RESULTS :** We developed service-life prediction models based on the traffic volume and the equivalent of single-axle load and found that long-life asphalt pavements have service lives 50% longer than those of HMA pavements. Further, the results of the economic analysis showed that long-life asphalt pavements are superior in terms of various economic indexes, including user cost, delay cost, total cost, and user benefits, even though their maintenance cost is higher than that of HMA pavements. A comparison of the economic feasibilities of the various groups showed that group A is superior to HMA pavements in all aspects except in terms of the maintenance criterion (crack 20% or higher) as per the NPV index. However, the long-life asphalt pavements in group B were superior in terms of the maintenance criterion (crack 25% or higher) regardless of the economic feasibility.

**CONCLUSIONS :** The service life of long-life asphalt pavements was found to be approximately 50% longer than that of HMA pavements, regardless of the traffic volume characteristics. The economic feasibility of long-life asphalt pavements was evaluated based on the KoPMS. The results of the economic analysis were the following: long-life asphalt pavements are exceptional in terms of almost all factors, such as user cost, delay cost, total cost, and user benefit; however, the exception is the maintenance cost. Further, the economic feasibility of the long-life asphalt pavements in group B was found to be better than that of the HMA pavements (crack 25% or higher).

#### Keywords

*Long-life asphalt pavement, Hot mix asphalt pavement, service life, life-cycle cost analysis, economic analysis, Korea Pavement Management System*

Corresponding Author : Do, Myungsik, Professor  
Dept. of Urban Engineering, Hanbat National University, 125,  
Dongseodae-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34158, Korea  
Tel : +82.42.821.1192 Fax : +82.42.821.1185  
E-mail : msdo@hanbat.ac.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received May, 12, 2016 Revised Aug, 03, 2016 Accepted Aug, 03, 2016

# 1. 서론

## 1.1. 연구배경

1990년대 이후 국내 산업의 발달과 함께 도로에서 차량 교통량이 증가하고, 폭염, 폭설, 폭우 등과 같은 이상기후로 인해 국내 아스팔트 포장에서는 소성변형(Rut depth)이 급격하게 증가하기 시작하였다. 이를 억제하기 위하여 내유동 포장과 같은 장수명(Long life) 포장공법을 도입하기 시작하였으며 1995년 양산-구포 고속도로에 신설포장으로 적용된 것을 시작으로 일반국도에는 2001년 37호선 보은지역과 2001년 5호선, 2003년 7호선 진영지역에 처음 적용되었다. 하지만 장수명 아스팔트 포장은 상대적으로 고가이며 일반아스팔트포장(HMA: Hot Mix Asphalt) 대비 공용성 및 경제성에 대한 검증이 이루어지지 않아 활성화되기에는 어려움이 있는 실정이다.

## 1.2. 기존연구

이에 국내에서는 장수명 포장의 활성화를 위해 다양한 연구들이 이루어져 왔으며 주로 실내시험, 포장가속시험, 초기 현장 공용성 평가 결과를 위주로 장수명 포장의 공용성 및 경제성을 평가하여 왔다.

먼저, 이정훈과 이현중(2006)은 일반국도와 고속도로를 대상으로 고탄성 아스팔트 기층 구조의 일반 및 장수명 포장에 대한 경제성 평가를 실시하였다. 분석 시에 일반 포장의 공용수명은 5년, 장수명 포장의 공용수명은 9년으로 가정하였으며 생애주기비용분석 결과, 장수명 포장이 일반국도에서는 28%, 고속도로에서는 37~44%의 비용절감 효과가 있음을 밝혔다. 도명식 등(2007)은 일반국도 22개 구간의 현장 공용성 자료를 대상으로 일반국도 도로포장관리에 활용하고 있는 HDM(Highway Development & Management)-4 모델을 활용하여 일반 포장과 내유동포장에 대한 공용성을 추정하였으며 이에 대한 경제성 평가를 수행한 결과 내유동 포장의 경제성이 뛰어난 것으로 나타났다.

김부일 등(2009)은 경제성 분석을 통하여 SBS개질 아스팔트 포장은 초기 시공비용이 10%정도 비싸지만 유지보수비용(Maintenance Costs)이 15%, 사용자비용은 74% 감소하는 것으로 나타나 SBS개질 아스팔트 포장을 적용할 경우 총 14.2%의 생애주기비용 감소효과가 있음을 밝혔다.

백종은 등(2015)은 일반국도 포장관리시스템(PMS: Pavement Management System)의 일반국도 현장조사 모니터링 데이터를 활용하여 장수명 아스팔트

포장에 대한 현장 공용성을 검증하였다. 장수명 포장이 적용된 43개 구간에 대한 현장 공용성 분석을 수행한 결과, 장수명 아스팔트 포장의 공용수명은 일반 아스팔트 포장의 공용수명에 비해 평균 50% 이상 향상하였음을 밝힌 바 있다.

한편, 해외 선진국의 경우 장수명 아스팔트 포장을 영구 포장(Perpetual Pavements) 개념으로 정의하여, 공용수명이 50년 이상이고 덧씌우기와 같은 구조적인 보수없이 주기적인 표층 보수만으로 사용할 수 있도록 설계하고 있다. Buchner et al(2000), Gupta et al(2014)은 기존의 포장 공용성 예측 모형에 반영된 외부 요인들의 특징들을 분석하였다. 분석 결과 포장 재료, 환경 요소, 교통량 등 포장의 공용성에 영향을 주는 외부 요인을 충분히 반영하지 못할 경우 그 예측에는 한계가 있음을 지적하였다.

Santero et al(2011)은 장수명 포장이 환경에 주는 영향을 분석하기 위해 장수명 포장에 대한 생애주기비용분석(LCCA : Life Cycle Cost Analysis)을 수행하였다. 차량 지체, 포장 유지보수 전략, 연료감소 등 다양한 측면에서 분석한 결과, 단기적인 관점이 아닌 장기적인 관점에서 바라볼 경우 장수명 포장을 적용하는 것이 바람직하다고 주장하였다.

Smith et al(2006)은 미국 위스컨신 주에 적용된 SMA(Stone Mastic Asphalt) 덧씌우기 포장의 현장 적용성을 포장관리시스템 자료를 바탕으로 평가하였다. SMA 덧씌우기 포장이 아스팔트 포장의 보수에 사용된 경우 일반 아스팔트 덧씌우기에 비해 공용수명이 약 9.5% 증가하고, 생애주기비용은 11.4% 감소하는 것으로 나타났다.

이와 같이 기존의 연구들은 경제성 분석 시 초기년도의 현장 공용성 자료를 기반으로 하여 포장의 공용수명을 산출하거나 포장공용수명의 가정을 통한 경제성 분석이 주로 이루어져 왔으며, 장기간의 현장 공용성 자료를 근거로 하는 경제성 분석에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

## 1.3. 연구목적

본 연구에서는 먼저, 일반국도 포장관리시스템의 포장 모니터링 자료를 기반으로 일반 및 장수명 아스팔트 포장에 대한 공용수명 예측모형을 제시하고자 한다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서는 1) 국도 포장관련 데이터(유지보수 이력, 보수비용, 재질 등)와 교통량관련 데이터(교통량, 환산축하중(ESAL) 등)의 DB

구축, 2) 장수명 포장과 일반 포장의 공용성 모형 개발, 3) 유지관리 비용과 이용자 비용, 편익 등 경제성 분석, 4) 시뮬레이션 분석을 통한 비교 분석을 수행하였다. 여기서, 공용수명 예측모형을 이용한 일반 포장과 장수명 포장의 경제성 분석을 위해 기존의 연구 성과인 한국형 포장 관리 시스템 (KoPMS: Korea Pavement Management System)을 활용하였다.

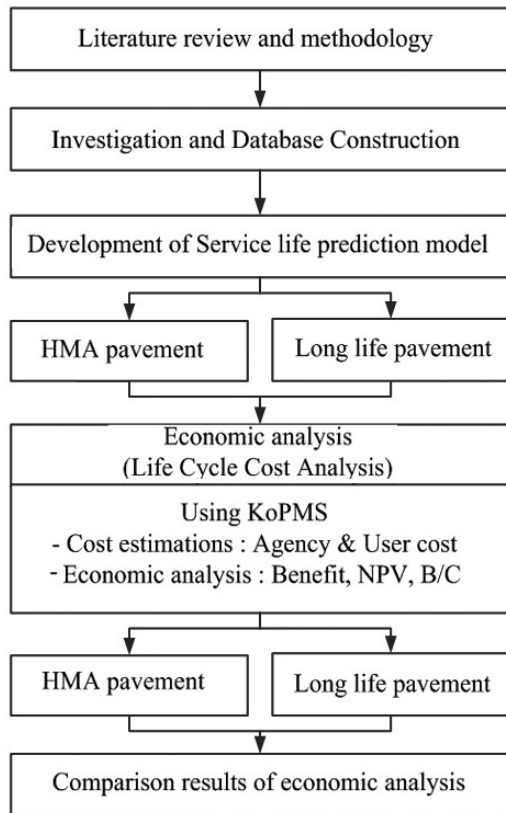


Fig. 1 Procedure of This Study

## 2. 공용수명 예측모형 개발

### 2.1. 대상구간의 선정

포장의 공용수명은 크게 두 가지 방법으로 추정할 수 있다. 첫 번째는 과거 유지보수이력 자료로부터 공법별, 조건별 보수주기(또는 공용수명)를 결정하는 것이다. 이러한 방법은 실제 현장에서 이루어진 보수주기로부터 측정된 것이므로 참값이라고 할 수 있다. 하지만 유지보수이력의 부재 또는 공용기간이 길지 않은 경우에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 두 번째는 공용성능 모델을 통하여 공용성능 인자가 유지보수기준에 도달할 때까지의 기간으로 추정하는 방법이다. 이 방법을 적용하기 위해서는 해당 구간의 포장상태를 정기적으로 조사한 데이터가 필요하게 되며 공용성능 모델에 근거하여 공용

수명을 추정하는 예측 값이라고 할 수 있다.

장수명 포장의 경우 대부분 2000년대 중반에 적용되어서 첫 번째 방법론을 활용한 공용수명 예측모형 개발에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 두 번째 방법론을 이용하여 일반국도 PMS 모니터링 DB의 포장상태 자료를 기반으로 장수명 포장의 공용수명 예측모형을 개발하였다.

일반국도 포장관리시스템에서는 국토교통부에서 관리하는 일반국도(11,322km)중 2,341km에 대해 2007년부터 매년 동일지점의 포장상태를 모니터링하고 있다. 본 연구에서는 이 중 연장이 긴 남북방향 노선 5개(1, 3, 5, 7, 31호선)와 동서방향 5개 노선(2, 4, 6, 24, 34호선)에 대한 자료를 사용하였다.

### 2.2. 일반/장수명 포장의 공용수명 예측모형 개발

현재 일반국도 포장관리시스템에서는 균열률과 소성변형(Crack rate & Rut depth) 지표를 기준으로 유지보수공법과 유지보수시기, 즉 포장의 수명을 예측하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 일반포장과 장수명포장의 공용수명예측을 통한 경제성분석을 수행하는 것이 목적 이므로 의사결정 과정에 영향을 미치지 않는 중단평탄성(IRI: International Roughness Index)지표를 제외한 균열률과 소성변형지표만을 대상으로 공용수명 예측모형을 개발하였다.

일반국도 포장의 공용성능(수명)에 미치는 외부 요인은 다양하지만 그 가운데에서 교통 조건이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서도 대상구간의 교통 특성(교통량, 환산축하중)을 고려한 한국형 포장관리시스템에서의 군집분류 기준을 활용(도명식 등, 2014)하였으며 군집별 구간 수는 Table 1과 같다.

Table 1. Results of Cluster Analysis

	ESAL (veh/day/lane)	AADT (veh/day/lane)	Number of section	
			HMA	Long life
1 <sup>st</sup> Cluster (Group 1)	410 below	4,950 below	206	15
2 <sup>nd</sup> Cluster	410 below	4,950 above	8	-
3 <sup>rd</sup> Cluster	410 above	4,950 below	32	3
4 <sup>th</sup> Cluster (Group 2)	410 above	4,950 above	22	6

먼저, 1군집은 총교통량과 환산축하중이 모두 작은 경우로 중요도가 상대적으로 낮은 국도이고, 반면에 4

군집은 총교통량과 환산축하중이 모두 큰 간선도로를 의미한다. 본 연구에서는 4개 군집 중 교통량 특성이 다른 1군집(1그룹)과 4군집(2그룹)을 대상으로 하였으며 2군집, 3군집의 경우 해당 군집 내의 구간 수가 부족하여 본 분석에서는 제외하였음을 밝힌다. 여기서 대상구간에 적용된 장수명 포장공법은 SMA, PMA(Polymer Modified Asphalt), SRA와 같은 내유동 포장으로 나타나 본 연구에서 일컫는 장수명 포장 또한 내유동 포장 공법으로 정의하고자 한다.

앞에서 언급한 바와 같이, 장수명 포장의 경우 현장에 적용된 사례도 적을 뿐만 아니라 기간도 짧아 객관적인 공용성 모델을 구축하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 표본의 크기가 증가함에 따라 파라미터의 추정값이 참 값에 근접하는 대표본 이론(large-sample theory)을 이용하여 대상 구간에 대한 연간 파손량을 추정하였다.

구체적으로는 매 연도별 악화량을 독립이라 가정하고 포장의 상태가 역전이 되는 경우를 제외하고 가능한 한 많은 데이터 조합을 구하여 연간 파손량을 추정하였다. 즉, 신설(혹은 유지보수) 이후 4년이 경과된 포장구간의 경우 1년 경과된 포장상태 데이터 4개, 2년 경과된 데이터 3개, 3년 경과된 데이터와 4년 경과된 데이터 각각 2개와 1개를 얻을 수 있다(도명식 등, 2014). 이러한 방법으로 일반 포장이 적용된 228개 구간과 장수명 포장이 적용된 21개 구간에서 각 구간의 유지보수 이력을 적용하여 그룹별로 공용년수에 따른 연간 파손량을 도출하였다.

Table 2. Number of Data Set

Classification		Crack rate	Rut depth
Group 1	Sample data	Long life	411
		HMA	4,786
	Valid data	Long life	141 (34%) 77 (19%)
		HMA	610 (13%) 683 (12%)
Group 2	Sample data	Long life	154
		HMA	568
	Valid data	Long life	30 (20%) 28 (18%)
		HMA	58 (10%) 50 (9%)

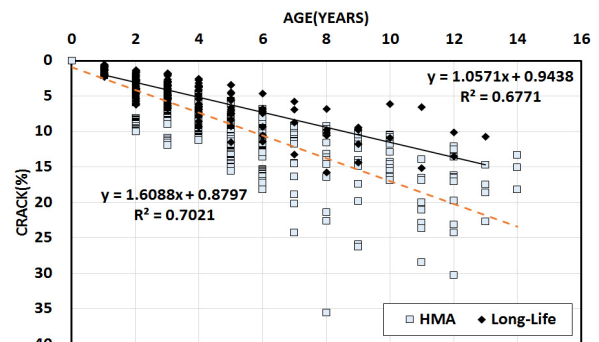
Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 전년도에 비해 포장의 파손량이 감소하는 경우를 이상치로 간주하였으며 그룹별, 포장종류별로 차이는 있으나 최소 9%에서 최대 34%의 유효데이터를 얻을 수 있었다.

일반/장수명 포장의 공용수명 예측모델을 개발하기

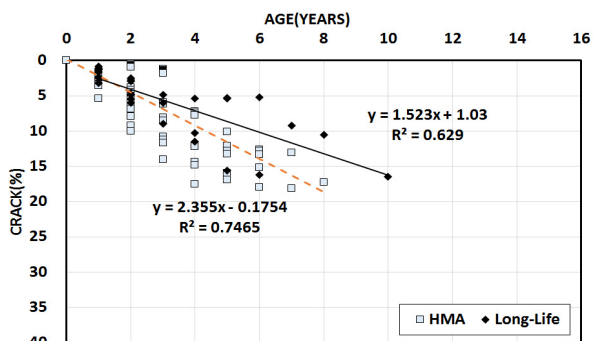
위하여 3가지 종류의 함수를 고려하였다. 먼저, 지수함수는 포장상태지표의 급격한 증가 현상을 효과적으로 설명할 수 있으며, S형 함수는 포장상태지표가 공용기간 후반에 더 이상 증가하지 않는 경향을 나타내기에 적합하다. 이와 같이, 지수 및 S형 함수와 같은 비선형 모델의 경우 충분한 수의 자료가 있을 경우에는 보다 정확하게 포장상태지표를 예측할 수 있는 장점이 있다. 하지만 본 연구 대상인 장수명 포장의 경우 공용기간이 길지 않아 지수 함수를 사용할 경우 공용수명을 과소평가할 수 있고, S형 함수를 사용할 경우 과대평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 선형 함수를 이용하여 공용수명 예측모델을 개발하였다.

Fig. 2는 단순회귀분석 모델을 적용하여 포장상태지표별로 일반포장과 장수명 포장의 공용수명 예측모델을 나타내고 있다. Fig. 2를 통해 동일한 교통특성을 보이는 그룹에서 일반 포장의 연간 악화량(Crack&Rut)이 장수명 포장에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. 나아가 동일한 포장재료일지라도 상대적으로 교통량과 환산축하중이 큰 2그룹에서의 악화량이 1그룹에 비해 큰 것으로 나타났다.

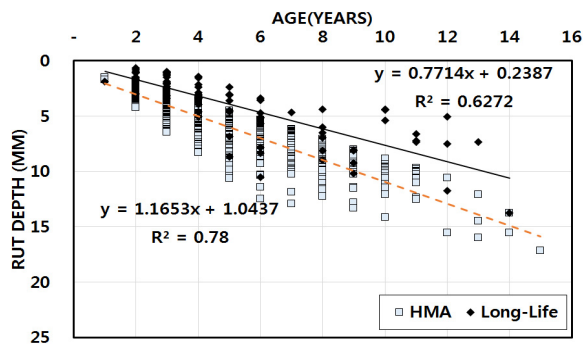
교통량 특성 그룹별 포장 재료별 회귀모형의 설명력(R-squared)은 최소 0.54에서 최대 0.78로 나타났으며, 상대적으로 적은 샘플을 기반으로 한 모형의 한계에도 불구하고 전체 평균은 0.69로 실제 현장 데이터를 적용한 것을 감안할 경우 유의미한 설명력을 보인다고 판단된다.



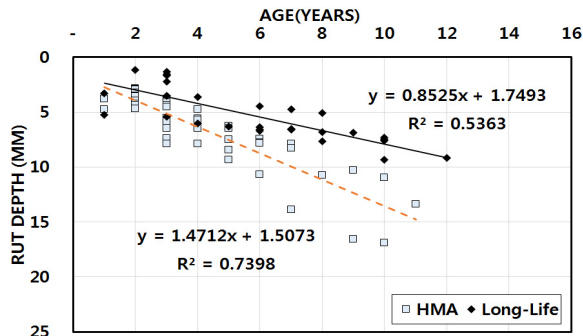
(a) Crack Model - Group 1



(b) Crack Model - Group 2



(c) Crack Depth Model - Group 1



(d) Crack Depth Model - Group 2

Fig. 2 Pavement Service Life Prediction Model

### 2.3. 공용수명 예측모델을 통한 공용수명의 추정

일반 및 장수명 포장의 공용수명은 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 시간의 경과에 비례해서 포장상태가 나빠지며 일정 기준에 도달할 때까지의 공용기간으로 정의할 수 있다. 먼저, 균열률의 경우 15~30% 범위에서 일반 및 장수명 포장의 공용수명을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Service Life Prediction by Crack Rate Regression Model

(unit : year)

Group	Pavement type	Crack rate criteria (%)			
		15	20	25	30
1	HMA	6.9	11.9	15	18.1
	Long-life	10.5	18.0	22.8	27.5
2	HMA	5.1	8.4	10.4	12.4
	Long-life	7.2	12.5	15.7	19

여기서, 일반국도 포장관리시스템에서의 유지보수 기준인 균열률 30%에 대하여 내유동 포장공법을 기준으로 공용수명을 비교한 결과 1그룹 일반 포장이 18.1년, 장수명 포장이 27.5년, 2그룹 일반 포장이 12.4년, 장수명 포장이 19년으로 나타났다.

또한, 소성변형의 경우 10~25mm 범위에서 일반 및

장수명 포장의 공용수명을 Table 4에 나타내었다. 일반국도 포장관리시스템에서의 유지보수 기준인 소성변형 15mm를 기준으로 공용수명을 비교한 경우 1그룹 일반 포장이 11.8년, 장수명 포장이 19.2년, 2그룹 일반 포장이 8.7년, 장수명 포장이 15.8년으로 나타났다.

Table 4. Service Life Prediction by Rut Depth Regression Model

(unit : year)

Group	Pavement type	Rut depth criteria (mm)			
		10	15	20	25
1	HMA	7.5	11.8	16.1	20.4
	Long-life	12.7	19.2	25.7	32.2
2	HMA	5.3	8.7	12.1	15.5
	Long-life	10.0	15.8	21.7	27.6

이와 같이 균열률을 기준으로 약 41~53%, 소성변형을 기준으로 약 62~82% 정도 일반 포장에 비해 장수명 포장의 공용수명이 향상된 것으로 나타나 소성변형에 대한 내구성 개선효과가 큰 것으로 나타났다.

하지만, 그룹별/포장 재질별 공용수명 추정 값은 개별 예측모델을 사용하였을 경우에 산정되는 값이며 실제 유지보수 시기의 결정은 두 지표 가운데 최소기준에 먼저 도달하는 지표를 기준으로 결정됨을 유념해야 할 것이다.

## 3. 장수명 포장의 경제성 분석

### 3.1. 경제성 분석 모델 개발

일반 포장과 장수명 포장의 경제성 분석을 위해 관리자 비용과 이용자 비용으로 구분하여 비용편익분석을 수행하였다. 먼저, 관리자 비용은 도로포장상태에 따라 포장공법이 결정되므로 공용성 모형을 이용하여 시간의 경과에 따른 도로포장상태를 예측하여 유지보수공법을 결정하고, 이를 해당기간 연장과 기준단가를 적용하여 비용을 산정하였다. 여기서, 포장의 유지보수 기준 및 단가는 2013년도 일반국도 포장관리시스템의 의사결정 자료를 기준으로 일반 포장은 5AC(절삭+5AC), 장수명 포장은 내유동(절삭+내유동)공법의 단가 및 유지보수기준을 적용하였다(Table 5).

Table 5. Speed Prediction Models on PCI

PCI	Speed prediction model	R-squared
IRI	$y = -2.6969x + 103.04$	0.45

PCI: Pavement Condition Index

이용자 비용은 객관성을 확보하기 위해 정부에서 발간된 지침인 국토교통부(2013)의 「교통시설 투자평가지침서」에서 제시하고 있는 편익항목 중 차량운행비용과 통행시간비용을 적용하였다. 여기서 이용자비용(User Costs)의 산정을 위해서는 포장상태 악화에 따른 속도의 변화량이 고려되어야 하며, 본 연구에서는 한국형 의사결정시스템(KoPMS)에 적용된 포장상태기반의 속도 변화 모델을 적용하였다(도명식 등, 2014).

나아가, 본 연구에서는 유지보수 공사로 인한 지체비용(Delay Cost)의 산정을 위해 이주호(2001)가 제시한 도로 유지보수 시의 일반국도 지체모델 산정 식을 활용하였다. 지체시간의 산정을 위해서는 구간에 900pcphpl (passenger car per hour per lane) 이상의 유입교통량이 발생하는 경우이며, 공사시간은 주간공사 시간대(09~17시)를 대상으로 비용을 산정하였다. 시간별 교통량은 교통량 정보 제공 시스템(TMS : Traffic Monitoring System)에서 제공하는 일반국도의 시간별 교통량 자료를 활용하였다.

$$T = 0.424 \times Q + 0.003 \times L - 785.291 \quad (1)$$

여기서,  $T$  = 공사에 따른 지체시간(sec)

$Q$  = 유입 교통량(pcphpl)

$L$  = 공사구간연장(km)

경제성 분석을 위한 이용자 편익(User benefit)은 적절한 시점에 유지보수가 시행된 경우와 시행되지 않은 경우의 이용자 비용의 차이를 편익으로 간주하였다(Peshkin et al., 2004; 도명식 등, 2013). 본 연구에서는 일반 포장의 공용수명 예측모델을 기준으로 아무런 유지보수를 시행하지 않을 경우(do-nothing)를 기본 대안으로 설정하였으며, 이를 토대로 유지보수 기준 및 포장 유형( $alt$ )에 따른 이용자 비용의 차이를 편익으로 산정하였다.

$$User\ Benefit = UC_{do-nothing} - UC_{alt} \quad (2)$$

여기서,  $i$  = 포장유형 (1:일반 포장, 2:장수명 포장)

한편 본 연구에서는 국도 포장관리를 위해 개발된 한국형 포장관리시스템(KoPMS)을 이용하여 장수명 포장의 경제성 분석을 수행하였으며, Visual Basic으로 작성된 KoPMS S/W는 특정 구간을 대상으로 생애주기비

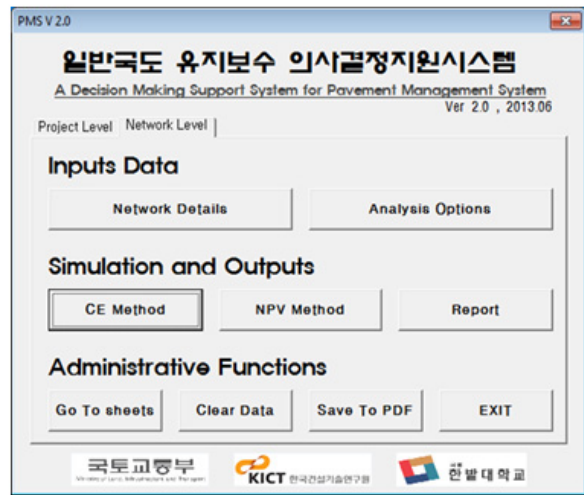


Fig. 3 KoPMS Main Switch Board

용 분석이 가능한 개별사업수준 분석과 유지보수 대상 구간들 중 경제성 분석을 통한 유지보수 우선순위의 결정을 위한 도로망 수준 분석으로 나눌 수 있다. 그 외 각 세부모형들에서 도출되는 결과물들을 조합하여 다양한 연구목적으로도 활용이 가능하지만 구체적인 개발환경과 응용에 대한 설명은 지면상 생략하기로 한다(도명식 외, 2013; 도명식 외, 2014).

### 3.2. 분석 대상 구간 및 시나리오

본 절에서는 장수명 포장과 일반 포장의 공용수명 예측모델을 한국형 포장관리시스템(KoPMS)에 접목하여 개별사업 수준(Project Level)에서의 경제성 분석을 수행하였다. 경제성 분석을 위한 대상구간은 2013년도의 일반국도 포장 모니터링 조사구간 중 공간적인 위치와 교통량 크기 등의 객관성을 고려하여 A그룹 4구간, B그룹 4구간 총 8개 구간을 선정하였으며 대상 구간의 포장상태 및 교통량 정보는 Table 6과 같다.

Table 6. Road Characteristics for Analysis

Group	ID	Length (km)	Pavement condition			Traffic	
			Crack rate (%)	Rut depth (mm)	IRI (m/km)	AADT (veh/day/ lane)	ESAL (veh/day/ lane)
A	A1	1	2.13	8.96	1.96	3,913	247
	A2	1	13.53	7.48	1.96	2,080	191
	A3	1	0.17	8.06	2.10	4,688	348
	A4	1	1.23	13.76	2.53	3,679	223
B	B1	1	1.01	6.80	2.26	8,662	530
	B2	1	5.89	7.33	1.82	8,844	890
	B3	1	5.77	9.33	1.91	7,428	897
	B4	1	16.51	7.48	3.14	6,674	904

생애주기비용분석(LCCA)을 위한 분석기간은 50년, 할인율은 5.5%로 설정하였으며 시나리오 분석을 위한 유지보수 대안은 일반 포장과 장수명 포장공법으로 설정하였고, 각 구간을 유지보수 직후의 도로포장상태로 가정하여 생애주기비용분석을 수행하였으며, 초기 시공 비용은 각 포장의 1회의 유지보수 비용으로 간주하였다.

Table 7. Criterion of Economic Analysis

Classification		Criterion	
Period		50years	
Cost (One million won/9,000m <sup>2</sup> )	HMA	Initial construction cost	123
		5AC	123
		Cutting+5AC	131
	Long life	Initial construction cost	166
		Rut-resistance	166
		Cutting+Rut-resistance	202
Discount rate		5.5%	

본 연구에서는 일반국도 포장관리시스템에서의 소성 변형 유지보수 기준인 15mm를 기준으로 다양한 균열률 조건(10~30%)을 고려하여 시나리오를 설정하였다. 예를 들어 시나리오 1번의 경우 소성변형 15mm 또는 균열률 10%가 유지보수 기준으로 적용되어지며 A그룹, B 그룹 각 4개 구간에 대하여 일반 포장을 적용하는 경우와 장수명 포장을 적용하는 경우에 대한 생애주기비용 분석이 이루어지게 된다. 이는 동일한 유지보수 기준에서의 일반 포장과 장수명 포장의 경제성을 직접적으로 비교하기 위함이다.

Table 8. Analysis Scenario

Scenario	Maintenance criteria		Group	Pavement type
	Rut-depth (mm)	Crack rate (%)		
1	15	10	A and B	HMA/Long life
2	15	15		
3	15	20		
4	15	25		
5	15	30		

### 3.3. 경제성 분석 결과

#### 3.3.1. 시나리오 분석 예시

Fig. 4는 5번 시나리오에 대한 A그룹과 B그룹 구간의 생애주기비용 분석 결과를 나타낸 것이다. 5번 시나리오는 소성변형 15mm & 균열률 30%을 유지보수 기준으로 하는 시나리오로, 두 그룹 모두 소성변형지표에 의

해 유지보수가 이루어지며 분석 초기년도에 초기시공비용이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 일반 포장의 유지보수 시기는 장수명 포장에 비해 빠른 것으로 나타났으며 나아가 포장유형에 상관없이 교통량이 상대적으로 적은 A그룹 구간은 B그룹 구간에 비해 포장의 악화속도가 상대적으로 느리므로 B그룹에 해당되는 구간이 먼저 유지보수가 시행되는 것을 확인할 수 있다.

이용자비용의 추이를 살펴보면, 상대적으로 교통량이 많은 B그룹 구간에서의 이용자비용이 큰 것으로 나타났으며, 유지보수가 시행될 경우 이용자 비용이 하한 값으로 감소하게 되며 다시 포장상태가 악화될 경우 이용자 비용도 점차 증가하는 추세가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

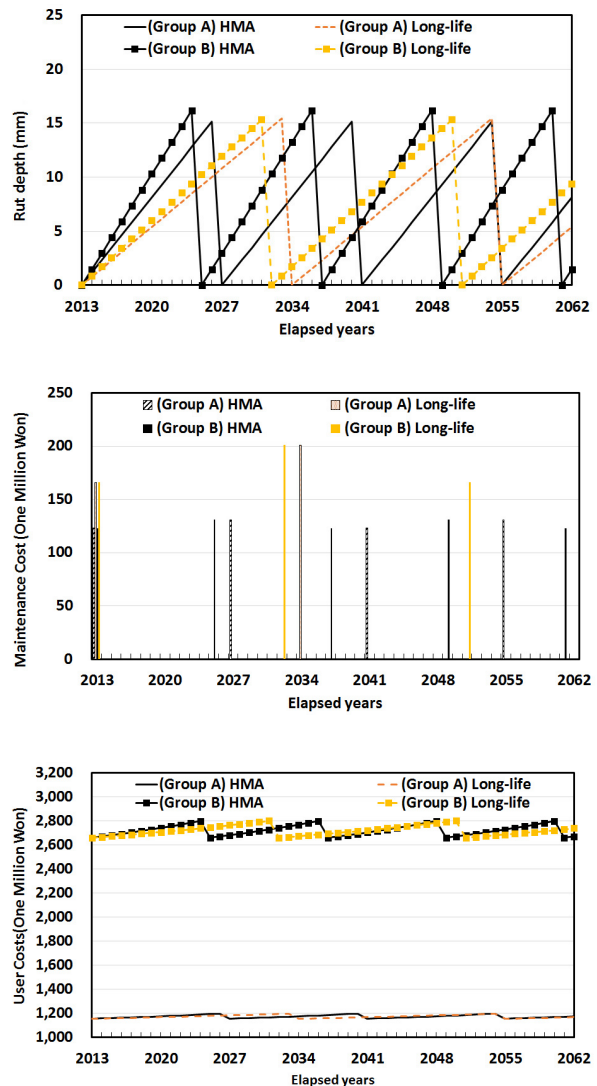


Fig. 4 Example of Scenario Analysis

#### 3.3.2. 시나리오 분석 종합

Table 9는 각 구간별 경제성 분석 결과를 요약한 것

Table 9. Economic Analysis Summary

(Unit : One Million won)

Classification			Costs				User benefits	Economic index		
	Maintenance criteria	Pavement type	Maintenance cost	User costs	Delay cost	Total costs		NPV	B/C	
A Group	15mm-10%	HMA	340.8	19,107.5	-	19,448.3	935.5	594.7	2.7	
		Longlife	367.5	19,089.8	-	19,457.3	953.2	585.7	2.6	
	15mm-15%	HMA	265.0	19,170.9	-	19,435.8	872.1	607.2	3.3	
		Longlife	285.5	19,151.9	-	19,437.4	891.1	605.6	3.1	
	15mm-20%	HMA	223.3	19,234.5	-	19,457.8	808.5	585.2	3.6	
		Longlife	246.5	19,203.5	-	19,450.1	839.5	592.9	3.4	
	15mm-25%	HMA	223.3	19,251.7	-	19,475.0	791.3	568.0	3.5	
		Longlife	241.2	19,226.4	-	19,467.5	816.6	575.5	3.4	
	15mm-30%	HMA	223.3	19,251.7	-	19,475.0	791.3	568.0	3.5	
		Longlife	241.2	19,230.5	-	19,471.6	812.5	571.3	3.4	
	B Group	15mm-10%	HMA	430.9	43,375.7	363.0	44,169.7	2,716.1	2,285.2	6.3
			Longlife	476.6	43,314.6	288.0	44,079.2	2,852.2	2,375.6	6.0
15mm-15%		HMA	340.8	43,532.9	288.0	44,161.7	2,634.0	2,293.1	7.7	
		Longlife	367.5	43,447.2	224.8	44,039.5	2,782.9	2,415.4	7.6	
15mm-20%		HMA	279.9	43,697.9	237.2	44,215.0	2,519.7	2,239.8	9.0	
		Longlife	295.7	43,622.7	183.6	44,102.0	2,648.5	2,352.9	9.0	
15mm-25%		HMA	251.8	43,855.0	213.8	44,320.7	2,386.0	2,134.2	9.5	
		Longlife	258.6	43,750.7	161.3	44,170.6	2,542.9	2,284.3	9.8	
15mm-30%		HMA	251.8	43,855.0	213.8	44,320.7	2,386.0	2,134.2	9.5	
		Longlife	252.3	43,788.2	157.6	44,198.2	2,509.0	2,256.7	9.9	

이다. 먼저, 전체적인 분석결과를 살펴보면, 교통량 그룹과 유지보수 기준에 상관없이 장수명 포장의 유지보수 비용이 일반 포장에 비해 다소 고가인 것으로 나타났다. 이는 장수명 포장의 초기 시공비용이 일반 포장에 비해 약 35%정도 고가인 탓으로 해석된다.

이용자비용 분석결과를 살펴보면, 유지보수 기준 및 그룹에 상관없이 장수명 포장을 적용한 경우의 이용자 비용이 다소 적은 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 적용한 한국형 포장관리시스템의 이용자비용 산정모델이 도로포장의 상태를 기반으로 비용을 산정하기 때문이다. 공용수명 예측모델에서도 살펴본 바와 같이 일반 포장에 비해 장수명 포장의 파손속도가 상대적으로 느리기 때문에 도로 이용자들은 상대적으로 양호한 상태의 도로를 이용하게 되며 이로 인해 이용자들이 부담해야 하는 비용이 상대적으로 적기 때문으로 판단된다.

지체비용의 분석결과를 살펴보면, A그룹의 경우 도로를 이용하는 이용자가 적어 지체비용이 발생하지 않지만 상대적으로 이용자가 많은 B그룹에서는 지체비용이 발생한 것으로 나타났으며 장수명 포장을 적용할 경우 지체비용이 약 30% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이

는 분석 기준에 상관없이 장수명 포장을 적용할 경우 상대적으로 유지보수 횟수가 적어 이용자가 겪는 불편(지체시간)이 줄어들기 때문으로 판단된다.

한편 A그룹의 총 비용을 살펴보면, 유지보수 기준이 높은 경우(15% 이하) 일반 포장이 장수명 포장에 비해 총 비용이 적은 것으로 나타났다. 이는 이용자비용의 차이보다 유지보수비용의 차이가 상대적으로 크기 때문이며 유지보수 기준이 낮은 경우(20% 이상)에서는 장수명 포장이 총비용(Total Costs)측면에서 유리한 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 유지보수비용이 고가임에도 불구하고 이용자비용, 지체비용이 상대적으로 적게 발생되어 총 비용 측면에서 장수명 포장이 유리한 것으로 판단된다.

이용자편익을 살펴보면, 그룹 및 유지보수 기준에 상관없이 일반 포장에 비해 장수명 포장의 이용자편익이 상대적으로 큰 것으로 나타났는데, 이는 장수명 포장을 적용한 구간의 이용자들이 양호한 상태의 도로를 이용하는 기간이 상대적으로 길기 때문으로 그만큼 이용자가 받는 편익(benefit)이 크다는 것을 의미한다.

분석 결과를 종합해보면, 유지보수 시나리오 및 교통



량 그룹에 상관없이 유지보수비용 측면에서는 장수명 포장에 비해 상대적으로 고가이지만, 이용자비용, 지체비용, 총비용, 이용자편익 측면에서는 상대적으로 장수명 포장에 비해 유리한 것으로 나타났다.

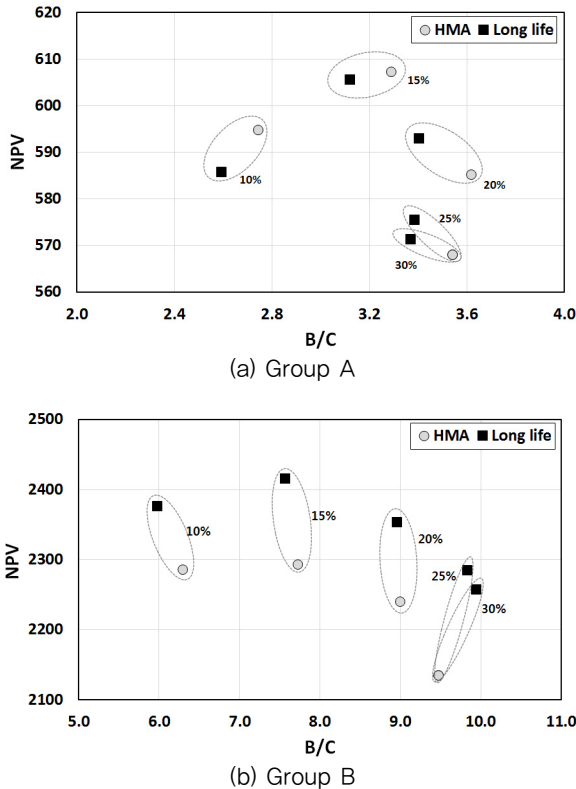


Fig. 5 Comparison between NPV and B/C

경제성 지표의 경우 Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 교통량이 상대적으로 적은 A그룹에서는 유지보수 기준이 높은(15% 이하) 경우에 일반포장이 상대적으로 우월하지만 유지보수 기준이 낮은(20% 이상) 경우의 비용편익비(B/C)는 일반포장이 우월하며 순현재가치(NPV)는 장수명 포장에 우월한 것으로 나타났다. 한편 B그룹에서는 유지보수 기준이 높은 경우의 비용편익비(B/C)는 일반포장이 우월하며 순현재가치는 장수명 포장에 우월하지만 유지보수 기준이 낮은 경우(25% 이상)에는 B/C와 순현재가치 모두 장수명 포장에 우월한 것으로 나타났다.

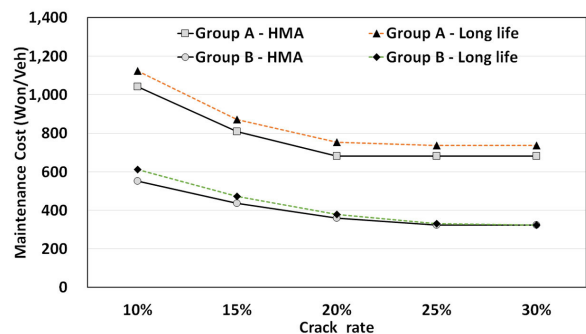
따라서 교통량이 적은 구간에서는 너무 높은 유지보수 기준을 적용하는 경우 장수명 포장에 상대적으로 불리하며, 교통량과 중차량이 많은 구간에서 유지보수 기준이 균열률 25% 이상이 적용될 경우에는 장수명 포장에 모든 경제성 지표에서 유리한 것으로 나타났다. 이는 향후 국토 유지보수 공법의 결정에 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.3.3. 차량 1대당 비용 원단위 비교

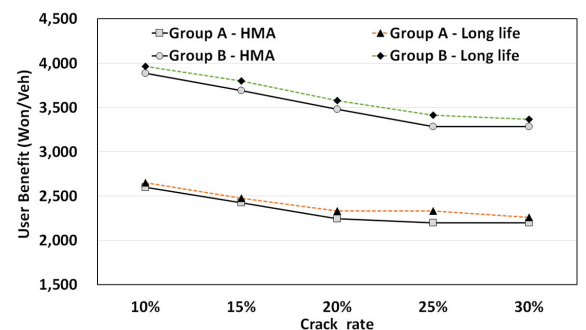
Fig. 6에는 유지보수비용과 이용자편익을 차량 1대당 비용으로 환산하여 나타내었다. 먼저, 유지보수 기준이 낮아질수록 차량 1대당 유지보수 비용은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 차량 1대당 부담해야 하는 유지보수 비용을 비교할 경우 교통량이 많은 B그룹 구간에 비해 교통량이 적은 A그룹 구간의 이용자가 상대적으로 많은 유지보수비용을 부담해야 하는 것으로 나타났다.

반면, 편익의 경우에는 균열이 심해질수록(유지보수 기준이 낮아질수록) 이용자의 편익은 교통량의 크기에 상관없이 감소하는 것을 알 수 있다. 나아가 차량 1대당 얻을 수 있는 이용자편익은 장수명 포장을 적용한 경우의 편익이 일반 포장에 비해 큰 것으로 나타났다. 이는 일반포장의 포장과손속도가 장수명포장에 비해 상대적으로 빠르기 때문으로 판단된다.

유지보수 후의 동일한 시기라고 가정할 경우 장수명 포장의 포장상태가 일반 포장에 비해 양호하며 이 시기에 이용자가 부담해야 할 사회·환경비용이 상대적으로 많기 때문에 판단된다. 또한, 교통량이 적은 A그룹 구간에 비해 교통량이 많은 B그룹 구간의 편익이 큰 것으로 나타났다. 이는 통행시간비용, 차량운행비용 등 이용자비용의 원단위가 상대적으로 고가인 중차량의 비율이 A그룹 구간에 비해 B그룹이 크기 때문으로 판단된다.



(a) Maintenance Cost



(b) User Benefit

Fig. 6 Maintenance and User Benefit Per Vehicle

#### 4. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 일반국도 포장관리시스템의 모니터링 D/B자료를 이용하여 일반 포장과 장수명 포장의 공용수명 예측모델을 개발하였으며, 이를 한국형 포장관리시스템에 접목하여 일반 포장과 장수명 포장에 대한 경제성 분석을 수행하였다.

공용수명예측모델의 개발을 위해 교통 특성을 기준으로 A그룹과 B그룹으로 구분하여 균열률, 소성변형지표에 대한 공용수명 예측모델을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

먼저, 공용수명 예측모델을 통해 일반 포장과 장수명 포장의 공용수명을 예측한 결과, 균열률지표를 기준으로 약 41~53%, 소성변형지표를 기준으로 약 62~82% 정도 장수명 포장의 공용수명이 향상되었으며 소성변형지표에 대한 내구성이 우수한 것으로 나타났다. 또한, 교통량과 환산축하중이 적은 A그룹에 비해 교통량과 환산축하중이 많은 B그룹의 포장악화속도가 약 1.2~1.4 배 큰 것으로 나타났다.

나아가, 한국형 포장관리시스템의 경제성분석 모델을 활용하여 동일한 조건 아래에서 일반 포장과 장수명 포장에 대한 경제성분석을 수행하였으며, 분석 결과는 다음과 같다.

먼저, 유지보수비용 측면에서는 장수명 포장이 일반 포장에 비해 상대적으로 고가이지만 이용자비용, 지체비용을 포함하는 총 비용측면에서는 약 0.2%, 이용자편익 측면에서는 약 4.1% 수준에서 장수명 포장이 일반 포장에 비해 우월한 것으로 나타났다.

또한, 경제성지표 측면에서는 교통량이 적은 구간(A 그룹)에서는 너무 높은 유지보수 기준(균열률 15% 이하)을 적용하는 경우 장수명 포장이 일반포장에 비해서 상대적으로 불리하며, 교통량이 많은 구간(B그룹)에서는 유지보수 기준이 균열률 25% 이상을 적용할 경우 장수명 포장이 모든 경제성 지표에서 일반포장에 비해 상대적으로 유리한 것으로 나타났다.

다만 본 연구에서는 일부 구간 자료 및 균열률과 소성변형지표만을 활용한 공용수명 예측모델의 개발을 통해 일반 포장과 장수명 포장의 경제성을 분석하였다는 한계가 있음을 밝히며, 향후 연구로는 종단평탄성 지표에 대한 공용수명예측모델의 개발 및 다양한 종류의 장수명 포장구간을 공법별로 구분하여 공용성 및 경제성 분석에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 교통특성 이외에 기온, 강수량, 기후조건과 같은 다양한

여건이 고려된 포장의 공용성 평가를 통해 더욱 현실적인 경제성 분석이 필요하다고 판단된다.

#### REFERENCES

- Baek, Jongeun, Lim, J., Kwon, S. and Kwon B., 2015. Performance Evaluation of Long-Life Asphalt Concrete Overlays Based on Field Survey Monitoring in National Highways, *Int. Journal of the Highway Engineers*, Vol. 17. No. 3. 69-76.
- Buchner, M., Newcomb, D., and Huddleston, J., 2000. Perpetual Pavements, *Asphalt: The Magazine of the National Asphalt Institute*, Vol. 15, No. 3.
- Do, Myungsik, Han, D., Lee, J. and Lee, Y., 2007. Economic Evaluation for Road Pavement Maintenance by using HDM, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*. Vol. 27. No. 3D. 311-323.
- Do, Myungsik, Kwon, S., Choi, S., 2013. Methodology for Benefit Evaluation according to Maintenance Method and Timing of National Highway Pavement Section, *J. of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15. No. 5. 91-99.
- Do, Myungsik, Kwon, S., Lee, S. and Kim, Y., 2014. Development of the Decision-Making System for National Highway Pavement Management, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34. No. 2. 645-654.
- Gupta, A., Kumar, P. and Rastogi, R., 2014. Critical Review of Flexible Pavement Performance Models, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 18. No. 1. 142-148.
- Kim, Booil, Lee, M., Jeon, S. and Kim, S., 2009. Cost-effectiveness Analysis on Fiber Reinforced Asphalt and Polymer Modified Asphalt Pavement Using Falling Weight Deflectometer, *J. of Korean Society of Road Engineering*, Vol. 11. No. 4. 153-160.
- Lee, Jooho, 2001. Study on the traffic flow characteristic analysis and applicability of work zones, *Thesis of Doctor Degree, Dae-Gu University*.
- Lee, Junghun, and Lee, H., 2006. Development of Long-life Asphalt Pavement Method with Application of High Rigid Base Material, *J. of Korean Society of Road Engineering*, Vol. 8. No. 3. 49-61.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013. 5th Investment Evaluation Guide for Transportation Facilities.
- Peshkin, D.G., Hoerner, T.E. and Zimmerman, K.A., 2004. Optimal timing of pavement preventive maintenance treatment applications, *NCHRP Report 523, TRB*.
- Santero, N., Harvey, J. and Horvath, A., 2011. Environmental policy for long-life pavements, *Transportation Research Part D*, Vol. 16. 129-136.
- Smith, K. L., Titus-Glover, L., Rao, S., Von Quintus, H. L., and Stanley, M., 2006. Life-cycle Cost Analysis of SMA Pavements and SMA Application Guideline, *Wisconsin Highway Research Program, Madison, WI, USA*.