

국도 포장관리를 위한 의사결정시스템 개발

도명식* · 권수안** · 이상혁*** · 김용주****

Do, Myungsik*, Kwon, Sooahn**, Lee, Sang Hyuk***, Kim, Yongjoo****

Development of the Decision-Making System for National Highway Pavement Management

ABSTRACT

PMS (Pavement Management System) of National highways in Korea has used HDM (Highway Development and Management)-4 developed by World Bank for decision-making for maintenance and rehabilitation of pavements. However using HDM-4 is not appropriate in Korea because HDM-4 requires excessive input factors for analysis and economic analysis models loaded in HDM-4 are not suitable for Korean circumstances. Thus this study aims development of decision-making system for effective pavement management with reflecting Korean circumstances. Moreover this study proposed to define component of system, deterioration models, and basic units for component, and to analyze characteristics of component of system, and also to develop optimal decision-making system. The decision-making system for PMS mainly consists of 1) DB of highways, traffics, and socio-economic index, 2) pavement deterioration model, 3) speed prediction models by pavement conditions, 4) economic evaluation models, and 5) decision-making supporting system. Also this study provided analysis results in case studies for system verifications. However pavement deterioration models considering future probabilistic characteristic and index of decision-making are needed to develop for a further study.

Key words : PMS, Deterioration model, Speed prediction model, Economic evaluation, Decision-making system

초 록

현재 우리나라 일반국도의 포장관리시스템(PMS: Pavement Management System)은 세계은행(World Bank)이 주도한 HDM (Highway Development and Management)-4를 사용하여 유지보수 의사결정의 기초 자료로 사용하고 있으나, 과도한 입력변수와 모형의 불확실성 등으로 인해 국내 실정에 적합한 경제성 분석모형이 필요하게 되었으며, 대부분의 선진국의 경우에는 각 지역과 국가에 맞는 PMS 시스템을 구축하여 운영하고 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 실정에 맞고 효율적인 국도의 도로 및 포장관리를 위한 의사결정시스템을 개발하기 위한 연구로써 시스템 개발에 필요한 구성요소, 공용성 모형 개발, 각 요소별 활용가능한 원단위, 기준 등의 지표 정의 및 종류, 특성들을 분석, 정리하고 경제성 평가를 통해 최적 의사결정을 위한 시스템(S/W) 개발을 목적으로 하였다. 포장관리를 위해 개발한 의사결정시스템의 구성요소는 크게 1)도로, 교통, 사회경제 지표 등의 DB, 2) 도로포장상태의 공용성 모형, 3)도로포장상태에 따른 차량속도변화 모형, 4)경제성 평가 모형, 5) 의사결정지원 시스템으로 구성되며, 개발된 시스템의 검증에 대해 사례 구간을 대상으로 한 분석결과도 함께 제시하였다. 그러나 장래 확률적 특성을 고려한 공용성 모형의 개발과 의사결정을 위한 지표 개발에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

검색어 : 포장관리시스템, 공용성 모형, 포장상태에 따른 속도변화모형, 경제성 평가, 의사결정지원 시스템

* 정회원 · 교신저자 · 한밭대학교 도시공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Hanbat National University · msdo@hanbat.ac.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원, 공학박사 (sakwon@kict.re.kr)

*** 정회원 · (주)윌디엔테크 연구소장, 공학박사 (sanghyuklee8612@gmail.com)

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사 (yongjook@kict.re.kr)

Received October 16, 2013/ revised December 5, 2013/ accepted January 24, 2014

1. 서론

21 세기에 들어서면서 인구 감소, 환경보호에 대한 관심증가와 세계적 경제위기로 인하여 새로운 사회기반시설물(SOC: Social Overhead Capital)의 건설규모가 급속하게 축소되고 있다. 특히 우리나라의 경우 1970-80년대 급속한 경제발전으로 인해 건설된 많은 사회기반시설물의 노후화로 유지보수의 필요성이 높아지고 있지만 제한된 국가예산으로 필요한 SOC건설 및 유지보수가 적절한 시기에 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

한편 성수대교와 삼풍백화점의 붕괴 이후 시설물의 안전관리에 관한 특별법이 제정되었고 사회기반시설물에 대한 유지관리와 안전에 대한 관심이 고조되었으며(Cho et al., 2001; Han et al., 2007) 1980년대 후반부터 일반국도의 포장을 체계적으로 관리하기 위하여 포장관리시스템(PMS)을 도입하여 운영하고 있다.

현재 전 세계적으로 도로자산관리를 위해 개발된 시스템은 크게 포장관리시스템(PMS: Pavement Management System)과 교량관리시스템(BMS: Bridge Management System)으로 나누어질 수 있는데, 포장관리시스템은 도로사업으로 인한 정체의 영향을 분석하기 위해 개발된 미국 FHWA (Federal Highway Administration)의 RealCost와 도로사업을 위한 투자분석을 위한 AssetManager, BCA와 World Bank에서 만든 HDM (Highway Development and Management)-4 등이 있으며, 교량관리시스템은 Pontis, BLCCA 등이 있다.

외국의 경우, 이미 미국, 유럽 및 일본 등의 선진국을 중심으로 생애주기비용을 고려한 투자계획과 이에 따른 의사결정로직과 비용편익분석(Cost/Benefit Analysis)을 통한 사회기반시설물 건설 및 유지보수에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며(Lemer, 2004), 몇몇 국가에서는 생애주기를 고려한 도로포장관리시스템의 활용을 법제화 하여 합리적인 SOC 투자를 유도하고 있다.

우리나라의 경우, 사회간접시설의 효율적 관리의 중요성을 인식하고 시설물의 안전관리에 관한 특별법을 제정하여 시행하고 있지만 현재는 시설물의 현황 파악 및 사후 유지보수의 수준을 벗어나지 못하고 있는 실정이며, 일반국도의 포장관리시스템의 경우 세계은행(World Bank)이 주도한 HDM-4를 사용하여 유지보수우선순위를 선정하고 있으나, 입력변수의 과다와 모형의 불확실성 등으로 인해 국내 실정에 적합한 경제성 분석모형이 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 실정에 맞고 효율적인 국도의 도로 및 포장관리를 위한 의사결정시스템을 개발하기 위한 연구로써 시스템 개발에 필요한 구성요소, 공용성 모형 개발, 각 요소별 활용가능한 원단위, 기준 등의 지표 정의 및 종류, 특성들을 분석, 정리하고 경제성 평가를 통해 최적 의사결정을 위한 시스템(S/W) 개발을 목적으로 한다.

2. 기존 문헌 고찰

우리나라의 국도 포장관리를 위한 의사결정시스템으로 사용되고 있는 HDM-4는 공용성 모형을 기반으로 관리자 비용과 이용자 비용을 이용하여 경제성 분석을 시행하는데, 관리자 비용의 경우 초기공사비용과 유지보수비용으로 구성되어 있으며, 이용자 비용의 경우 차량운행비용, 통행시간비용, 사고비용, 환경비용 등으로 구성되어 있다.

HDM-4는 미시적인 분석이 가능한 S/W로써 많은 자료들을 요구하고 있으며, HDM-4에서의 주요자료는 도로포장파손모형(deterioration model)의 보정을 위한 시계열 공용성 데이터와 교통량, 경제성평가에 주요지표인 각종 단위비용이라 할 수 있다(Christopher et al., 2000).

하지만, 기존 시스템의 경우 우리나라 현실에 맞지 않는 인자(input factors)가 많고 불필요한 인자의 입력을 요구하므로 현실에 맞는 계수조정이 필요하다. Do et al. (2007)은 HDM-4를 이용하여 내구성포장의 LCCA (Life Cycle Cost Analysis) 분석을 통하여 경제성 평가방안을 제시하였는데 이를 위해 우리나라 현실에 맞지 않는 HDM-4의 공용성 모형을 현장조사와 분석을 통해 필요한 계수의 보정을 실시한 바 있다. 또한, Han et al. (2007)은 HDM-4와 FHWA의 RealCost를 이용하여 최적의 도로포장 유지보수기준을 제시하기 위한 연구를 통해 관리자 및 이용자 비용(차량운행비, 통행시간 비용, 공사구간 지체비용) 그리고 사회환경비용(대기오염비용, 교통사고비용)까지 포함하여 LCCA를 수행하였다.

한편 각 국가나 지역별로 도로 및 포장의 유지관리를 위한 시스템 개발을 위해 경제성 분석에 활용되는 관리자 비용 및 편익과 이용자 비용 및 편익에 대한 환산과 주요인자 추정에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이는 관리자와 이용자 비용 및 편익에 대한 정확한 계량화(quantification)와 분석에 사용될 주요인자의 추정이 제대로 이루어져야 분석대상에 대한 평가가 좀 더 정확하게 이루어질 수 있기 때문이다.

관리자 비용의 경우 도로 및 포장의 공용성 및 경제성 분석에 관한 연구를 통해 LCC를 고려하여 새로운 평가기법의 도입타당성을 비교하는 연구가 주를 이루며(Cho et al., 2001; Do et al., 2009), 이용자 비용의 경우 전 세계적으로 도로포장상태에 따른 이용자 비용변화에 대한 연구가 이루어지고 있는데, Zaabar et al. (2012)은 도로포장상태가 승용차와 트럭의 차량운행비용에 미치는 영향을 고속과 저속운행으로 나누어 분석하였는데 도로상태가 악화될수록 유류소모량 등 차량운행비용이 증가함을 밝혔다.

우리나라의 경우, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011)의 지침을 활용하여 이용자 비용 산정이 이루어지고 있는데 이 지침에서 이용자 비용의 항목은 교통사고비용을 제외한

나머지는 속도의 함수로 이루어져 있는데, Park (2003)은 IRI (International Roughness Index)의 차이가 나는 3개구간을 선정하여 차량운행속도를 조사하였는데 차중에 따라 속도차이는 있지만 대체적으로 IRI가 커질수록 차량속도가 감소함을 밝혔다.

해외의 포장관리 및 자산관리를 위한 시스템의 개발에 대한 연구로는 노르웨이의 공로를 대상으로 한 연구(Haugoedegaard et al., 1994)가 있으며, 일본의 경우 한신 고속도로공단과 일부 지자체 등 지역과 관리 대상 도로의 특성에 맞게 시스템을 개발하여 운영하고 있다(Nakabayashi et al., 2007).

한편 Karan et al. (1976)은 도로 포장과 차량의 운행속도와의 관계를 연구한 초기 논문에 해당하지만 샘플의 숫자가 적어 정도 높은 연구 성과는 내지 못한 단점이 있으며, 미국의 경우에도 각 주별로 지역특성을 고려한 관리시스템을 구축하여 운영하고 있는 실정이다(Haas et al., 2006).

우리나라의 경우에도 사회간접시설의 급증과 향후 유지관리 비용이 급속히 증가될 것으로 예측됨에 따라 유지관리 예산소요를 체계적으로 제시하고, 예방적 유지관리와 생애주기비용분석을 통한 장기적 관리의 토대를 마련하기 위해서는 국가자산의 합리적인 평가 및 의사결정을 위한 항목과 기준마련이 선행되어야 할 것이다.

3. 포장관리를 위한 의사결정시스템의 구성

3.1 의사결정시스템의 구성

포장관리를 위한 의사결정시스템의 구성요소는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크게 1)도로, 교통, 사회경제 지표 등의 DB, 2) 도로포장 상태의 공용성 모형, 3)도로포장상태에 따른 차량속도변화 모형,

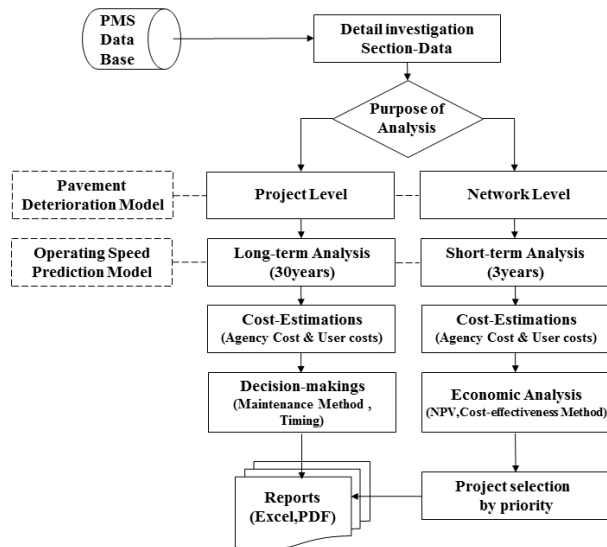


Fig. 1. Component of Pavement Decision-Making System

4)경제성 평가 모형, 5) 의사결정지원 시스템으로 구성된다.

도로포장에서 공용성 모형이란 포장의 파손과정에 대한 해석을 다루는 내용으로 포장의 유지보수가 요구되기까지의 기대수명과 그 기대수명 내에서의 파손특성의 변화과정을 표현하는 것으로 정의할 수 있다.

본 연구에서는 포장상태지표별 연간 파손량을 함수로 모형화하여 공용성 모형을 개발하였다. 공용성 모형의 추정을 위하여 한국건설기술연구원에서 제공하는 도로포장감시체계 DB (2007-2011년)를 사용하였으며, 포장상태지표로는 균열율, 소성변형, 종단평탄성(IRI)을 이용하였다. 이는 도로포장의 유지보수 시행기준과 공법결정이 균열율과 소성변형의 정도에 따라 결정되므로 경제성 분석에서 관리자 비용은 이에 대한 연간 파손량의 추정으로 산정할 수 있으며, 이용자 비용 산정은 도로포장상태에 따른 운행속도변화로 추정이 가능하므로 운행속도에 영향을 미치는 종단평탄성의 연간 파손량 추정을 모형화하였다.

또한 도로파손의 정도는 교통하중(ESAL: Equivalent Single Axle Load)과 연평균일교통량(AADT: Annual Average Daily Traffic)의 크기에 따라 다르게 진행되므로, 군집분석을 이용하여 ESAL과 AADT의 크기에 따라 도로를 그룹화(grouping)하고 각 분류된 도로군집에 대한 공용성 모형을 개발하였다.

한편 유지보수의 시행여부를 결정짓거나 제한된 예산범위 내에서 유지보수의 우선순위를 결정하기 위한 경제성 분석을 위해서는 순현재가치(NPV: Net Present Value), 이용자비용의 증가량(ΔUC)이나 비용편익비(B/C ratio) 등을 기준지표로 활용하였다.

마지막으로 의사결정지원 시스템에는 프로젝트 레벨과 네트워크 레벨로 구분하여 분석의 목적에 맞게 대상구간의 유지보수 시행여부, 비용 및 편익의 산정, 최적 공법과 유지보수 시기의 결정, 우선순위 결정 등을 수행하는 기능이 포함되며 분석결과를 요약하는 기능도 추가로 포함시켰다.

3.2 공용성 모형의 개발

포장관리시스템의 구성요소 및 세부모형가운데 가장 핵심적인 역할을 하는 것이 공용성 모형이며, 신뢰성 높은 공용성 모형의 개발을 위해서는 과거 유지보수 이력데이터의 관리와 장래 파손예측모형의 개발에 특히 유의해야 한다.

본 연구에서는 도로구간의 교통특성을 고려한 공용성 모형의 개발을 위해 군집분석을 이용하여 구간 특성별 파손예측모형을 구축하였다. 군집분석은 조사대상 집단에 속해있는 각 개별객체들 사이의 유사성(similarity)을 기준으로 분류하여 유사성이 높은 객체들을 그룹화 하는 통계적 분석방법으로, 각 객체들 간의 유사성은 주로 거리척도(distance measure)로 측정하며, 본 연구에서는 군집분석에서 가장 많이 사용되는 거리척도인 유클리드 제곱거리

를 사용하였다.

군집분석에서 군집추출방법으로 계층적 군집화 방법(hierarchical cluster method)와 비계층적 군집화 방법(non-hierarchical cluster method)이 있는데 본 연구에서는 ESAL과 AADT를 변수로 하는 계층적 군집화 방법 중 Ward법을 이용하여 연구대상 도로를 군집화 하였다. Ward법은 병합적 군집 방법(agglomerative cluster algorithm)으로 단순히 객체별 거리 기준이 아니라 군집을 구성하는 모든 객체들의 측정치의 분산을 기준으로 그룹화 하는 방식으로 군집 내 오차제곱합(error sum of square)을 계산하여 최소 제곱합을 가지게 되는 군집끼리 그룹화하는 방법이다.

군집분석의 결과, 차량하중의 강도를 나타내는 ESAL과 통행량의 상대적 크기를 나타내는 AADT를 각 2개의 그룹(소, 대)으로 분류하였으며 Table 1에서 보는 바와 같이 총 4가지 군집으로 분류하였다. ESAL과 AADT의 크기의 조합에 따라 지방지역 도로, 도심지역 도로, 물류(혹은 산업) 도로, 간선 국도로 기능별로 분류할 수 있다.

이어서 군집분석으로 분류된 4가지 군집별로 공용성 모형을 추정하게 된다. 본 연구에서는 신뢰성 분석과 수명분포 파라미터 추정에서 많이 이용되고 있는 최대우도 추정법(MLE: Maximum Likelihood Estimation)과 AD (Anderson-Darling) 통계량으로 각 포장상태지표별 공용성 모형을 개발하였다.

최대우도 추정법은 특정 확률변수에서 수집한 데이터를 기초로 그 확률변수의 모수(parameter)를 추정하는 방법으로, 모수가 θ 이고 t_1, t_2, \dots, t_n 이 확률밀도함수 $f(t)$ 로부터 추출된 임의표본이라 할 때, θ 의 우도함수(likelihood function)의 일반식은 Eq. (1)과 같다(Do, 2011).

$$L(\theta) = L(t_1, t_2, \dots, t_n; \theta) = f_i(t_1, t_2, \dots, t_n; \theta) \quad (1)$$

이 우도함수 $L(\theta)$ 를 최대로 하는 θ 의 추정치를 구하는 방법이 최대우도 추정법이며, θ 의 추정치를 최대우도 추정치(Maximum Likelihood Estimator)라 하고, t_1, t_2, \dots, t_n 의 적당한 함수로 표현 된다. 최대우도 추정법은 우도함수를 극대화시키는 방법으로 우도 함수에 자연대수를 취한 대수우도함수를 많이 사용하는데 이는 계산을 편리하게 할 수 있으며 또한 log를 취하지 않은 것과 같은

Table 1. Results of Cluster Analysis

	ESAL	AADT	# of Section	Note
1 st Cluster	410 below	4,950 below	1,550	Minor Road
2 nd Cluster	410 below	4,950 above	62	Urban Area
3 rd Cluster	410 above	4,950 below	233	Industrial Area
4 th Cluster	410 above	4,950 above	263	Main Road

결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

$$Max_{\theta} \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i, \theta) \quad (2)$$

최대우도 추정치를 구할 때, 대부분 비선형 방정식의 형태가 되므로 방정식의 해는 반복계산법(iteration method)과 같은 수치 해석적 근사해를 구해야 하며, 본 연구에서는 근사치에 대한 수렴속도가 빠른 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 사용하였으며, 근사해를 구하기 위한 수렴 판정기준은 1×10^{-4} 으로 설정하였다(Do, 2011). 최대우도 추정법을 이용하여 추정한 확률분포의 적합도는 AD (Anderson-Darling) 통계값을 사용하였으며 AD 통계량의 일반식은 Eq. (3)과 같다(Shin et al., 2010).

$$Q_n = n \int_{-\infty}^{+\infty} [F_n(x) - F(x)]^2 \psi(x) dF(x) \quad (3)$$

여기서, $\psi(x)$ 는 가중치 함수로, $\psi(x) = [F(x)(1 - F(x))]^{-1}$ 인 경우의 일반식은 Eq. (4)와 같다.

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)1 - F(x)} dF(x) \quad (4)$$

포장표면의 상태의 경년적 악화량을 산정하기 위해 Fig. 2와 같이 데이터 조합을 구성하였다. 즉, 매 연도별 악화량을 독립이라 가정하고 포장의 상태가 역전이 되는 경우를 제외하고 가능한 많은 데이터 조합을 구하여 경년적 악화량을 추정하였다. 즉, Fig. 2에서와 같이 신설(혹은 유지보수) 이후 4년이 경과된 포장구

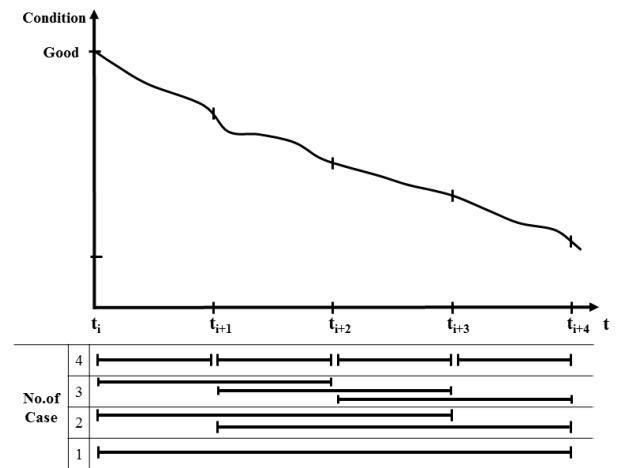


Fig. 2. Pavement Deterioration and Data Combination

간의 경우 1년 경과된 포장의 상태 데이터 4개, 2년 경과된 데이터 3개, 3년 경과된 데이터와 4년 경과된 데이터가 각각 2개와 1개를 얻을 수 있다.

Fig. 3에는 포장 상태의 경년적 변화과정을 나타낸 것으로 초기 상태(양호)에서 시간의 경과에 따라 점차 포장의 표면 상태가 악화되는 것으로 선형 혹은 비선형 추세 여부는 도로구간 혹은 그룹에 따라 상이하다.

본 연구에서는 각 군집별로 신설 및 유지보수 후 각 년도별 (t_1, t_2, \dots, t_n) 상태 데이터를 획득하여 확률분포를 산정한 후 AD 통계량을 통해 도로포장 수명 데이터가 특성 분포를 얼마나 잘 따르는가를 측정할 수 있으며 이 통계량이 작으면 작을수록 분포의 적합성이 높다고 판단할 수 있다. 이와 같은 방법론을 이용하여 Fig. 3에서와 같이 도로포장상태지표별/군집별로 가장 적합한 악화 분포를 선정하고 각 연도별 대푯값(상태의 평균값)을 산정하고 이를 기반으로 1년 경과에 따른 공용성 모형을 개발하였으며 결과는 Table 2와 같다.

3.3 도로포장상태에 따른 차량운행속도변화모형 개발

기존의 차량 주행속도 모형은 주로 도로 설계 및 안전성 진단을 목적으로 개발되었기 때문에 도로의 선형조건(종단경사, 평면곡선

반경, 평면곡선길이, 차로폭, 편구배 등)을 주요 변수로 선정하였으며(Kim et al., 2005) 도로 표면 상태에 따른 속도의 변화량에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

나아가 국토해양부(2011)의 「교통시설 투자평가지침」에는 이용자 편의 산정에 관한 모형이 편의항목별로 차량 운행속도의 함수로 제시되어져 있다. 따라서 도로의 포장상태의 변화에 따른 차량의 운행속도의 변화에 대한 모형이 필요하며 Fig. 4에서 보는 바와 같이 도로의 상태의 변화에 따른 차량의 속도 변화와 유지보수 공법 및 유지보수 예산(MC: Maintenance Cost)의 변화가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 도로포장 유지보수 전·후의 차량 운행속도 데이터를 수집하기 위하여 2012-2013년 국도 유지보수 대상구간 중 포장상태와 도로환경 등의 변수를 고려하여 조사 대상구간을 선정

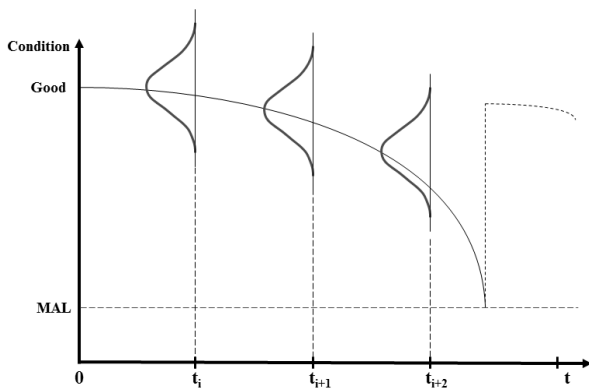


Fig. 3. Concept of Deterioration Model

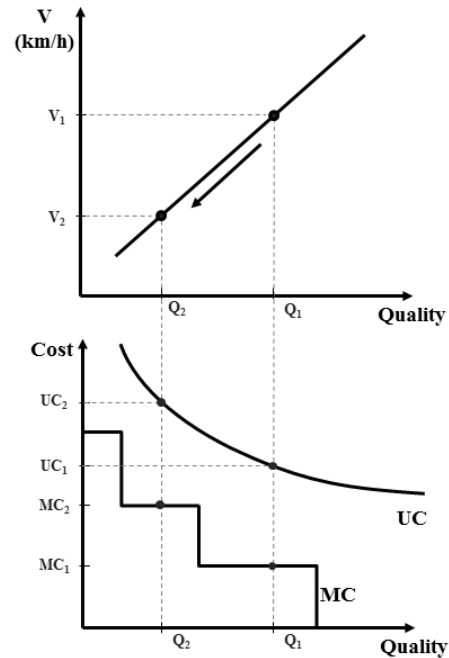


Fig. 4. Vehicle Travel Speed and Maintenance Method by Pavement Condition

Table 2. Results of Deterioration Models by Clusters

Section	Annual Amount of Deterioration			Deterioration Models		
	Crack (%)	Rut Depth (mm)	IRI (m/km)	Crack	Rut Depth	IRI
1 st Cluster	1.739	1.286	0.236	$1.739x - 1.797^*$	$1.286x - 0.511^*$	$0.236x + 0.982^*$
2 nd Cluster	1.767	1.286	0.256	$1.767x - 0.367^*$	-**	$0.256x + 1.151^*$
3 rd Cluster	2.342	1.463	0.295	$2.342x - 1.568^*$	$1.463x - 1.269^*$	$0.295x + 0.705^*$
4 th Cluster	2.596	1.606	0.354	$2.596x + 0.237^*$	$1.606x + 0.974^*$	$0.354x + 0.812^*$

* P-value < .05

** The deterioration model of rut depth in 2nd cluster could not estimated due to lack of data

Table 3. Results of AD tests

Classification			Ave. Speed (km/h)	S.D.	Anderson-Darling Test		t Test		Mann-Whitney U	
					Sig.	Hypothesis	Sig.	Hypothesis	Sig.	Hypothesis
Sunchang	Upstream	Before	98.2	1.83	0.039	H1	-		0.015	H1'
		After	106.5	8.45	0.633	H0				
	Downstream	Before	112.2	7.69	0.130	H0				
		After	114.8	2.49	0.005	H1				
Jecheon	Downstream	Before	69.5	0.71	0.227	H0	0.017	H1'		
		After	76.8	3.75	0.888	H0				
Danyang	Downstream	Before	63.9	2.88	0.723	H0	0.000	H1'		
		After	73.3	2.91	0.06	H0				
Imsil	Upstream	Before	86.9	2.52	0.534	H0	0.000	H1'	-	
		After	97.3	2.32	0.280	H0				
	Downstream	Before	91.7	2.95	0.526	H0	0.003	H1'		
		After	97.3	1.75	0.797	H0				

Note1 : Assumption of AD Test is as follow (Signification Level $\alpha=0.05$)

H0(Null Hypothesis) : Vehicle speed data is normally distributed.

H1(Alternative Hypothesis) : Vehicle speed data is not normally distributed..

Note2 : Assumption of t-Test, Mann-Whitney U Test is as follow (Signification Level $\alpha=0.05$)

H0'(Null Hypothesis) : Difference of average speeds between before-after pavement maintenance is not statistically significant.

H1'(Alternative Hypothesis) : Difference of average speeds between before-after pavement maintenance is statistically significant.

하였으며, 선정된 구간에 대한 지형 및 현황을 살핀 후 교통량과 차량운행속도 데이터를 NC-200을 이용하여 수집하였다.

수집된 데이터 가운데 이상치(Outlier)를 제거하기 위하여 필터링 기준을 마련하였으며, 1) 차두간격 6초 이상인 데이터(차량군의 영향 최소화), 2) 차량속도 50~120km/h의 데이터, 3) 차종은 승용차로 한정(중차량의 공차 및 만차의 영향 최소화), 4) 1차로 데이터, 5) 비점두 시간대인 10~17시의 데이터, 6) 평지구간 데이터(경사의 영향 제외)로 정하여 분석 데이터를 수집하였다.

이상치가 제거된 데이터를 이용하여 도로포장 유지보수 전·후의 차량운행 평균속도를 산정하였으며, 산정된 통행속도의 차이에 대한 통계적 검증을 시행하였다. 먼저 AD 검증을 통해 수집된 데이터의 분포가 정규성을 가지는지에 대한 분석을 시행하였는데 분석 대상구간 중 순창구간은 정규분포의 유의확률이 신뢰 수준 ($\alpha = 0.05$) 이하로 나타났으며, 나머지 제천, 단양, 임실 구간은 정규분포 유의확률 신뢰수준을 만족하였다.

따라서 정규성을 만족하지 못하는 순창구간의 데이터는 비모수적 통계 기법인 Mann-Whitney U 기법을 활용하여 통계적 검증을 하였으며, 정규성을 만족하는 세구간의 데이터는 t 검정을 통해 보수 전후 속도의 차이를 검증하였다.

검증 결과 4구간 중 순창구간의 하행구간의 유지보수 전·후의 차량 통행속도 차이가 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타나 차량 통행속도 모형 개발에는 제외하였으며 제천 상행구간의 경우

데이터부족으로 제외하였다. 나머지 구간은 차량 통행속도 차이가 통계적으로 유의한 것으로 나타나 모형개발을 위한 데이터로 이용하였다.

도로포장 상태별 차량 운행속도 모형을 개발하기 위한 도로포장 상태 기준값은 한국건설기술연구원서 국도유지보수공법결정 흐름도를 기준으로 하였다. 유지보수 기준값을 「유지보수 전」의 도로포장상태 지표 값으로 균열을 20%, 소성변형 15mm, IRI 4.0m/km으로 정의하였다. 또한 유지보수가 시행된 도로의 포장상태는 유지보수 직후 균열을 0%, 소성변형 0mm, IRI 1.0m/km으로 정의하였으며 도로포장 상태지표별로 선형 회귀모형을 이용하여 도로포장 상태에 따른 차량 운행속도 모형을 개발하였다.

Table 4에는 평지에서의 승용차를 기준으로 도로포장상태지표별, 제한속도별(60km/h, 80km/h)로 구분하여 개발된 차량 운행속도 모형의 결과를 나타내고 있으며 포장표면의 상태(x)가 악화됨에 따라 속도(y)에 작은 변화(감소)가 있음을 확인할 수 있다.

Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 80km/h의 제한속도 구간에서 균열율은 1%씩 악화될수록 0.40km/h의 속도감소가 나타났으며, 소성변형의 경우 1mm씩 악화될수록 0.54km/h, IRI는 1m/km씩 악화될수록 약 2.70km/h의 속도감소가 나타났다. 또한, 60km/h의 제한속도 구간에서 균열율은 1% 당 0.35km/h의 속도감소가 나타났으며, 소성변형의 경우 1mm 당 0.47km/h, IRI는 1m/km 당 약 2.36km/h의 속도감소가 있음을 확인할 수 있다.

Table 4. Speed Prediction Models on PCI

Classification		Speed Prediction Models	R ²
Speed Limits	PCI		
80 km/h	Crack	$y = -0.4045x + 100.35$	0.45
	Rut Depth	$y = -0.5394x + 100.35$	
	IRI	$y = -2.6969x + 103.04$	
60 km/h	Crack	$y = -0.3540x + 78.46$	0.58
	Rut Depth	$y = -0.4719x + 78.46$	
	IRI	$y = -2.3597x + 80.82$	

PCI: Pavement Condition Index

따라서 본 연구에서 수행한 현장 실험을 통해 기존 연구인 Karan et al. (1976), Park (2003) 그리고 Zaabar et al. (2012) 등의 연구 성과와 정합성을 가지는 결과를 도출하게 되었으며 이용자 비용 산정에 기초자료로 활용하였다.

3.4 경제성 평가 및 의사결정지원 시스템

효율적인 포장관리를 위한 경제성 분석에는 주로 분석기간(30년) 동안 소요되는 유지보수 비용과 이용자 비용의 흐름 특성 분석을 통해 최적 유지보수 공법과 시기, 유지보수 대안 비교와 보수 우선순위사업 및 예산제약으로 인해 보수가 지연되었을 때의 영향 등에 대한 분석 기능이 필요하다.

관리자 비용은 도로포장상태에 따라 포장공법이 결정되므로 공용성 모형을 이용하여 시간경과에 따른 도로포장상태를 예측하여 유지보수공법을 결정하고 이를 관리자 비용으로 산정하며, 본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 제공하는 최종보수공법결정 흐름도(Fig. 5)를 기준으로 유지보수공법을 결정하고 이를 해당구간 연장과 기준단가를 적용하여 비용을 산정하였다.

도로포장 유지보수공법의 결정은 균열율과 소성변형의 정도에 의해 결정되는데 결정된 시점을 기준으로 시간이 경과하면서 도로포장상태가 악화되는 균열율과 소성변형의 정도에 따라 유지보수 공법이 달라져 유지보수를 하지 않고 시간이 경과되면 관리자 비용이 증가한다.

이용자 비용과 편익은 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011)의 「교통시설 투자평가지침서」에서 제시하고 있는 편익항목을 기준으로 차량운행속도를 고려하여 산정하였다. 편익 항목은 직접편익과 간접편익으로 구분되며, 간접편익의 경우 지역 개발 효과, 시장권의 확대, 지역 산업구조의 개편 등으로 계량화가 쉽지 않아 경제성 분석에서 제외하였으며, 직접편익을 분석대상으로 하였다. 이용자 비용/편익 산정에 이용되는 항목은 교통사고비용을 제외한 나머지 5가지 비용항목 1) 통행시간비용, 2) 차량운행비용, 3) 대기오염비용, 4)은실가스, 5)차량소음비용의 산정식을 활용하였다.

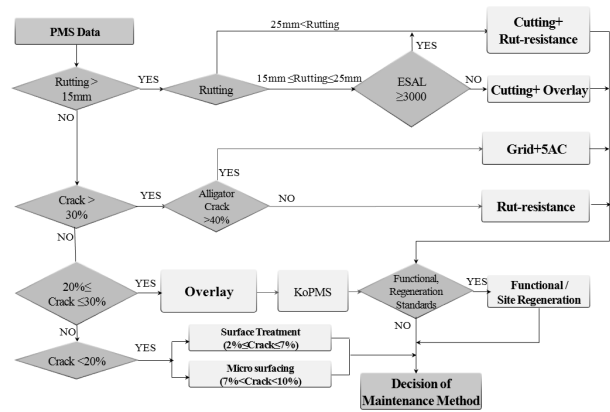


Fig. 5. Flow Chart for Determination of Maintenance Method

본 연구에서 도로유지보수의 우선순위선정은 효율성 지표와 경제성 지표를 도입하였으며, 이용자비용의 증가량(ΔUC)과 비용 효율성 지표를 활용하였다.

이용자 비용의 증가량 지표는 해당 도로구간의 유지보수의 시행 유무에 따른 효율성을 평가하는 지표로 유지보수를 시행해야 할 시점에서 유지보수를 하지 않고 1년간 지연(혹은 방치)하여 다음연도에 유지보수를 하는 경우 증가하게 되는 이용자 비용의 크기를 산정하여 이를 기준으로 증가량이 큰 순서대로 우선순위를 부여하는 방식이다. 즉, 유지보수가 지연됨으로써 증가하게 되는 부담액이 가장 큰 구간 순서대로 우선순위를 정하는 방법을 제안하며 편익과 유지보수 비용(MC)을 산정하는 식을 정리하면 Eqs. (5) and (6)과 같다.

$$B_t = \Delta UC = UC_{t+1} - UC_t \quad (5)$$

$$MC = EUAC = p \times \frac{i \times (1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \quad (6)$$

- 여기서, UC_t : t 년도의 이용자 비용
- p : 해당년도 관리자 비용
- i : 할인율(%)
- t : 비용발생 총 기간(공용 연수)

본 연구에서 개발한 의사결정시스템은 Microsoft EXCEL의 VBA (Visual Basic Application)을 활용하여 이용자가 보다 쉽게 이해하고 활용, 확인, 보정/수정이 가능하도록 설계되었다.

도로포장 유지보수의 의사결정시스템은 특정 구간을 대상으로 생애주기비용분석이 가능한 Project-Level 분석과 유지보수 대상 구간들 중 경제성 분석을 통한 유지보수 우선순위의 결정을 위한 Network-Level 분석으로 나눌 수 있다.

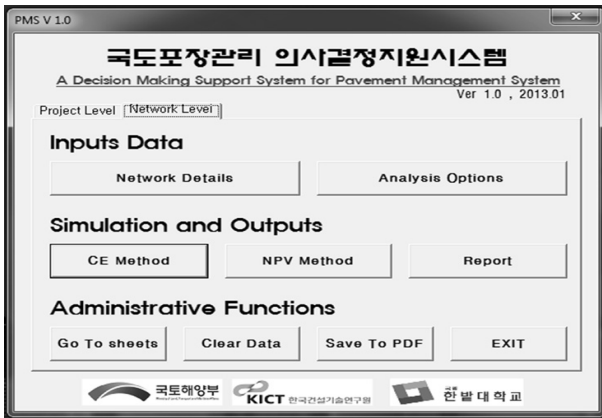


Fig. 6. Main S/W Board of Network-Level Analysis

Project-Level 분석에서 주로 활용 가능한 부분은 특정 구간의 향후 30년간의 도로상태 변화과정을 예측(생애주기비용분석)하여 비용필요 예상시기를 산정하는 것과 도로의 유지보수를 시행하거나 시행하지 않았을 경우(with-without 분석)를 통한 최적유지보수 시점을 예측(10년간)하는 것이다. 이를 통하여 유지보수가 적기에 시행되지 않았을 경우 발생하는 비용과 적기에 시행되었을 경우 발생하는 편익을 직접 비교분석이 가능하여 의사결정자를 지원해주는 기능을 가지게 된다.

Fig. 6에는 의사결정시스템의 메인스위치 보드를 나타내고 있으며, 도로 유지관리와 관련된 의사결정을 지원하기 위한 기능은 크게 네 가지로 나누어볼 수 있다. 1) 유지관리비 산정 및 예측, 2) 유지보수 대상구간의 우선순위 결정, 3) 유지보수시기(지연)에 따른 도로 관리자 및 이용자 비용의 변화추세 예측, 4) 경제성 지표 도출 등이 있으며, 그 외 각 세부모형들에서 도출되는 결과물들을 조합하여 다양한 연구목적으로도 활용이 가능하다.

4. PMS 의사결정시스템의 활용

4.1 장기 공용성 및 경제성 분석

본 절에서는 네 군집가운데 AADT와 ESAL 모두 낮은 수준이면서 가장 많은 포장구간이 속한 제 1군집(C_1)을 예를 들어 장기

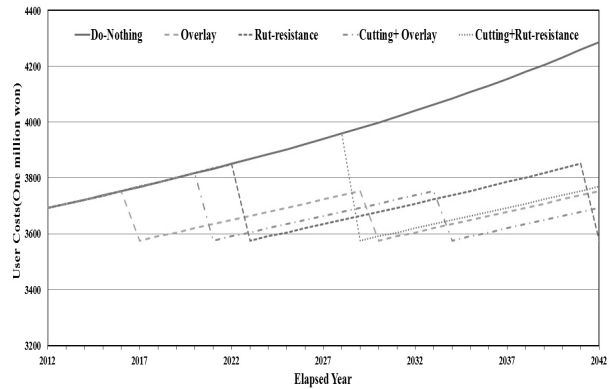


Fig. 7. Comparison of Maintenance Alternatives by Long-term LCCA

공용성 및 경제성 분석과정을 설명하기로 한다.

우선 프로젝트 레벨에서 유지보수 대안간 비교를 통해 최적 대안선정과 30년 장기 분석기간 동안의 유지보수 횟수, 유지보수 비용과 이용자 비용 그리고 순현재가치(NPV)의 산정과정을 통해 본 연구에서 구축한 시스템의 활용부문을 점검하기로 한다.

Fig. 7 and Table 5에는 30년 동안 기본 대안(Do-nothing)과 4가지 유지보수 대안간의 장기 포장상태의 변화를 나타내고 있으며, Fig. 5에서 제시한 유지보수 기준에 따르는 경우 유지보수 횟수, 유지보수 예상년도, 유지보수 비용과 이용자 비용 그리고 연평균 순현재가치의 크기를 알 수 있다.

여기서 편익은 아무런 유지보수를 행하지 않는 대안과 각 보수공법별 이용자 비용의 차이로 산정할 수 있다. Table 5에서와 같이 만약 기존의 의사결정기준인 유지보수 비용만을 고려한다면 유지보수 횟수가 적은 절삭+내유동(CRR) 포장이 최적 대안이겠지만 도로를 이용하는 이용자의 통행시간, 유류비용 및 환경비용 등을 고려하여 최적 대안을 결정하는 경우에는 포장을 좋은 상태로 유지 관리하는 대안이 최적대안이 될 가능성이 커지게 될 것이다.

4.2 유지보수 지연에 따른 영향

본 연구에서는 필요한 유지보수 예산을 확보하지 못하는 경우를 가정하고 유지보수 시점을 지나는 경우, 즉 유지보수 지연에 따른

Table 5. Comparison of Maintenance Methods (Unit: One Million won)

Type	Applicable Years	Frequency of Application	Maintenance Cost	User Costs	Total NPV	Annual average NPV	
C_1	Do-Nothing	-	-	122693.4	-	-	
	Overlay	2016/2029/2042	3	858.0	113885.1	2803.3	93.4
	Rut-resistance	2022/2041	2	982.0	115542.7	1987.5	66.2
	Cutting + Overlay	2020/2033	2	788.0	114131.2	2485.7	82.8
	Cutting + Rut-resistance	2028	1	603.0	116351.3	1558.4	51.9

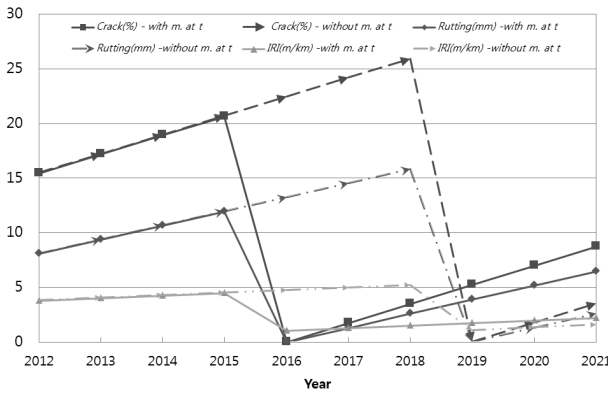


Fig. 8. Future Maintenance Method Prediction

영향을 살펴볼 수 있도록 설계되었다.

Fig. 8은 본 연구에서 개발된 의사결정시스템에서 2015년에 유지보수가 시행되어 포장의 상태가 최고로 양호한 수준으로 회복된 이후 시간의 경과에 따라 포장상태가 악화되는 과정(실선, with maintenance)과 적절한 유지보수 시점인 2015년에 유지보수가 이루어지지 못해 지연되었을 경우의 도로의 상태(점선, without maintenance)를 3가지 표면상태 지표별로 비교한 그림이다.

여기서 유지보수의 지연으로 인해 유지보수 공법이 포장상태가 더 많이 악화됨으로 인해 변경(Overlay → Cutting (Milling) + Overlay 혹은 내유동 등)됨에 따라 당초보다 고가의 예산을 투입해야 하는 경우가 대부분이다. 이는 적절한 시점에서 유지보수가 이루어지는 것이 예산 절감의 측면에서도 유리함을 반영하는 것이라고 해석할 수 있다.

4.3 유지보수 우선순위 및 공법 결정

Network-Level 분석에서 주로 활용 가능한 부분은 단일구간이 아닌 유지보수 대상구간 전체를 대상으로 경제성 분석을 시행하고 이에 따른 유지보수 우선순위를 결정하는 것과 장래 유지보수에 필요한 예산을 예측하는 것으로 향후 3년 동안의 관리자 비용에 영향을 미치는 유지보수 공법변화와 추가적인 도로파손으로 인한 이용자 비용변화를 분석할 수 있다.

Table 6에는 유지보수를 시행해야 할 구간을 대상으로 해당년도의 유지보수 공법, 유지보수 비용(연등가액 포함) 및 이용자 비용과 함께 유지보수가 지연되었을 경우 유지보수 공법의 변화와 함께 유지보수 지연에 따른 이용자 비용의 증가량(ΔUC)에 기반한 우선순위 산정 예를 나타내고 있다.

예를 들어, 우선순위 1-2구간의 경우 해당 년도에는 유지보수 기준($20\% < Crack < 30\%$)에 의해 Overlay로 유지보수를 하게 되지만 1년 지연됨으로 인해 $Crack > 30\%$ 기준에 따라 Rut-resistance로 변경되었으며, 2년 지연되는 경우에는 $Rutting > 25mm$ 기준에 의해 Cutting (Milling) + Rut-resistance로 변경됨을 확인할 수 있다.

한편, 우선순위로 4, 5, 7번 구간의 경우에는 유지보수의 지연으로 인해 공법의 변화가 일어나지는 않는 구간임을 알 수 있으며, 이는 분석 대상구간의 현재의 포장 상태와 악화의 속도(기울기)에 좌우된다.

본 시스템의 경우 유지보수 우선순위 결정은 유지보수 증가량(ΔUC)과 비용효율성(cost-effectiveness)을 고려한 비용편익비 중 하나를 선택하여 분석할 수 있으며, 선택한 분석방법에 따라 우선순위 산정 결과는 달라질 수 있다.

Table 6. Example Results of Network-Level Analysis

Priority	ΔUC	Sections	Method				Maintenance Cost (One Million won)		User Costs (One Million won)		
			Present Year	1 Years Later	2 Years Later	3 Years Later	Present Year	Present Year (EUAC)	Present Year	1 Years Later	After maintenance
1	155.8	D1211113	O	RR	CRR	CRR	606.5	97.7	67110.5	67266.3	64508.7
2	115.7	D1211112	O	RR	CRR	CRR	450.6	72.6	49893.4	50009.1	47920.8
3	60.0	D128248	O	RR	CO	CO	438.4	70.6	22706.2	22766.2	19634.2
4	27.7	D1212B1	O	O	O	O	740.7	86.1	17188.5	17216.2	15587.3
5	27.5	D121211	O	O	O	O	740.7	86.1	17092.1	17119.6	15587.3
6	22.3	D121185	O	O	RR	CRR	259.9	41.9	14056.6	14078.9	13191.0
7	18.1	D1212D8	O	O	O	O	485.2	56.4	12082.8	12100.9	11084.9
8	17.9	D121238	O	O	CO	CO	485.2	56.4	11977.6	11995.5	11084.9
9	10.9	D128255	O	O	CO	CO	216.6	34.9	10409.8	10420.7	9502.0
10	0.9	D106270	O	O	RR	RR	112.6	12.3	314.4	315.3	307.3

Note) O: Overlay, RR: Rut-resistance, CO: Cutting+Overlay, CRR: Cutting+Rut-resistance

5. 결론 및 향후 과제

기존의 도로포장 유지보수 의사결정시스템인 HDM-4는 입력변수의 과다와 블랙박스(black box) 같은 도로파손 예측모형의 추정과 경제성 분석의 과정 등으로 인해 국내 실정에 적합하지 않아 현실성 있고 국내 도로환경에 적합한 분석 모형이 필요하게 됨에 따라 본 연구에서는 효율적이고 국내 실정에 적합한 국도의 도로관리를 위한 의사결정시스템을 개발하기 위한 연구를 통해 다음과 같은 성과를 거두었다.

먼저, 도로포장상태의 공용성 모형의 개발은 군집분석을 통해 국도전체를 ESAL과 AADT를 중심으로 4군집으로 나누어 각 군집에 대한 포장상태지표별 공용성 모형을 개발하는 방안을 제안하였다.

또한 이용자 비용/편익은 속도의 함수로 제시되어 있는 국토해양부(2011)의 지침을 활용하기 위하여 도로포장 유지보수 전·후의 차량통행속도에 대한 데이터를 수집하여 도로포장상태지표별, 제한속도별 차량속도변화 모형을 개발하였다.

세 번째는 개발된 파손예측모형과 포장상태별 차량운행속도변화 모형을 기반으로 장기(30년) 분석기간 동안의 관리자 비용과 이용자 비용을 산정하고 이를 기반으로 경제성 평가 방안을 제안하였다. 경제성 평가 시스템에는 최적 유지보수 공법과 시기결정, 대안의 평가, 유지보수 지연에 따른 영향을 분석하는 기능을 포함시켰으며, 의사결정지원을 위해 제한된 예산범위 내에서 유지보수 우선순위를 결정하기 위한 지표 및 순위결정 방안을 제시하였다.

마지막으로 본 시스템은 Microsoft Excel의 VBA (Visual Basic Application)를 활용하여 개발되었기 때문에 도로관리자 및 이용자들이 쉽게 이용할 수 있으며 개발된 시스템의 검증을 위한 사례분석도 실시하였다.

향후 도로포장상태와 교통수요에 대한 DB가 구축되고 지역별·교통 환경별 포장파손예측(공용성) 모형에 확률론적 기법 및 의사결정을 위한 지표개발에 대한 추가적 연구를 통하여 모형의 정확성을 높여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 연구비 지원(2013년 의사결정시스템 개발 연구)에 의해 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

Cho, H., Choi, H., Jung, P. and Lim, J. (2001). "A study on life cycle cost analysis of latex modified concrete pavement for

bridges." *J. of the Korea Institute of Structural Maintenance Inspection*, Vol. 5, No. 4, pp. 185-195 (in Korean).

Christopher, R. B. and Greenwood, I. D. (2000). "Modelling road user and environmental effects in HDM-4." HTC Infrastructure Management Ltd.

Do, M. (2011). "A comparative analysis on mean life reliability with functionally classified pavement sections." *KSCE, J. of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 261-270.

Do, M. and Kim, J. (2009). "Asset evaluation method for road pavement considering life cycle cost." *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 1D, pp. 63-72 (in Korean).

Do, M., 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, pp. 311-323 (in Korean).

Haas, R., Tighe, S. L. and Falls, L. C. (2006). "Determining return on long-life pavement investments." *J. of the Transportation Research Board*, 1974, pp. 10-17.

Han, D., Do, M., Kim, S. and Kim, J. (2007). "Life cycle cost analysis of pavement maintenance standard considering user and socio-environmental cost." *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 6D, pp. 727-740.

Haugoedegaard, T. Johansen, J. M. Bertelsen, D. Gabestad, K. (1994). "Norwegian public roads administration: A complete pavement management system in operation." *Managing pavements*, pp. 25-33.

Karan, M. A., Haas, R. and Kher, R. (1976). "Effects of pavement roughness on vehicle speeds." *Transportation Research Record* 602, pp. 122-127.

Kim, Y. and Cho, W. (2005). "A study on the relationship between road design, operating and posted speeds." *J. of Korean Society of Transportation*, Vol. 23, No. 7, pp. 35-42 (in Korean).

Lemer, A. C. (2004). "Public benefit of highway system preservation and maintenance." *NCHRP Synthesis 330*, TRB, pp. 3-13.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). *4th Investment evaluation guide for transportation facilities* (in Korean).

Nakabayashi, M., Nishioka, T. and Kobayashi, K. (2007). "Current situation and challenges of maintenance activities of urban expressway." *J. of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 63, No. 4, pp. 494-505.

Park, J. (2003). "Speed prediction model by pavement roughness." *Thesis of Master Degree*, Chung-Ang University.

Shin, H., Sung, K. and Heo, J. (2010). "Derivation of modified anderson-darling test statistics and power test for the gumbel distribution." *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 9, pp. 813-822 (in Korean).

Zaabar, I. and Chatti, K. (2012). "Effect of pavement conditions on fuel consumption, tire wear and repair and maintenance costs." *Proceeding Paper, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology*, Stockholm, Sweden.