

도로포장자산관리를 위한 한국형 생애주기비용 모형 개발

한대석* · 도명식**

Daeseok HAN*, Myungsik DO**

Development of Korean Life Cycle Cost Analysis Model for Road Pavement Asset Management

ABSTRACT

Road pavement management is an important activity that affects to national economy, movement and safety of people, and also demands huge amount of budget. Therefore, its management strategy must be established under objective information. In addition, decision support system that produces the management strategy needs to consider practical benefits from various aspects. Considering these aspects, this paper aimed to develop a customized Korean life cycle cost analysis model estimating various effects on road users and socio-environmental costs based on pavement condition. The suggested LCCA model focused on Korean national highway, and tried to adopt a national guideline recommended by Korean government for securing credibility of estimation results. In the development processes, some of the suggestions that do not fit well in the situations of pavement management field were added, altered, or partially modified. These attempts to develop customized asset management system would be an important step to break away from passive attitudes relying on ready-made software, but also to improve awareness about the social benefits from the better maintenance strategy.

Key words : Road asset management, Life cycle cost, Road users cost, Korean national highway

초록

도로관리는 도로의 건설과 동시에 반 영구적으로 지속하여야 하는 행위로서, 막대한 예산이 소요됨은 물론 국가 경제 및 국민의 이동과 안전에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 이와 관련된 전략은 당연히 객관적인 정보 하에 수립되어야 하며, 그를 뒷받침 하는 의사결정시스템은 도로투자 효과에 대한 사회적 편익을 보다 현실적이고 다양한 측면에서 고려하여 개발될 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 관리자비용은 물론 도로포장 상태를 함수로 하여 도로이용자 및 사회환경비용을 예측할 수 있는 한국형 생애주기비용모형을 개발하고자 하였다. 제시된 모형은 우리나라 국도 실정에 맞추어 개발되었으며, 결과의 공신력을 확보하기 위해 정부(국토교통부)가 제시하는 투자평가지침을 가능한 참조 하되 포장관리분야의 실정에 맞지 않거나 개선의 여지가 있는 사항들에 대해서는 추가, 대체, 부분수정을 통해 개발되었다. 이러한 자기화 된 시스템을 개발하고자 하는 시도는 그간 상용화된 분석프로그램에 의존하던 소극적 도로자산관리를 탈피함은 물론, 도로관리로 인한 사회적 편익에 대한 인식개선에 중요한 첫걸음이 될 것이다.

검색어 : 도로자산관리, 생애주기비용, 도로이용자비용, 한국국도

1. 서론

1966년 de Weille가 차량운행비용(Vehicle Operating Cost; VOC)에 대한 접근을 시도한 이래, 차량으로 인해 발생하는 다양한

* 정회원 · 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로포장연구실 수석연구원, 공학박사 (hands@kict.re.kr)

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

Received December 18 2012, Revised March 12 2013, Accepted June 4 2013

영향들을 계량화하고자 하는 노력은 현재까지도 꾸준히 이어지고 있다(de Weille, 1966; AASHTO, 1978; Bennett, 1989; MLTM, 2011; Chatti et al., 2012). 이러한 연구들 대부분은 도로확충이나 우회도로신설, ITS(Intelligent Transport Systems)의 파급효과 등 교통 관련 투자사업의 타당성을 분석하는데 초점을 두고 진행되어 왔으나, 최근에는 도로관리전략에 대한 평가에도 주요한 항목으로 여겨지고 있다(FHWA, 1998; Bennett et al., 2000; Han, 2011; Han et al., 2007). 도로자산관리분야에서의 경제성 평가가 교통계획분야와 다른 점은 새로운 사회간접자본시설의 건설이 아닌 이미 건설된 시설물에 대한 유지보수전략을 대상으로 한다는 점과 생애주기비용이 포장상태를 함수로 하여 도출되어야 한다는 점이다. 그러나 국가가 관리하는 대규모 사회간접자본시설을 대상으로 한다는 점과 유지관리행위로 인한 사회적 편익에 대한 인식 부족, 그리고 연구 및 자료수집에 막대한 시간과 자본이 필요하다는 점들은 도로자산관리분야에 대한 활발한 연구를 방해해왔다. 그런 이유로 많은 나라에서 유지보수비용에만 관심을 두는 관리자 지향형 포장관리시스템을 운영하고 있다. 그러나 최근 에너지 및 환경(지구 온난화), 인간의 시간가치와 안전에 대한 관심이 높아지면서 세계은행(World Bank)이나 TRB(Transportation Research Board), 미연방도로국(FHWA; Federal Highway Association)등 선진국의 교통 관련 연구기관이나 국제기구 등을 중심으로 도로유지관리전략에 따른 도로이용자 및 사회환경비용 변화에 대한 접근이 시도되고 있다(PIARC, 2000; Chatti et al., 2012; FHWA, 1998). 이러한 이용자 지향형 자산관리모형은 도로 이용자 및 사회환경비용에 대한 계량화를 통해 도로관리의 중요성을 대중에 인식시킴은 물론 사회적 손실을 최소화하고 한정된 예산의 비용-효율성을 증진하는 데에도 핵심적 도구로 활용될 수 있다. 그러나 기존에 개발된 분석모형들은 보통 그 규모가 매우 크고 복잡하며, 요구하는 자료와 정보가 과다하여 활용이 쉽지 않다. 또한, 세부모형이 특정국가의 이질적인 환경하에서 얻어진 자료들을 기반으로 개발되는 경우가 많아 모형의 이전성에도 많은 문제가 있다. 즉, 이미 개발해 놓은 모형의 활용조차 쉽지 않고, 도출된 결과의 신뢰도도 의심받을 수밖에 없다. 이렇게 되면, 도로관리자의 정보수요와 시스템 운영능력에 부합하는 자기화(customized) 된 시스템을 직접 개발해야 한다는 결론에 도달한다. 그러나 이러한 자기화 된 시스템의 개발도 분석항목 및 분석기법의 다양성, 광범위한 연관분야, 정성적 요소, 전략적으로 누적되어 많은 자료, 기반연구의 부재 등으로 쉽게 시도되기 어려운 실정이다.

한편, 국토해양부는 교통시설투자에 대한 사전·사후 타당성 평가에 활용할 수 있도록 “교통시설 투자평가지침(이하 “국토해양부 지침서”)을 개발하여 각 분야별로 다양한 경제성 평가항목과 비용 산정방안을 제시하고 있다(MLTM, 2011). 그러나 이 지침서는

교통분야의 관점에서 개발되었기 때문에 도로자산관리에 부합하는 지침을 제시하고 있지는 않다. 이에 본 연구에서는 지침서의 비용평가방안 중 일부를 도로자산관리개념에 접목해 한국형 생애주기비용 분석모형 개발에 활용하고자 하였다. 분석모형은 한국국도의 실정(자료 확보상황, 유지보수현황 등)을 최대한 고려함은 물론, 도로관리자가 쉽게 이해 및 활용할 수 있도록 모형의 일반화/간소화에 주안점을 두었다. 또한, 예측결과의 공신력 확보를 위해 가능한 지침서의 모형을 충실히 구현하되 포장관리현실에 부합하지 않는 사항에 대해서는 제정의, 수정, 추가 등의 작업을 통해 분석모형의 틀과 세부사항을 결정하였다.

본 논문에서 제시하는 생애주기비용분석모형은 중장기 평가모형 중 하나로, 유지보수 전략에 따른 네트워크 수준에서의 공용성과 경제성을 평가할 수 있도록 모형화되었다. 이는 도로자산관리를 위한 분석모형 중 가장 일반적인 형태로 향후 보다 구체적이면서도 맞춤형 정보를 도출하기 위한 자기화 시스템 개발에 중요한 기반연구로 활용될 수 있을 것이다. 나아가, 본 연구에서 제시하는 자산관리개념에 입각한 분석과정은 도로포장 외에도 파손 및 유지보수과정을 반복하는 다른 사회간접자본시설에도 참조 가능한 사항이므로 그 활용성이 높다고 하겠다. 한편, 생애주기비용분석을 위해 개발된 다양한 세부모형과 의사결정과정을 한 편의 논문에서 심도 있게 다루기에는 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 개발전략, 분석의 틀, 그리고 활용사례를 중심으로 기술하기로 하며 세부모형에 대한 구체적 내용은 향후 논문에서 다루기로 한다.

2. 생애주기비용 분석모형의 개발방안

2.1 모형개발의 기본전략

본 논문에서는 도로포장관리분야를 위한 생애주기비용 분석모형개발의 핵심을 1) 계량화 항목의 결정, 2) 포장관리를 목적으로 하는(즉, 포장상태를 함수로 하는) 생애주기비용모형의 틀 제시, 3) 생애주기비용 및 세부모형의 일반화와 간소화를 통한 활용의 용이성 확보, 4) 도출결과의 신뢰성 확보로 설정하였다.

먼저 계량화할 항목의 정의는 도로유지보수로 인해 편익이 발생하는 항목을 정의하는 것이다. 물론, 가능한 많은 항목을 포함하는 것이 도로투자 효과를 설명하는 데 유익하나 모형개발이나 활용에 어려움이 따르기 때문에 정보수요와 자료의 한계를 고려하여 정의될 필요가 있다. 또한, 각 항목의 중요도가 다르므로 개발의 우선순위를 정해두는 것이 바람직하며, 자료나 정보의 한계로 개발이 여의치 못한 경우 중요도에 따라 핵심 부분부터 개발하되 향후 지속적으로 개선해 나가는 전략이 필요하다.

두 번째로 포장상태를 함수로 하는 생애주기비용모형 개발은 본 논문의 가장 핵심적 사항이다. 만약 생애주기비용이 교통계획본

야처럼 총 주행거리나 속도의 함수로만 예측된다면, 대안 간의 비용차이는 관리비용에서만 발생하게 되며, 예측된 도로이용자 및 사회환경비용은 단순한 정보에 불과할 뿐 경쟁적 대안의 우선순위 결정에 활용될 수 없다.

다음으로 세부분석모형 및 필요자료의 일반화, 간소화가 요구된다. 이는 현재 상용화된 프로그램들의 활용단계에서 나타난 가장 큰 문제점이라고 할 수 있다. 사실 생애주기비용 분석에서 다루고자 하는 항목이나 이를 뒷받침하는 세부모형들은 대부분 고유한 연구영

Table 1. A development plan considering the “A Guidebook for Investment of Transportation Facilities (MLTM, 2011)”

Cost contents and sub-models		Korean guidebook (MLTM, 2011)	Korean life cycle cost analysis model (this study)	
			Modeling plans	Typical results
Agency costs	Maintenance (1)*	<ul style="list-style-type: none"> Based on expressway maintenance costs Operational cost (15% of the expressway) 	<ul style="list-style-type: none"> Altered by annual condition based model By maintenance types 	<ul style="list-style-type: none"> Budget demands by maintenance type/year/section (Discounted and undiscounted)
	Inspection(2)	No index	<ul style="list-style-type: none"> Available but excluded from the definition 	
	Construction and residual cost (3)			
Road user costs	Vehicle operating costs (2)	<ul style="list-style-type: none"> Fuel + engine oil+ tire + vehicle maintenance + vehicle depreciation By a function of vehicle operating speed by a vehicle type Num. of vehicle types: 6 types 	<ul style="list-style-type: none"> Same definition in contents By a function of total VOC Num. of vehicle type: 12 types Development of vehicle speed model is required 	<ul style="list-style-type: none"> Vehicle operating cost, travel time cost, and vehicle emission cost by a vehicle type/section/year Traffic accident cost by a fatality/section/year
	Travel time cost (1)	<ul style="list-style-type: none"> Including driver and passengers By using traffic volume, travel time and time value by a vehicle type Traffic volume must be from future traffic volume analysis Based on VDF(Vehicle-Delay Function) By business/non-business hour Num. of vehicle types: 3 types 	<ul style="list-style-type: none"> The future traffic demand analysis is excluded Num. of vehicle types: 12 types By business/non-business hour Without classification in region Development of vehicle speed model is required 	
	Traffic accident costs (3)	<ul style="list-style-type: none"> By travel length and accident rate by fatalities By human and property No vehicle classification 	<ul style="list-style-type: none"> Development of pavement condition-based accident cost estimation model is required 	
Socio-environmental cost	Emission costs (1)	<ul style="list-style-type: none"> For 5 compound from vehicle emission (CO, CO₂, HC, PM, NO_x) By unit pollutant loads by 10km/hr Num. of vehicle types: 7 types 	<ul style="list-style-type: none"> Same definition in contents Development of estimation functions by a compound type Num. of vehicle types: 12 types 	
	Noise cost	<ul style="list-style-type: none"> Defined by costs for soundproof walls Unit cost per equivalent noise reduction 	<ul style="list-style-type: none"> Available but excluded from the definition 	
Sub-models	Deterioration forecasting model (1)	No index	<ul style="list-style-type: none"> Described by multiple deterioration speeds for applying Markov process 	<ul style="list-style-type: none"> Deterioration speeds, life expectancy by a rating Maintenance timings Free speed and operating speed by a vehicle type/section/year Annual traffic volume by a vehicle type (differed by model choice) Num. of traffic accidents by a section/year Priority order of applied alternatives
	Vehicle speed model (2)		<ul style="list-style-type: none"> Pavement condition-based vehicle speed estimation model 	
	Future traffic volume generation (2)		Selectable from: <ul style="list-style-type: none"> Uniformed method-based on initial traffic Space-free multi-distributions based Monte-Carlo method 	
	Traffic accidents (3)	<ul style="list-style-type: none"> Hazard exposure method 	<ul style="list-style-type: none"> Pavement condition-based model 	
	Economic decision indices (2)	<ul style="list-style-type: none"> Main index: Benefit cost ratio (B/C) Sub-indices: Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR) 	<ul style="list-style-type: none"> B/C and NPV Plus, EUAC(Equivalent Uniformed Annual Cost) 	

Note: *Priority orders are in the parenthesis

역을 가지고 있어 상당히 미시적인 수준까지 다룰 만큼 이미 많이 진보되어 있다. 기존모형에서 이러한 분석모형들을 그대로 시스템에 도입하게 되면서 도로관리분야에서 일반적으로 수집되고 있는 자료로는 제대로 활용하기 어려운 경우가 빈번히 발생하게 되었다. 즉, 적절한 수준에서 일반화, 간소화를 통한 선행개발을 시도한 후, 이후 정보수요에 따라 양적/질적 개선을 꾀하는 전략이 필요하다.

마지막으로, 분석결과와 신뢰성은 분석결과가 정책을 결정하는데 유용한 근거로 활용될 수 있을지, 정보수준으로 남게 될지를 결정하는 중요한 항목이다. 분석결과와 공신력은 자기화된 모형을 자체 개발하거나, 이미 개발된 모형을 국내실정에 맞게 보정하는 절차를 거쳤을 때 확보할 수 있다. 한국은 국토해양부에서 “교통시설 투자평가지침”을 통해 국가교통시설에 대한 경제성 평가지침을 제시하고 있다. 물론 이 지침서는 도로자산관리에 필요한 기준과 방향성은 다루고 있지 않지만, 국내에서 수행된 연구결과를 기반으로 이용자 및 사회환경비용에 대한 도출방안을 제시하고 있어 이를 충실히 활용하면 분석결과와 공신력을 한정적으로 확보할 수 있다고 여겨진다. 따라서 도로자산관리기법의 틀을 제시하고, 교통분야에 맞추어 제시된 세부기준과 비용산정모형을 도로포장관리분야의 특성에 맞게 수정 및 보완하는 작업은 본 논문의 핵심이라 할 수 있다.

2.2 생애주기비용항목 정의 및 모형화

국토해양부 지침서가 제시하고 있는 도로부문의 경제성 평가항목을 살펴보면, 투자편익을 직접편익과 간접편익으로 구분하고

있고, 이 중에서 직접편익만을 계량화 대상으로 정의하고 있다 (MLTM, 2011). Table 1은 교통시설투자지침의 관련 내용을 도로자산관리의 관점에서 고찰한 모형화 계획을 제시하고 있다.

지침서에서 지정하고 있는 도로이용자 및 사회환경비용에 대한 항목은 포장관리분야의 대표적 모형 중 하나인 HDM-4(Bennett et al., 2000)나 최근 미국에서 수행된 NHCRP Report 720(Chatti et al., 2012), 기타 한국을 대상으로 수행된 바 있는 선행연구(Do et al., 2006, 2007; Han et al., 2007)에서 고려했던 항목들과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편, 본 논문에 언급되고 있는 “한국형”의 개념은 “한국실정에 적합한”과 같은 의미이다. 즉, 한국의 도로관리 실정과 평가기준, 그리고 분석에 필요한 세부모형과 입력정보들을 우리나라에서 얻어진 자료들을 통해 모형을 구축, 보정, 활용하는 것을 의미한다. 이중 가장 핵심적 항목은 1)도로과손예측함수의 도출, 2)이용자 및 사회환경비용모형의 국내화, 3)분석속션(분석기간, 할인율, 차종구분, 각종 비용의 원단위)의 결정으로 이들에 대한 국내화가 이루어지지 못하면 분석된 결과는 신뢰할 수 없게 된다. 본 연구에서 제시하고 있는 한국형 생애주기비용 모형을 현재 세계적으로 폭넓게 분포되어 있는 HDM-4 (현재 한국국도에도 활용 중), RealCOST, 그 외 일본에서 개발된 PMAS (Pavement Management Accounting System)(Kobayashi et al., 2008)등과 간단히 비교하면 Table 2와 같다.

Table 1에 소개된 내용 외에도 MicroBENCOST, RoSy SYSTEMS, MicroPAVER등 다양한 모형들이 존재한다. 이들은

Table 2. Comparison of the Korean LCCA model with existing LCCA models

Contents		K-LCCA (This study)	HDM-4 (current model in use) (PIARC, 2000)	RealCOST (FHWA, 1998)	PMAS (Kobayashi et al., 2008)
Developer		Korea	World Bank	FHWA(U.S.)	Japan
Analysis framework		Fiscal year	Fiscal year	Years only when maintenance conducted	Fiscal year
Deterioration forecasting function	Model type	Multiple deterioration speeds extracted from statistical/stochastic model	Annual deterioration by Dynamic mechanistic/empirical model	Expert system (By direct input of life expectancy by users)	Simplified regression for annual deterioration in MCI (Maintenance Control Index)
	Model estimation	By inspection data from Korean national highway in 2007~2010	By finding calibration factors included in the basic estimation function	By relying on field experience, or preparatory analysis	By using field data based on Japanese condition index
Road users and socio-environmental costs		VOC, travel time cost, traffic accident cost, emission cost by Korean model (MLTM, 2011)	VOC, travel time cost (by using models developed by various countries)	Additional VOC, travel time cost due to work-zones	Additional VOC, travel time cost due to work-zones
Note		Self-definition for maintenance environment only for Korean national highway	Developed for unknown users Too many input variables Calibration/domestication matters	Self-definition for domestic usage in U.S. Abnormal definition to LCC property	Self-definition for Mie prefecture based on domestic pavement condition index(MCI)

각각 생애주기비용의 항목과 정의, 추정기법에 상당한 차이를 보이고 있으며, 당연히 입력자료와 분석결과물의 항목과 형태도 상이하다. 이렇게 다양한 모형이 존재함에도 특정한 모형에 대한 선호가 두드러지지 않는 이유는 단순히 개발자에 의해 일방적으로 정의된 모형은 불특정 다수의 시스템 운영능력과 정보수요를 충족시킬 수 없기 때문이다. 즉 도로자산관리시스템의 지속 가능한 개발은 자기가 원하는 모형을 직접 정의/개발하고 정보수요/운영능력에 맞추어 개선해 나가는 것이라 할 수 있다.

2.3 분석의 틀 제시

도로포장상태기반 생애주기비용분석에 필요한 구성을 요약하면 1) 포장정보DB(Database) 구축 및 이상치 제거과정, 2) 연도별 도로상태예측 (유지보수 효과포함), 3) 관리자비용 예측, 4) 교통량 예측, 5) 차종별 차량 속도예측, 6) 이용자비용 예측, 7) 환경비용 예측, 8) 경제성 평가지표 도출, 9) 피드백(feedback)과정으로 요약할 수 있다. 이 과정들을 수행하기 위한 세부모형으로는 도로파손예측모형, 관리자비용모형, 차량운행속도모형, 차량운행비용모형, 통행시간비용모형, 교통사고비용모형, 환경비용모형, 교통량 발생모형, 경제성 평가모형이 필요하며, 한 모형에서 도출된 결과가 다른 모형의 입력자료로 활용되는 구조를 갖게 된다. 분석결과에 가장

큰 영향을 미치는 핵심변수는 포장의 파손속도, 유지보수기준, 교통량, 차량운행속도, 각종 원단위가 있다. 각 모형을 통해 전형적으로 얻어질 수 있는 결과물들은 Table 1에 간략히 요약된 바 있으며, 이들의 응용 및 조합을 통해 보다 다양한 정보도출도 가능하다. 본 논문에서 제시하는 생애주기비용분석의 흐름도는 Fig. 1과 같다.

3. 한국형 생애주기비용분석모형의 개발

분석모형의 정의는 투자지침에서 제시하고 있는 내용을 최대한 활용하는 것을 원칙으로 하였으며, 본 절에서는 한국형 생애주기비용 모형의 정의와 관련된 핵심사항에 대해서만 간략히 서술하기로 한다.

3.1 관리자비용

포장관리분야에서 관리자비용은 유지보수비용(변동비)으로 한정되는 것이 일반적이다. 우리나라 국도는 회계연도를 기준으로 매년 조사되는 포장상태지표를 참조하여 유지보수 시행 여부를 결정하고 있는 점을 고려하면 “연도/구간/상태지표별”로 포장상태를 예측하는 결정론적 모형이 보다 우리나라 현실에 부합한다고

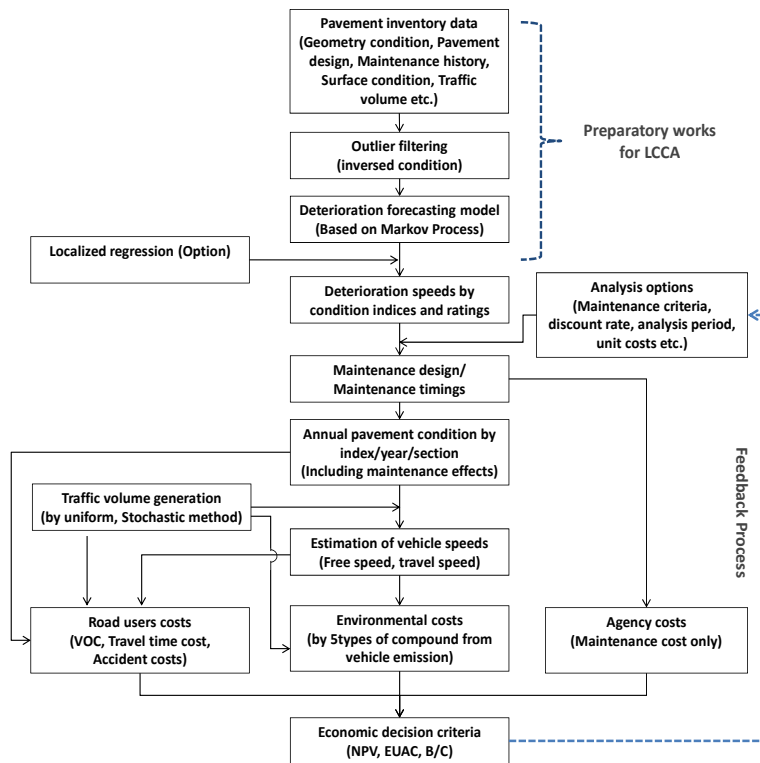


Fig. 1. A flowchart for pavement condition-based life cycle cost analysis model

볼 수 있다. 그러나 포장파손과정의 불확실성 때문에 결정론적 모형보다는 확률론적 모형이 더 많이 활용되며, 그 중에서도 마르코프 전이확률모형(Markov transition probability model)이 가장 널리 활용되고 있다 (Kobayashi et al., 2010, 2012; Han et al., 2012c; Yang et al., 2005; Tsuda et al., 2006). 마르코프 전이확률 모형은 분석가가 정의한 이산적(discrete) 포장상태별로 기대수명을 도출하고, 이들을 조합하여 포장파손속도의 변화과정을 (곡선으로) 평가한다. 여기서 도출된 기대수명들을 단위시간 당 파손량으로 변환시켜 분석에 활용하면 확률모형에서 도출된 파손특성을 그대로 연도기준 파손과정예측에도 활용할 수 있게 된다. 본 연구에서는 마르코프 과정을 기준으로 한 파손과정에 유지보수시행에 따른 상태회복과정을 포함하여 파손과정을 정식화하였다.

3.2 도로이용자비용

본 연구에서의 도로이용자비용은 차량운행비용, 통행시간비용, 엔진오일비용, 차량수리비용, 차량감가상각비용으로 정의되며, 해당 도로를 분석기간 내 이용하는 모든 차량을 대상으로 편익을 추정한다. 한편, 도로포장상태가 차량통행속도에 영향을 미친다는 연구성과(Hide et al., 1975; Morosiuk et al., 1982; Watanatada, 1981)에 의거, 차량운행속도 예측에 포장상태를 매개 변수로 활용되는 구조를 통해 도로이용자비용에 접근하고자 하였다(Fig. 1 참조).

3.2.1 차량운행비용

먼저, 차량운행비용과 관련된 선행연구를 살펴보면 대부분 1) 유류, 2) 엔진오일, 3) 타이어, 4) 차량유지보수, 5) 차량감가상각을 대상으로 하고 있으며(de Weille, 1966; Bonny et al., 1967; AASHTO, 1978; Goodman et al., 2006; Uddin et al., 1998; Han, 2011; Chatti et al., 2012), 국토해양부 지침서도 이와 동일한 정의를 내리고 있다. 지침서에서의 차량운행비용 예측모형은 차량운행속도만을 변수로 활용하는 구조를 취하고 있으며, 차종을 기본 예측단위로 하고 있다. 또한, 예측식 없이 매 10km/h 별 차량운행비용의 원단위를 제시하고, 중간속도는 3차 회귀식을 이용하여 산출할 것을 제시하고 있다. 그러나 본 연구에서 3차 식의 적합성을 살펴본 결과 일부 예측함수들의 적합도 R^2 가 0.9 이하로 나타나는 경우가 발생하여 4차 식으로 확장시켜 적용하였다.

3.2.2 통행시간비용

국토해양부 지침서에서는 통행시간은 BPR (Bureau of Public Road)식을 토대로 개발된 통행량 지체 함수(VDF; Volume-Delay Function)식을 제시하고 있으나 VDF 함수식은 차종별이 아닌 도로유형(고속국도, 일반국도, 지방도)별로 제시되어 있고 포장상

태도 고려될 수 없으므로 도로관리분야에 적합한 모형이라고 보기 어렵다. 본 연구에서의 통행시간예측 모형은 가장 일반적인 형태인 “주행거리/통행속도” 함수식을 따르고 있다. 따라서 비용예측의 핵심은 포장상태기반 차량통행속도 예측모형의 개발이라 할 수 있다.

교통분야에서의 차량운행속도(혹은 통행시간)예측은 칼만필터링(Kalman filtering), 인공신경망(artificial neural network), 퍼지(fuzzy)이론 등 대부분 경험적/미시적 관점에서 접근하고 있기 때문에 포장관리분야의 일반적 자료로는 적용이 다소 어려우며, 또한 포장상태를 변수로 활용하는 모형도 찾아보기 어렵다. 현재 국토포장관리시스템에서 구간별로 관리하고 있는 자료는 국토교통량조사체계(TMS; Traffic Monitoring System)에서 얻어지는 연평균일교통량(AADT: Average Annual Dairy Traffic) 수준이며, 기하구조 정보도 차로수에 한정된다. 여기에, 연도별 포장상태 정도가 분석과정의 중간결과로써 얻어질 수 있다. 즉, 국토 전체의 구간별/차종별 운행속도의 예측은 순수교통분야의 일반적 관점에서 비추어 볼 때 상당 부분 가정에 의존할 수밖에 없는 상황이다. 본 연구에서는 미국도로용량편람(HCM; Highway Capacity Manual)의 기본개념을 응용하여 포장상태와 교통류의 영향이 동시에 고려됨은 물론 현재의 국토 포장관리시스템에서 수집되고 있는 한정된 자료만으로도 예측할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 도로의 물리적/운영적현황(도로의 제한속도, 경사도, 굴곡도, 도로폭, 포장상태)를 통해 자유속도를 예측한 후, 교통류로 인한 추가적 감속분을 적용하는 구조이다(Bennett et al., 2000; TRB, 2000). 참고로 경사 등의 기하구조는 향후 자료의 확보 가능성을 염두하여 모형화를 했지만 본 연구에서의 시뮬레이션에서는 모두 평지로 가정된다. 본 연구에서 제시한 차량운행속도 예측모형의 가장 큰 특징은 시간대별 모형이 아닌 일교통량 기준으로 모형을 구성함으로써 시뮬레이션의 구조를 크게 간소화했다는 점이다. 보통 교통분야에서는 차로-단위시간을 기준으로 교통류를 분석하는 것이 일반적이나 전 네트워크의 시간대별 교통량 자료를 확보하는 것은 현실적으로는 불가능하다. 또한, 포장관리분야의 일반적인 분석기간이 30~40년 수준이라는 점을 참작하면 모형의 간소화는 불가피하다.

3.2.3 교통사고비용

교통사고비용은 위험에 노출된 정도, 즉 “사고율과 주행거리”의 함수로 산정하는 것이 일반적이다. 지침서에는 고속국도, 일반국도, 지방도를 기준으로 취합된 총 주행거리와 사고유형별 발생률을 고려하여 사고 건수/사망자 수/부상자 수를 예측한다. 이를 그대로 따르게 되면 네트워크 수준의 모형이 되기 때문에 도로구간별 교통사고건수 및 비용산정이 불가능하고 포장상태 또한 변수로

활용될 수 없다. 본 연구에서는 지침서에서 제시하는 사고유형의 구분과 원단위 활용구조는 그대로 유지하되 이를 구간기준으로 변환하여 포장상태에 따른 영향을 모형화하고자 하였다.

사실 교통사고가 발생한 당시의 포장상태를 조사하지 않는 모형화가 어려우므로 이에 관한 모형이나 선행연구도 찾아보기 어렵다. 그러나 최근 Chan et al. (2009)은 미국 테네시(Tennessee)주의 방대한 교통사고이력 데이터베이스와 포장관리시스템의 자료를 연동하여 사고의 다양한 원인에 대해 분석을 시도한 바 있다. Chan et al. (2009)이 제시한 모형식은 인치-마일(mile) 단위로 제시되어 있어 이를 m/km단위로 변환시킨 후 설명변수에 중단평탄성(IRI; International Roughness Index)를 대입시키는 일반화 작업이 필요하다. 또한, 우리나라와 미국의 교통환경, 법규, 도로구조, 운전행태가 달라 모형의 이전성에 대한 논란이 있을 수 있기 때문에 보정팩터를 도입하여 다음과 같이 모형을 재구성하였다.

$$NA_{ys}^p = \left[\omega \times \left[\exp \left\{ a_1 + a_2 \ln(AADT_{sy}) + a_3 \left(\frac{x(IRI_{sy}) \times 1.61 \times 100}{2.54} \right) \right\} \right] \times 6.21 \right] \times l_s \times R_p \quad (1)$$

여기서,

- NA_{ys}^p : 구간 s , 분석연도 y 에서의 교통사고 건수 p
- R_p : 사고유형 p 의 교통사고율
- p : 인적사고(사망/부상)와 물적사고(차량/대물피해)
- ω : 모형 보정계수 (default = 3.23)
- $a_1 \sim a_3$: 모형계수 (통합조건: -5.833, 0.657, 0.005) (Chan et al., 2009).

Eq. (1)에서의 보정계수 ω 는 모형 자체가 도로연장을 기준으로 하고 있기 때문에 1km당 발생건수의 비율을 고려하여 산정하였다. 국토해양부 지침서에서는 2009년 통계자료를 기준으로 하고 있으므로, 당시의 국토 평균IRI(2.646m/km)값 (한국건설기술연구원 내부자료 활용)과 AADT(12,374대/일) (TMS, 2012), 국토연장(13,464.2km, 시관리구간포함, 미개통/미포장도는 제외) (Statistics Korea, 2012)을 모형에 대입하여 보정계수를 산출한 결과 ω 는 3.23으로 산정되었다.

3.2.4 장래교통량 예측모형

본 연구에서 제안한 생애주기비용 분석모형은 연도기준 모형으로 분석기간 내내 차종/연도/구간별 교통량이 요구된다. 이런 경우 분석 초기연도의 교통특성(AADT, 차종구성비)을 분석기간 끝까

지 유지하는 균일배정법이나 증감률을 적용한 복리증가법을 활용하게 되는데, 장기분석기간으로 인해 예측교통량이 용량을 초과해 버리는 오류를 배제하기 위해 보통 균일배정법이 더 많이 활용하고 있다(Do et al., 2006, 2007; Han et al., 2007, 2012a, 2012b). 그러나 여기에서 우리는 항상 너무 쉽게 가정해 버리는 이 장래 교통량에 대해서 고찰해 볼 필요가 있다. 먼저, 1) 국토교통량조사체계의 조사 특성상 AVC(Automatic Vehicle Classification)장비를 활용하는 상시조사구간이 아니면 교통량 자료가 비정상적일 가능성이 있다. 2) 또한, 분석가가 연구목적을 충족시키기 위해 인위적으로 합당한 조작하는 시도하는 경우도 예상할 수 있다. 3)마지막으로 분석 자체가 시뮬레이션의 성격을 띠는 만큼 교통량의 증감특성(분산, 지역성, 입계특성 등)이 보다 현실적으로 묘사될 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 균일배정법 외에 1)공간이동-다분포-몬테카를로(Monte-Carlo) 기법, 2)단일공간-단분포-몬테카를로 기법을 개발하여 이용자가 분석 시 선택할 수 있도록 하였다. 모형의 이론적 배경과 상세한 기법은 향후 논문에서 심도 있게 다루기로 한다.

3.2.5 차종분류기준 재정립

양적인 교통량은 물론 질적인 차종의 구성은 도로파손과정은 물론 도로이용자비용의 산정에 중요한 변수이다. 특히 차종의 특성(교통하중, 승차인원 등) 정의는 매우 중요한 사항이다. 국토교통량 조사체계는 12종을 기준으로 차종을 구분하고 있으나(TMS, 2012), 국토 포장관리시스템은 7종으로 분류하고 있으며, 그 외 국토해양부 지침서에서도 모형 별로 다른 차종기준을 적용하고 있다. 일반적으로 차종의 구분은 1) 차량의 외형 및 이용특성, 2) 차량 단위 수, 3) 승차정원(승합차의 경우), 3) 차량 축 수, 4) 바퀴 수, 5) 화물 운용량 등을 참조하여 결정되나(Han, 2011; FHWA, 2001; Bennett et al., 2000; KICT, 2008), 관련 문헌 내 포함된 정보의 한계로 화물운용량과 승차정원을 중심으로 재편성을 시도하였다. 아울러 분석에 필요한 차종구성비는 도로교통량 통계연보의 가장 최근 정보인 2008~2011년의 평균치를 활용하였다. 차종재구성과 관련된 고찰을 통해 우리나라 공공부문에서 활용되고 있는 차종구분 기준 간에 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 이러한 차이는 생애주기비용의 규모는 물론 도로포장의 성능분석에도 많은 영향을 미치기 때문에 통합형 차종분류기준에 관한 연구가 시급하다.

4. 생애주기비용 분석모형을 활용한 유지보수 전략

생애주기비용분석을 활용한 유지보수 전략수립을 위해 전체 국도를 대상으로 분석하는 방안도 검토해 보았으나, 본 연구에서

제시한 분석모형의 예측특성을 포장상태와 연계하는 것이 연구의 목적에 부합된다고 판단하여 국도의 특성을 대표하는 하나의 가상 구간을 만들어 다양한 유지보수전략을 기준으로 한 모형의 민감도를 확인해보았다. 본 절에서는 1) 유지보수 대안 별 포장상태 변화과정 및 도로서비스 수준, 2) 도로상태변화에 따른 차량운행속도, 이용자 및 사회환경비용의 변화과정, 3) 유지보수 대안 별 생애주기 비용 및 경제성, 4) 차량속도 변화로 인한 편익의 일반화에 대해 고찰해 보기로 한다.

4.1 분석옵션 및 유지보수 대안 설정

본 연구에서 제시된 한국형 생애주기비용 분석모형은 국도를 대상으로 개발되었기 국도와 관련된 자료들을 종합해 분석옵션을 결정하였다. 국도의 교통특성은 가장 최신의 도로교통량통계연보 (TMS, 2012)를 활용하였으며, 포장파손속도는 국도 전체 포장상태자료를 활용한 연구 중 가장 최근 연구인 Han et al. (2012c)의 결과를 참조하였다. 한편, 대표구간을 단위 km로 설정하였기 때문에 도출된 결과에 전 국도연장을 고려해주면 국도 전체를 대상으로 한 시뮬레이션의 근사치를 얻을 수 있다.

Table 3. A brief summary of simulation options

Contents		Definitions		
Section info. (A virtual section representing Korean national highways)	Geometric condition	Road design: unit length=1km, num. of lanes = 2.91, width of a lane=3.5m, shoulder =1.5m Slope and horizontal curvature: straight (assumption)		
	Traffic condition	AADT: 12,516 (TMS,2011), uniformed during analysis period Speed limit: 80km/h		
Pavement deterioration characteristics	Deterioration index	Initial condition (averaged condition in 2011)	Maintenance effect (Reset condition)	Deterioration speed
	Crack	3.535%	0.00%	Refer to Table 4
	Rutting	7.351mm	2.00mm	
	IRI	2.295m/km	1.00m/km	
Analysis period and discount rate		30 years, 5.5% (MLTM, 2011)		

Table 4. Pavement condition rating systems and corresponding pavement deterioration speeds

Condition states	Standard for ratings			Life expectancy by a rating			Deterioration speed by a rating		
	Crack (%)	Rutting (mm)	IRI (m/km)	Crack (year)	Rutting (year)	IRI (year)	Crack (%/year)	Rutting (mm/year)	IRI (m/km/year)
1	~0.5	5	2	1.53	2.39	2.03	0.33	2.09	0.99
2	~5	10	2.5	4.19	14.23	1.55	1.07	0.35	0.32
3	~10	15	3	2.27	15.99	1.56	2.20	0.31	0.32
4	~15	20	3.5	1	6.35	1.35	5.00	0.79	0.37
5	15~	20~	3.5~	-	-	-	-	-	-

Source: Han et al. (2012c)

Table 5. Definition of maintenance alternative sets

Alternatives	Cutting + Rut-resist pavement 50mm overlay	Cutting + Conventional hot-mix asphalt 50mm overlay	Conventional hot-mix asphalt 50mm overlay	Note
Alternative 1	Rutting 15mm	1) Crack 20% or 2) Rutting 10mm	1) Crack 10% or 2) Rutting 10mm	
Alternative 2(Current criteria) (KICT,2009)	Rutting 20mm	1) Crack 30% or 2) Rutting 15mm	1) Crack 20% or 2) Rutting 10mm	Base alternative
Alternative 3	Rutting 25mm	1) Crack 35% or 2) Rutting 20mm	1) Crack 25% or 2) Rutting 15mm	
Alternative 4	Rutting 30mm	1) Crack 40% or 2) Rutting 25mm	1) Crack 30% or 2) Rutting 20mm	
Maintenance unit costs (Million KRW/lane/km)	71.31	55.23	40.04	

한편, 분석대안으로는 현재 국도의 유지보수 기준을 기준대안 (base alternative)으로 설정하고 나머지 3개 대안은 보수공법은 그대로 유지하기로 하되, 유지보수(상태적)시점 만을 변경하여 적용하였다. 즉, 현행 유지보수기준을 변경하면 발생하는 경제적 편익 혹은 손실에 대한 접근이라고 할 수 있다. 분석옵션을 Table 3~Table 5에 요약하였다.

4.2 유지보수 대안 별 포장상태 변화

Fig. 2에서는 현행 유지보수대안(대안 2)의 파손지표 별 상태변화과정을 보여주고 있다. 우선 다수 파손속도를 적용함에 따라

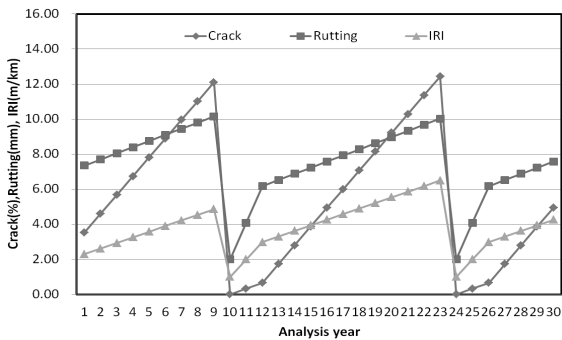


Fig. 2. Pavement condition changing history by deterioration indices (a case: base alternative)

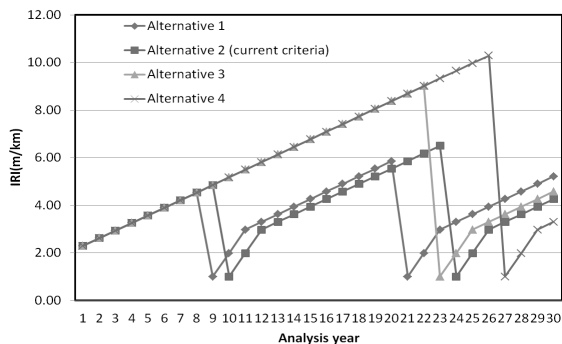


Fig. 3. Changing history of roughness (IRI) by maintenance alternatives

Table 6. A relationship between average pavement condition and vehicle operating speed

Alternative	Crack (%)	Rutting (mm)	IRI (m/km)	Average vehicle speed (km/h)	Num. of maintenance
Alternative 1	4.96	7.25	3.68	73.81	2
Alternative 2 (Current criteria)	5.45	7.42	3.77	73.69	2
Alternative 3	11.51	9.70	5.00	72.17	1
Alternative 4	14.75	10.79	5.76	71.22	1

비선형으로 포장상태가 변화함을 볼 수 있다. Fig. 3에서는 각기 다른 보수기준을 적용함에 따라 포장상태 변화과정이 다르게 진행 되면서 네트워크의 서비스 수준이 다르게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 한편, Table 6에서는 대안 별 네트워크 수준에서의 평균포장상태와 차량운행속도를 비교하고 있는데, 보수대안 간 차량운행속도의 최대편차는 2.59km/h로 나타났다.

4.3 도로상태변화에 따른 이용자 및 사회환경비용 변화

현행 유지보수 기준(대안2)을 대상으로 포장상태가 차량운행속도와 이용자 및 사회환경비용에 미치는 영향에 대해 살펴보면 (Fig. 4참조) 분석기간 내 IRI의 최소-최대치는 1.00~6.50m/km로 당시의 차량운행속도는 각각 77.12~70.31km/h였다. 이 때의 운행속도의 편차는 6.81km/h로 선형변화를 가정하면 IRI 1.00m/km당 1.24km/h가 감소한다고 볼 수 있다. 이는 기존연구 (Morosiuk et al., 1982; Watanatada, 1981)에서 각각 제시하고 있는 단위 감소량 0.62~2.57km/h/IRI의 범위에 포함된다. Fig. 5에서는 IRI 상태에 따른 이용자 및 사회환경비용의 변화과정에 대해 보여주고 있다. 역시 포장상태에 따라 민감하게 반응하고 있으며, 분석기간 내 IRI의 편차가 최대가 되는 두 시점에서의 도로이용자 및 사회환경비용의 차이를 단위화 하면 586.13백만 원/km/년으로 그 차이가

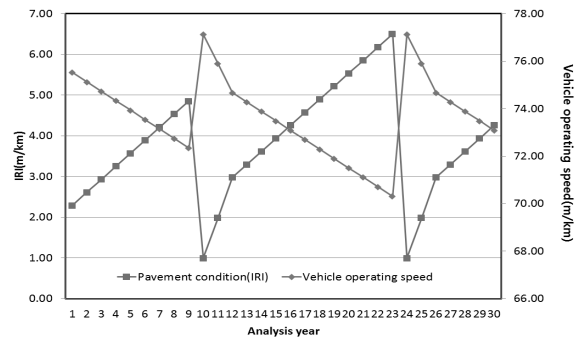


Fig. 4. Changing vehicle operating speed by pavement condition (A case: IRI, base alternative)

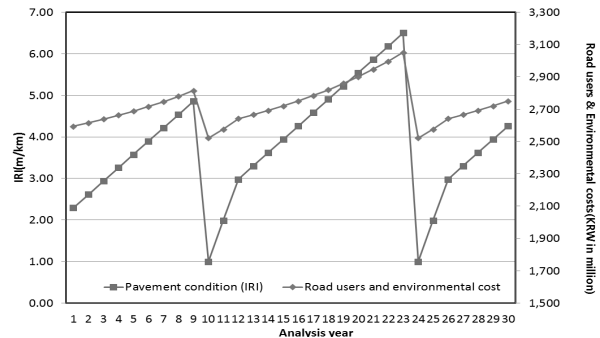


Fig. 5. Changing socio-environmental costs by pavement condition (A case: IRI, base alternative)

Table 7. LCC in EUAC by alternatives (discount rate 5.5%) (Unit: Million KRW/year)

Alternative	Maintenance cost	Vehicle operating cost	Travel time cost	Traffic accident cost	Emission cost	Total cost
Alternative 1	74.99	14,714.76	16,021.67	2,757.55	5,634.71	39,203.69
Alternative 2	68.59	14,724.17	16,058.13	2,908.17	5,637.46	39,396.52
Alternative 3	23.22	14,815.57	16,404.95	4,739.54	5,662.93	41,646.21
Alternative 4	18.75	14,856.08	16,552.43	5,955.41	5,673.18	43,055.86

Table 8. An economic evaluation by alternative (base alternative = current criteria) (Unit: Million KRW/year)

Alternative	Cost	Benefit	NPV	NPV/Cost	EUAC*	Benefit by unit vehicle speed (per 1km)
Alternative 1	6.40	199.22	192.83	30.14	2,155.20	90.63
Alternative 2	-	-	-	-	2,165.81	-
Alternative 3	-45.37	-2,295.06	-2,249.69	N/A	2,289.54	-81.14
Alternative 4	-49.85	-3,709.19	-3,659.34	N/A	2,367.07	-81.53

Note: *represent the EUAC of total cost in Table 7

상당함을 알 수 있다. 이를 전체 네트워크로 확장시키면 한해 도로관리로 얻을 수 있는 편익의 한계범위를 알 수 있다.

4.4 유지보수 대안 별 생애주기비용 및 경제분석

유지보수 대안 별 생애주기비용과 예산의 비용-효율성을 살펴보기로 한다. 현재 유지보수 기준(대안2) 대비 추가로 소요되는 관리자비용을 비용으로 설정하고 그로 얻어지는 이용자 및 사회환경비용의 감소분을 편익으로 정의한다. 경제성 평가지표로는 국토해양부 지침서에서 제시하고 있는 비용편익비(Benefit Cost Ratio)와 순현재가치(Net Present Value)를 도출하고, 여기에 예측된 비용을 연평균 동등가치로 표현하는 EUAC(Equivalent Uniform Annual Cost)를 추가로 도입해 더 쉬운 이해를 돕고자 하였다.

Table 7과 Table 8에서 나타난 바와 같이 대안 1이 상대적으로 큰 유지보수비용을 보이지만 경제성은 가장 우수한 것으로 나타났다. 총비용을 연평균 등가로 표현한 EUAC의 경우 1,060만원/km/년의 편익이 발생하는 것으로 예측되었다. 한편 Table 6에서 대안간 최대 평균운행속도의 차이는 2.59km로 운전자가 70km/h로 주행 시 크게 인지할 만한 수준은 아니나, 이로 인한 편익은 운행속도 1km/h당 연간 8,114~9,093만원 수준이다. 이를 전국 국토네트워크 연장인 11,328.6km로 환산하면 최소 9,100억원/년에 육박한다. 이는 왜 우리가 도로자산관리에 주목해야 하는지에 대한 이유를 잘 설명해 주고 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 우리나라 국도유지보수 실정에 적합한 한국형 생애주기비용 분석모형을 개발하여 보다 현실적인 의사결정을 돕

고자 하였다. 자기화된 분석시스템 개발의 핵심은 도로파손과정 및 생애주기비용 예측모형의 국내화, 국도유지보수 실정의 반영, 모형활용의 용이성 확보 그리고 도로포장상태를 근거로 한 생애주기비용모형의 제시라 할 수 있다. 이를 위해 우리나라 교통시설투자 평가지침의 내용을 충실히 반영하되, 도로자산관리개념과 우리나라 국도유지관리 현실에 부적합한 사항들에 대해서는 제정의, 수정, 추가 등의 작업을 통해 분석모형의 틀과 세부모형을 정의하였다.

사례분석으로는 국도의 평균적 특성을 가진 가상구간에 다양한 유지보수대안(현행기준 포함)을 적용하여 제안모형의 예측특성을 살펴보았으며, 그 결과 “유지보수전략 변화 - 관리자비용 변화 - 네트워크 포장상태 변화 - 운전행태(속도)변화 - 도로이용자 및 사회환경비용변화 - 유지보수 대안의 경제성 변화”에 대한 흐름을 잘 반영하고 있음을 확인하였다. 특히 IRI 1.00m/km가 증가하면 차량의 운행속도가 1.24km/h가 감소하는 것으로 분석되었으며, 분석년도 중 종단평탄성의 편차가 최대였던 두 시점의 도로이용자 및 사회환경비용의 차이를 비교해 본 결과 586.13백만 원/km/년으로 그 차이가 상당함을 알 수 있었다. 이는 도로유지관리에 따른 편익의 입계값으로 “도로자산관리분야”에 대한 높은 가능성을 확인했다고 할 수 있다.

본 논문에서 제시한 생애주기비용 분석모형은 중장기 평가모형 중 하나로 유지보수 전략에 따른 네트워크 수준에서의 공용성과 경제성을 평가할 수 있도록 모형화되었다. 이는 도로자산관리를 위한 분석모형 중 가장 일반적인 형태로 향후에 보다 구체적이면서도 맞춤형 정보를 도출하기 위한 자기화 시스템 개발에 중요한 선행연구로 활용될 수 있을 것이다.

향후 연구에서는 우선 본 연구에서 구체적으로 기술하지 못했던 세부모형의 핵심사항에 대한 심도 있는 고찰이 이루어져야 할

것이다. 또한, 현실의 정보수요를 보다 정확하게 충족시킬 수 있는 맞춤형 분석모형이 다양한 형태로 개발되어야 할 것이며, 그 외 분석결과에 신뢰성을 높이기 위한 차종구분에 관한 통합연구, 기대수명의 분산고려, 장래도시개발계획을 고려한 중장기 교통량 추정방안에 대한 연구가 필요하며, 그 외 예산제약 및 도로조사간격으로 인해 발생하는 유지보수지체에 관한 접근을 통해 보다 현실을 잘 묘사하는 분석모형이 되어야 할 것이다.

References

- American Association of State Highway Officials (AASHTO) (1978). *A manual on user benefit analysis of highway and bus transit improvements*, American Association of State Highway Officials, Washington, D.C.
- Bennett, C. R. (1989). *The New Zealand vehicle operating cost model*, RRU Bulletin 82, Transit New Zealand, Wellington.
- Bennett, C. R. and Greenwood, I. D. (2000). *Highway development and management series vol. 7: Modeling Road User and Environmental Effects in HDM-4*, The World Road Association (PIARC), La Defense.
- Bonney, R. S. P. and Stevens, M. F. (1967). *Vehicle operating costs on bituminous, gravel and earth roads in East and Central Africa*, Road Research Technical Paper No. 76, Ministry of Transport, London.
- Chan, C. Y., Huang, B., Yan, X. and Richards, S. H. (2009). "Effects of asphalt pavement conditions on traffic accidents in tennessee utilizing pavement management system." *Transportation Research Board Annual Meeting 2009*, Paper #09-2054, Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C.
- Chatti, K. and Zaabar, I. (2012). *NCHRP Report 720: Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs*, Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C.
- de Weille, J. (1966). *Quantification of road user savings*, World Bank Staff Occasional Paper No.2, The World Bank, Washington, D.C.
- Do, M.-S., Han, D.-S., Yoo, I.-K. and Lee, S.-H. (2006). "Performance and economic analysis for rut-resistance pavement considering life cycle cost." *J. of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 26, No. 5D, pp. 783-796 (in Korean).
- Do, M.-S., Han, D.-S., Lee, J.-D. and Lee, Y.-U. (2007). "Economic analysis for road pavement maintenance by using HDM." *J. of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 3D, pp. 311-323 (in Korean).
- Federal Highway Administration (FHWA) (2001). *Traffic monitoring guide*, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Federal Highway Administration (FHWA) (1998). *Life-cycle cost analysis in pavement design: in search of better investment decisions*, FHWA-SA-98-079, Federal highway Administration, Washington, DC, U.S.
- Goodman, A. S. and Hastak, M. (2006). *Infrastructure planning handbook: planning, Engineering, and Economics*, American Society of Civil Engineers (ASCE) Press, McGRAW-HILL, U.S.
- Han, D.-S. (2011). *Development of open-source hybrid pavement management system for an international standard*, A PhD. Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Han, D.-S. and Do, M.-S. (2012a). "Estimation of life expectancy and budget demands based on maintenance strategy." *J. of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 32, No. 6D, pp. 345-356 (in Korean).
- Han, D.-S. and Do, M.-S. (2012b). "Life cycle cost analysis on pavement inspection intervals considering delay in maintenance." *KSCE J. of Civil Engineering* (in review).
- Han, D.-S., Kaito, K. and Kobayashi, K. (2012c). "Application of Bayesian estimation method with Markov hazard model to improve deterioration forecasts for infrastructure management." *KSCE J. of Civil Engineering* (in review).
- Han, D.-S. Do, M.-S., Kim, S.-H. and Kim, J.-H. (2007). "Life cycle cost analysis of pavement maintenance standard considering user and socio-environmental cost." *J. of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 6D, pp. 727-740 (in Korean).
- Hide, H., Abaynayaka, S. W., Sayer, I. and Wyatt, R. J. (1975). *The Kenya road transport cost study: Research on Vehicle Operating Costs*, Transport and Road Research Laboratory Report LR672, Department of the Environment, Crowthorne.
- Kobayashi, K., Do, M.-S. and Han, D.-S. (2010). "Estimation of Markovian transition probabilities for pavement deterioration forecasting." *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 341-351.
- Kobayashi, K., Ejiri, R. and Do, M.-S. (2008). "Pavement management accounting system." *J. of Infrastructure Systems, ASCE.*, Vol. 14, No. 2, pp. 159-168.
- Kobayashi, K., Kaito, K. and Nam, L. T. (2012). "A statistical deterioration forecasting method using hidden Markov model with measurement error." *Transportation Research-Part B*, Vol. 46, pp. 544-561.
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2008). *A guideline for vehicle classification: 12 types-based*, Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs (MLTM) (in Korean)
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2009). *Final-report of the national highway pavement management system 2008*, Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs (MLTM) (in Korean).
- Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *A guidebook for investment of transportation facilities(4th edition)*, Report ID 2011-655, MLTM (in Korean).
- Morosiuk, G. and Abaynayaka, S. W. (1982). *Vehicle operating cost in the Caribbean: An Experimental Study of Vehicle Performance*, TRRL Laboratory Report 1056. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- Permanent International Association of Road Congresses (PIARC) (2000). *Highway development and management series: vol. 1-7*, The World Road Association, La Defense.
- Statistics Korea (2012). *Index title: Current status of total length of*

- Korean national highways*, A webpage, (available in: http://www.index.go.kr/egams/stts/jsp/potal/stts/PO_STTS_IdxMain.jsp?idx_cd=1211&bbs=INDEX_001&clas_div=C&rootKey=1.48.0) (in Korean).
- Traffic Monitoring System (TMS) (2012). *Traffic monitoring system of Korea national highway*, A website, (available in: <http://www.road.re.kr/>).
- Transportation Research Board (TRB) (2000). *Highway Capacity Manual(HCM 2000; 5th eds.)*, TRB, Washington, D.C.
- Tsuda, Y., Kaito, K., Aoki, K. and Kobayashi, K. (2006). "Estimating Markovian transition probabilities for bridge deterioration forecasting." *J. of Structural Engineering and Earthquake Engineering, JSCE.*, Vol. 23, No. 2, pp. 241-256.
- Uddin, W. and Torres-Verdin, V. (1998). "Service life analysis for managing road pavement in Mexico." *A Proc. of 4th International Conference on Managing Pavements*, Durban, Vol.2, May 17-21, pp. 882-898.
- Watanatada, T. (1981). *Highway design and maintenance standards model (HDM); model description and user's manual-release II*, Transportation, Water and Telecommunications Department Report, the World Bank, Washington, D.C.
- Yang, J.-D., Gunaratne, M., Lu, J. J. and Dietrich, B. (2005). "Use of recurrent Markov chains for modeling the crack performance of flexible pavements." *J. of Transportation Engineering, ASCE.*, Vol. 131, No. 11, pp. 861-872.