

도로자산관리를 위한 포장종합평가지수의 속성과 변화과정의 모델링

Internal Property and Stochastic Deterioration Modeling of Total Pavement Condition Index for Transportation Asset Management

한 대 석	Daeseok HAN	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail : handaeseok@kict.re.kr)
도 명 식	Myungsik DO	정회원 · 한밭대학교 교수 · 교신저자 (E-mail : msdo@hanbat.ac.kr)
김 부 일	Booil KIM	정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (E-mail : bikim@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study is aimed at development of a stochastic pavement deterioration forecasting model using National Highway Pavement Condition Index (NHPCI) to support infrastructure asset management. Using this model, the deterioration process regarding life expectancy, deterioration speed change, and reliability were estimated.

METHODS : Eight years of Long-Term Pavement Performance (LTPP) data fused with traffic loads (Equivalent Single Axle Loads; ESAL) and structural capacity (Structural Number of Pavement; SNP) were used for the deterioration modeling. As an ideal stochastic model for asset management, Bayesian Markov multi-state exponential hazard model was introduced.

RESULTS : The interval of NHPCI was empirically distributed from 8 to 2, and the estimation functions of individual condition indices (crack, rutting, and IRI) in conjunction with the NHPCI index were suggested. The derived deterioration curve shows that life expectancies for the preventive maintenance level was 8.34 years. The general life expectancy was 12.77 years and located in the statistical interval of 11.10-15.58 years at a 95.5% reliability level.

CONCLUSIONS : This study originates and contributes to suggesting a simple way to develop a pavement deterioration model using the total condition index that considers road user satisfaction. A definition for level of service system and the corresponding life expectancies are useful for building long-term maintenance plan, especially in Life Cycle Cost Analysis (LCCA) work.

Keywords

Pavement management, Pavement deterioration model, Total pavement condition index, Level of service, Markov chain

Corresponding Author : Do, Myungsik, Professor
Dept. of Urban Engineering, Hanbat National University,
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 Mar. 11, 2017 Revised Sep. 06, 2017 Accepted Sep. 18, 2017

1. 서론

2000년대 접어들어 사회기반시설 관리는 “자산관리 (Asset management)”란 용어로 점차 일반화되고 있으며, 2014년 자산관리 국제표준 ISO 5500X시리즈 공표 (ISO, 2014a, 2014b, 2014c), 2015년 국제인프라관리

매뉴얼(International Infrastructure Management Manual, IPEWA, 2015)의 발간을 통해 규격화, 구체화 되어 가고 있다. 이들은 모두 조직의 목표달성과 지속 가능한 서비스 제공을 위한 생애주기관리(Life cycle management)에 초점을 두고 있으며, 서비스수준

(Level of Service; LOS)과 서비스비용(Cost of Service; COS)간의 균형, 그리고 리스크(Risk) 관리를 핵심인자로 인식하고 있다.

생애주기비용분석(Life Cycle Cost Analysis; LCCA)은 자산의 파손과정을 근간으로 하고 있으며, 파손과정은 1)기대수명, 2) 파손속도의 변화, 그리고 3)파손의 불확실성을 주요속성으로 정의할 수 있다. 한편, Han and Lee(2016)은 자산관리를 지원하기 위한 파손 모형의 이상적인 조건으로 1)포장의 파손과정에 포함된 파손속도의 지역성, 2)현실에서의 다양한 유지보수 대안의 접목, 3)포장파손과정의 분산(확률)정보 도출, 4) 다양한 설명변수의 분석가능여부, 5)LOS체계의 직접적인 적용으로 정의한 바 있다.

파손모형 개발의 첫 단계는 서비스와 상태를 대표하는 지표의 선정이다. 그간 파손모형에 대한 연구를 살펴보면 대부분 공학적인 관점에서 균열, 소성변형, 종단평탄성 등 개별지표를 중심으로 이루어져 왔으나, 자산관리가 점차 보편화되면서 종합평가지표를 포장관리에 활용하는 사례가 확대되고 있다(AASHTO, 1993; Huang, 2004; Son et al., 2013; KEC, 2012; Yoshida, 2016). 종합평가지표는 일반적으로 도로이용자의 승차감 혹은 주행만족도를 척도로 개발되기 때문에 자산관리에서 강조하는 이용자의 만족도를 직·간접적으로 평가할 수 있으며, 가중치 조정을 통한 유지관리 패러다임의 변화를 반영할 수 있다는 장점이 있다. 한국의 경우 고속국도, 일반국도, 서울시의 포장관리시스템(Pavement Management System; PMS)에서 각각 독자적인 종합평가지표를 개발하여 상태평가에 참조하고 있다. 그러나 종합평가지표를 이용한 파손모형의 개발이나 생애주기비용분석, 혹은 직접적으로 유지보수 실무에 적용한 사례는 찾아보기는 어렵다. 이는 종합평가지표가 갖는 모호함, 즉 같은 수치라도 포장의 파손현황(즉, 균열, 소성변형, 종단평탄성의 정도)은 구간에 따라 상이하기 때문이다.

Do et al.(2012)은 종합평가지표에 신뢰성이론을 접목하여 파손특성을 분석한 바 있다. 그러나 앞서 Han and Lee(2016)에서 제시한 이상적인 조건에 대비할 때 설명변수의 고려와 LOS체계 적용에 한계가 있으며, 무엇보다 신뢰성 공학의 특성상 상태기반이 아닌 시간기반 모형을 채택하고 있다는 점에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 종합평가지표 활용에 대한 기반연구로서 일반국도의 NHPCI를 대상으로 지표의 속성을 분석하여 서비스수준 체계를 설정하고, 이를 기반으로 포장파손모형을 구축하고자 하였다. 파손모형으로는 Han and Lee(2016)에서 제시한 5가지 이상적인 조건에 부합하는 베이지안 마르

코프 다단계 하자드 모형(Bayesian Markov multi-state hazard model, 이하 BMH모형) (Kaito et al., 2007)을 도입하였다. 실증분석을 위해 일반국도 PMS에서 구축하고 있는 최근 8년(2007년~2014)간의 장기공용성자료(Long-Term Pavement Performance data; LTPP)를 취합/가공하였으며, 설명변수로 교통하중(Equivalent Single Axle Loads; ESAL)과 포장강도지수인 SNP(Structural Number of Pavement)를 모형 개발에 활용하였다. 연구의 결과로는 앞서 기술한 일반국도 포장의 파손과정을 기대수명과 파손속도의 변화, 그리고 이 파손과정의 불확실성을 제시하였다.

본 연구는 기존에 주를 이루었던 공학적 관점에서의 단일지표가 아닌 서비스 중심의 종합상태지표를 대상으로 한다는 점에 연구의 독창성이 있으며, 자산관리를 지원 가능한 이상적인 파손모형 개발을 통해 우리나라 국도포장의 생애주기관리에 대한 기반을 마련했다는 점에 연구의 기여도가 있다.

2. 연구의 내용과 절차

본 연구는 LTPP 자료가공, NHPCI 속성분석을 통한 LOS 등급설정, 분석데이터 가공, 파손모형개발, 결과해석으로 구성된다. 구체적인 내용은 Table 1을 참조한다.

Table 1. Research Contents and Procedure

Steps	Content	Description
1	LTPP data processing	- Developing 8 years time-series data from 2007~2008 (crack, rutting and IRI) - Calculation of NHPCI, ESALs, SNP by section and year
2	Analysis on the NHPCI LTPP data	- Analyzing basic statistics and distribution information by NHPCI level
3	Development of level of service	- Setting LOS rating system (A~E) with current maintenance criteria of Korean National Highway - Developing maintenance criteria by using the NHPCI
4	Analysis data processing and data fusion	- Data reprocessing from continuous data (NHPCI) to discrete condition data based on LOS standard - Removing outlier(measurement error; i.e. inversed condition), maintained condition (year after maintenance) and incomplete monitoring data
5	Development of deterioration model	- Development of Bayesian multistate Markov hazard model (using Matlab) - Empirical study
6	Result and feedback	- Estimation of life expectancy by condition state (drawing deterioration curve) - Estimation of statistical interval of life expectancy

3. NHPCI의 소개

NHPCI는 2007년 일반국도포장관리시스템에서 운전자의 주행만족도를 정량적으로 평가하기 위해 개발한 포장상태 종합평가지수이다.

지수의 개발에는 국토관리사무소의 관리자, 산학연 포장전문가가 패널로 참가하였으며, 포장상태가 상이한 다수(40개)의 구간을 주행 후 패널위원이 부여한 점수와 개별 포장상태지표들간의 관계를 모형화 하였다. 해당 수식은 Eq. (1)과 같다(MLTM, 2010).

$$NHPCI = \frac{1}{(0.33+0.003x_1+0.0040.003x_2+0.0183x_3)^2} \quad (1)$$

여기서,

$x_n (n = 1, \dots, 3)$ = 균열, 소성변형, 국제중단평탄성지수(International Roughness Index: IRI)

종합평가지표개발 이후 NHPCI를 활용한 보수공법 결정(Son et al., 2013), 신뢰성 공학을 이용한 기대수명 추정(Do et al., 2012) 등의 연구가 이루어졌으며, 유지보수 실무에서는 전반적인 네트워크의 상태평가와 유지보수 우선순위결정에 참조하는 수준에서 활용되고 있다. 종합평가지표의 적극적인 활용에 방해가 되는 가장 큰 요인은 앞서 기술한 바와 같이 수치 자체가 갖는 모호함이다.

즉, 기존에 균열, 소성변형, 중단평탄성에 익숙한 관리자가 그 수치만으로 실제 주행만족도는 물론, 포장의 상태를 쉽게 예측할 수 없다는 점이다. 이를 개선하기 위해서는 NHPCI의 속성분석을 통해 개별상태지표와의 관계를 정량적으로 파악할 필요가 있으며, 현재의 유지보수 기준과 접목하여 NHPCI를 기준으로 한 LOS등급체계와 유지보수기준을 수립할 필요가 있다.

4. NHPCI와 개별상태지표와의 관계분석

본 연구에서는 NHPCI수준에 따른 각 개별 포장상태 지표들의 분포특성을 살펴보고, 일반국도의 현행 유지보수기준과 매칭하여 LOS등급을 설정하였다. NHPCI 수준별 평균, 표준편차, 통계적 범위를 살펴보면 Table 2, Fig. 1~2와 같다.

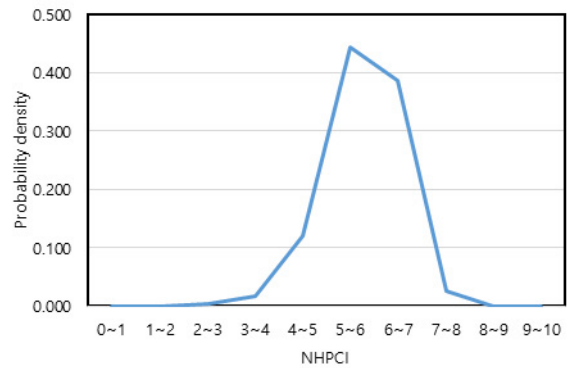
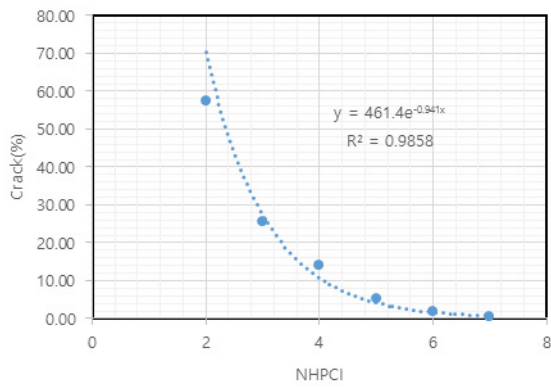


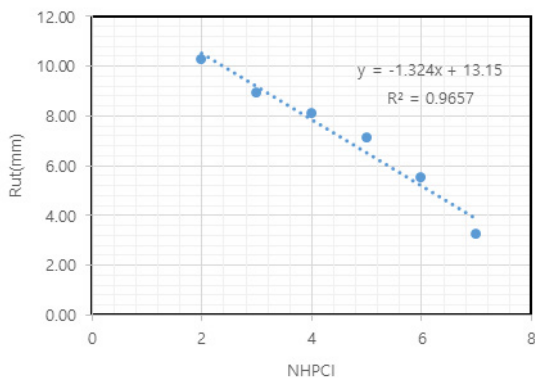
Fig. 1 Probability Density of NHPCI Data

Table 2. Characteristic of Individual Condition Indices by the NHPCI Level

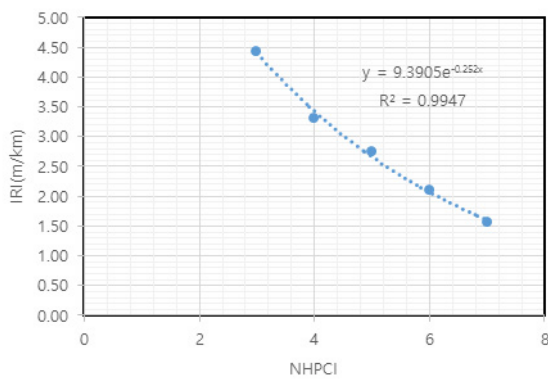
NHPCI	Prob. density	Average			Standard deviation			Statistical intervals (1-sigma level: 68%)					
		Crack (%)	Rut (mm)	IRI (m/km)	Crack (%)	Rut (mm)	IRI (m/km)	Crack (%)		Rut (mm)		IRI (m/km)	
								Min	Max	Min	Max	Min	Max
0~1	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1~2	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2~3	0.003	57.54	10.25	3.91	20.86	6.78	3.22	36.80	78.28	3.51	16.99	0.71	7.11
3~4	0.018	25.59	8.91	4.43	13.93	4.26	2.43	11.74	39.44	4.68	13.15	2.01	6.85
4~5	0.121	14.04	8.12	3.31	7.68	2.76	1.02	6.40	21.67	5.38	10.86	2.29	4.32
5~6	0.445	5.10	7.14	2.75	3.87	2.36	0.61	1.25	8.96	4.79	9.49	2.14	3.36
6~7	0.387	1.69	5.50	2.11	1.77	1.85	0.44	0.00	3.44	3.66	7.35	1.67	2.55
7~8	0.026	0.49	3.23	1.57	0.66	1.33	0.27	0.00	1.15	1.91	4.54	1.30	1.84
8~9	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9~10	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



(a) Crack



(b) Rutting



(c) IRI

Fig. 2 Relationships between the NHPCI and Condition Indices

Table 1, Fig. 1을 살펴보면 모든 NHPCI 샘플자료가 2.0~8.0 사이에 분포하며, 정규분포에 근사함을 볼 수 있다($\mu=5.77$, $\sigma=0.75$). 이는 NHPCI가 이론적으로는 10점 만점 체계이나 양측에 모두 잉여공간이 발생하고 있음을 의미한다. 향후 스케일 조정이나 5점체계 전환 등에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. Table 1에서 $1-\sigma$ (시그마)수준(68%)에서의 범위정보를 살펴보면, 상태가 좋을 경우에는 확률공간이 좁지만 지수가 악화될수록 분포영역이 커지는 현상을 볼 수 있다.

다음으로 각 NHPCI 급간에 따른 개별상태지표의 대

표값(μ)을 도출하고, NHPCI와 각 개별 상태지표간의 관계를 모형화 하였다(Fig. 2, Eqs. (2)~(4) 참조).

$$\text{Crack}(\%) = 461.4e^{-0.941x} \quad (2)$$

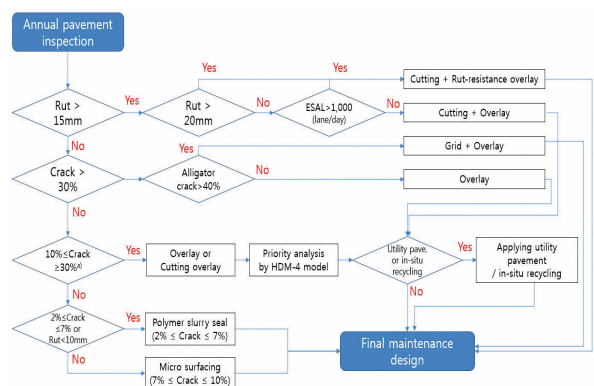
$$\text{Rutting}(\text{mm}) = -1.324x + 13.15 \quad (3)$$

$$\text{IRI}(\text{m/km}) = 9.3905e^{-0.252x} \quad (4)$$

Fig. 2를 살펴보면 균열과 IRI는 지수(Exponential), 소성변형은 선형에 근사하는 함수 형태로 나타났다. Eqs. (2)~(4)는 상태지표별 추세평균에 대한 함수식으로 높은 적합도(R^2)를 보여주고 있다(Fig. 2 참조).

5. NHPCI의 서비스수준체계 설정

LOS체계는 상태측정, 보수기준설정, 파손모형 구축, 생애주기분석, 예산협상 등 거의 모든 자산관리 프로세스에 관여하는 중요한 분석도구이다(IPWEA, 2016). 본 연구에서는 4절의 연구결과와 일반국도 유지보수기준을 참조하여 LOS체계를 설정하였다. 먼저 우리나라 일반국도 유지보수기준 결정 로직을 살펴보면 Fig. 3과 같다.



Source: KICT, 2015 (translated and revised)

Fig. 3 Maintenance Criteria of Korean National Highway

본 연구에서는 Fig. 3을 참조하여 일반국도의 유지보수기준을 예방적보수, 일반보수, 우선보수로 구분하여 정의하고 서비스수준체계 설정에 반영하였다. 각 보수수준에 해당되는 개별상태지표와 그에 상응하는 NHPCI기준치를 Table 2의 자료에 근거하여 추정하면 Table 3과 같다.

Table 3. NHPCIs by Maintenance Criteria of Korean National Highway

Maintenance level	Maintenance criteria			NHPCI by condition indices		
	Crack	Rut	IRI ^b	Crack	Rut	IRI
Preventive	10.0	10.0	3.0	5.55	3.19	5.45
General	20.0	15.0	3.5	4.83	N/A ^a	4.48
Emergency	30.0	20.0	4.0	4.38	N/A	3.86

Note: 1) Optimal point was IRI 3.8m/km (Do et al., 2007)
 2) Not available (Maximum rutting of the lowest grade (NHPCI 2~3) was 10.25mm)

Table 3에서는 NHPCI를 유지보수 기준에 활용 시 세 지표 중 균열이 보수기준에 가장 빨리 도달함을 알 수 있다. 본 연구에서는 균열의 발생시점 0.5%(Odoki et al., 2000)를 LOS-A등급으로 하였으며, Table 3에서의 각 유지보수수준을 LOS-B, C, D로 서비스등급체계를 설정하였다. 여기서, 우선유지보수 기준 이하로 LOS-E등급(NHPCI 4 이하)을 설정한 것은 생애주기 비용분석 시 유지보수지체가 발생하는 경우에 대한 파손함수를 제공하기 위함이다(Table 4참조).

Table 4. Definition of the LOS Rating of NHPCI

LOS rating	Description	NHPCI	Note
A	Excellent	Over 7	Best condition after maintenance or (re)construction
B	Good	7~6	Crack happen (0.5%)
C	Fair	6~5	Preventive level
D	Poor	5~4	General or emergency level
E	Very poor	Under 4	Over maintenance level

참고로 Table 4의 결과는 기존연구(Son et al., 2013)에서 유지보수를 수행했던 구간의 상태를 근거로 제시한 기준(예방적 보수 5.64~5.68, 덧씌우기 4.57~4.77, 대수선 3.76~3.82)과 유사한 수준임을 확인할 수 있다.

6. NHPCI의 파손과정 추정

본 연구에서는 자산의 파손과정 분석을위해 베이지안 마르코프 다단계 하자드 모형을 도입하였다. 본 절에서는 해당모형에 이론적 배경을 간단히 소개하고, 실증분석을 통해 상태등급별 기대수명과 불확실성을 추정하였다.

6.1. 베이지안 마르코프 다단계 하자드 모형의 개요

본 절에서는 베이지안 마르코프 다단계 하자드모형

(Kaito et al., 2007; Han et al., 2014)에 대해 간단히 소개하며, 편의상 이하 BMH모형으로 기술한다.

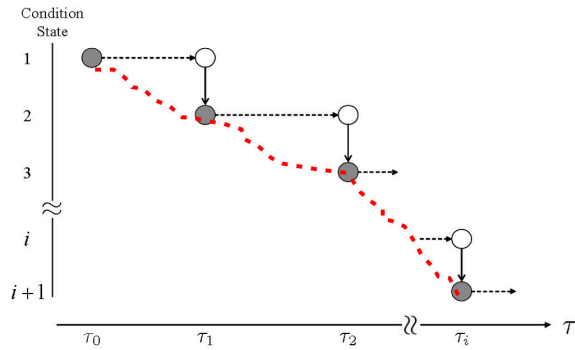
BMH 모형은 Tsuda et al. (2006)가 제안한 마르코프 하자드(Markov hazard) 모형의 분석틀을 그대로 따르되, 기존모형에서 파라미터 추정에 활용한 최대우도법(Maximum Likelihood Estimator; MLE)을 베이지안 통계기법인 마르코프체인 몬테카를로(Markov Chain Monte-Carlo; MCMC)기법으로 대체한 모형이다. 단순한 변화지만 파손과정의 불확실성에 대한 리스크 분석(Risk analysis)의 접목이 가능하게 되었으며, 분석 시 고질적인 문제인 샘플수와 파라미터 수렴문제를 해결함으로써 도로자산관리분야에 통계적 기법을 보다 쉽게 도입할 수 있는 근간을 마련해 주고 있다. 이 모형을 활용하기 위해 필요한 자료는 간단하다. 우선 독립적 두 시점 τ_A, τ_B 에서의 상태등급자료와 두 시점간의 시간적 차이, 그리고 분석가가 적용하고자 하는 설명변수들을 퓨전(Fusion)하여 자료셋으로 구성하면 된다. BMH모형을 적용하기 위해서는 1)마르코프 연쇄과정, 2)다단계지수하자드모형(Multistate exponential hazard model), 3)베이지안 추론, 4)마르코프체인 몬테카를로 기법, 5) Geweke 검정 (MCMC과정 수렴여부 검정) 등에 대한 이해가 필요하다. 이론과 활용에 대한 구체적인 정보는 Koop et al. (2007), Lancaster (1990), Train (2009), Geweke (1992), Tsuda et al. (2006), Kobayashi et al. (2010), Han and Lee (2016)을 참조한다.

6.2. 베이지안 마르코프 다단계 하자드 모형의 구조

본 절에서는 BMH모형의 기본구조인 다단계 하자드함수를 이용한 마르코프 연쇄과정의 분해과정을 간단히 소개한다. 마르코프 연쇄에서는 상태를 이산형(Discrete) 변수로 표현한다(Fig. 4 참조). 여기서 두 시점간의 상태변화 특성은 확률변수 π_{ij} 로 표시할 수 있고 (Eq. (5) 참조), 이 확률원소들을 모으면 마르코프전이확률(Markov Transition Probability; MTP)을 구성할 수 있다(Eq. (6) 참조). 단, 확률의 공리에 따라 $\pi_{ij} \geq 0$ 과 $\sum_{j=1}^J \pi_{ij} = 1$ 이 전제조건이 되며, 유지보수는 파손과정의 설명에 포함되지 않기 때문에 $\pi_{ji} = 0 (i > j)$ 과 $\pi_{jj} = 1$ 이 추가적인 조건이 된다.

$$\text{Prob}[h(\tau_B) = j | h(\tau_A) = i] = \pi_{ij} \quad (5)$$

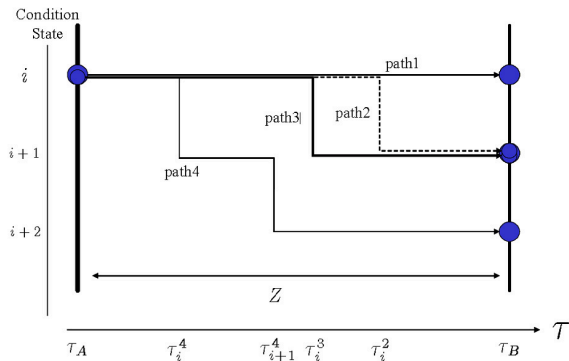
$$\Pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{JJ} \end{bmatrix} \quad (6)$$



Source: Tsuda et al., 2006(modified)

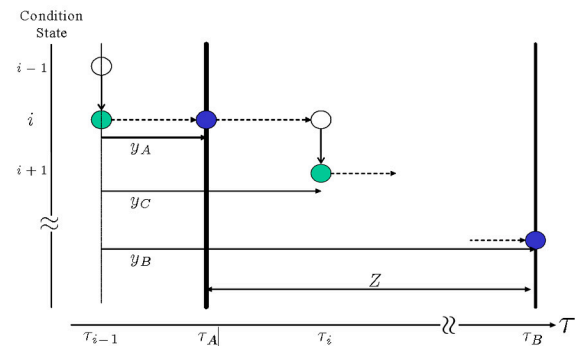
Fig. 4 Condition Change in Markov Chain

여기서 중요한 것은, 도로관리자가 상태조사를 통해 현실적으로 습득할 수 있는 정보는 조사 당시의 포장상태와 조사시점들(τ_A, τ_B)간의 시간간격(Z)으로 한정되므로 조사시점 사이에서의 변화과정은 설명이 불가능하다는 점이다(Fig. 5, 6 참조). 우리가 파손모형을 통해 추정하고자 하는 정보는 조사시점간의 상태변화량이 아닌 상태등급의 변화가 발생한 시점들 τ_i, τ_{i-1} , 그리고 이 두 시점들 간의 시간 y_c 이다(Fig. 6 참조). 그러나 이는 주



Source: Tsuda et al., 2006

Fig. 5 Deterioration Paths between Inspections



Source: Tsuda et al., 2006

Fig. 6 Condition Changes with Discrete Condition between Two Inspection Points

기적인 조사계획하에서는 파악이 불가능하며 y_A, y_B 에 대한 정보 역시 파악이 불가능하다. BMH모형은 이를 확률변수로 간주하고 다단계하azard모형을 기반으로 마르코프전이확률 행렬을 분해하는 방법으로 해결책을 모색한다(Tsuda et al., 2006). 본 절에서는 먼저 모형의 근간이 되는 다단계하azard모형에 대해 기술한다.

포장의 상태등급 i 의 기대수명 ζ_i 는 확률밀도함수 $f(\zeta_i)$ 와 확률분포함수 $F_i(\zeta_i)$ 의 확률변수가 된다. $F_i(\zeta_i)$ 는 파손함수로 이에 해당하는 생존함수 $\bar{F}_i(\zeta_i)$ 는,

$$\text{Prob}[\zeta_i \geq y_i] = \bar{F}_i(\zeta_i) = 1 - F_i(y_i) \quad (7)$$

$$F_i(y_i) = \int_0^{y_i} f_i(\zeta_i) d\zeta_i \quad (8)$$

이 되고, y_i 시점에서 시간간격 $[y_i, y_i + \Delta y]$ 동안 상태 i 에서 $i + 1$ 로 전이할 확률은,

$$\lambda_i(y_i) = \frac{f_i(y_i)}{\bar{F}_i(y_i)} = -\frac{d\bar{F}_i(y_i)}{\bar{F}_i(y_i)} = \frac{d}{dy_i} (-\log \bar{F}_i(y_i)) = \theta_i \quad (9)$$

가 된다. 여기서, θ_i 를 hazard 함수라고 하며, 상태 i 에서의 기대수명에 대한 hazard 함수 $\bar{F}_i(\zeta_i)$ 는,

$$\bar{F}_i(y_i) = \exp\left[-\int_0^{y_i} \lambda_i(u) du\right] = \exp(-\theta_i y_i) \quad (10)$$

$$f_i(\zeta_i) = \theta_i \exp(-\theta_i \zeta_i) \quad (11)$$

가 된다. Eq. (5)에 의거하여 상태등급 간 전이확률을 π_{ij} 라고 정의하면 Fig. 5에서의 파손경로는 1) π_{ii} , 2) π_{ii+1} , 3) π_{ij} , 4) π_{ij} 로 요약되며, 이를 다단계 지수하azard 모형으로 유도하면 다음과 같다(Tsuda et al., 2006).

$$\pi_{ii} = \exp(-\theta_i Z) \quad (12)$$

$$\pi_{ii+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{-\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z)\} \quad (13)$$

$$\pi_{ij} = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \quad (14a)$$

$$\begin{cases} \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} = 1, \text{ at } (k \leq i+1) \\ \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} = 1, \text{ at } (k \geq j) \end{cases} \quad (14b)$$

$$\pi_{ij} = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} \pi_{ij} \quad (15)$$

Eq. (12)~(15)와 같이 마르코프 전이행렬은 결국 $\theta_i (i = 1, \dots, J-1)$ 의 함수가 되는데, 이 형태로는 설명 변수를 모형에 포함시킬 수 없다. 따라서 θ_i 의 추정 에 독립변수 x_m 에 대응하는 미지모형계수(Unknown parameter) 벡터 $\beta_{i,m} (i = 1, \dots, J-1; m = 1, \dots, M)$ 를 포함시켜 추정식을 구성하면,

$$\theta_i = f(\bar{\xi}; \beta_i) = \exp(\beta_i + \beta_{1,1}\bar{x}_1, \dots, \beta_{i,m}\bar{x}_m) \quad (16)$$

$(m = 1, \dots, M; i = 1, \dots, J-1)$

로 정식화 할 수 있다. 여기서, 각 상태등급 i 의 기대수명은 지수 하자드의 생존함수로서 Eq. (17)과 같이 정의되며(Lancaster, 1990), 각 상태등급의 기대수명 \hat{R}_i^k 을 누적하면 상태 J 까지의 기대수명이 도출된다.

$$\hat{R}_i^k = \int_0^\infty \tilde{F}_i(y_i^k) dy_i^k = \int_0^\infty \exp(-\theta_i^k y_i^k) dy_i^k = \frac{1}{\theta_i^k} \quad (17)$$

즉, 모형의 핵심은 θ_i 의 추정을 위한 $\beta_{i,m}$ 의 추정이 된다. 여기에 베이저안 통계기법인 MCMC, 그 중에서도 가장 대중적인 기법 중 하나인 메트로폴리스-헤이스팅(Metropolis-Hastings; M-H)기법을 활용한다.

베이저안 통계기법은 비모수적인 기법으로 최대우도법과 같은 전통적 기법에 비해 1) 샘플 수 부족, 그리고 2) 행렬의 차원이 증가하면서 종종 발생하는 계산오류(Overflow)나 최대우도법의 적용 시 고질적으로 발생하는 초기값의 설정문제, 3) 지역적 수렴(Local maximum)과 관련된 최적화 문제 등에 관해 강력한 장점을 가지고 있다(Train, 2009). 이러한 장점은 충분한 샘플수의 확보에 많은 시간과 노력이 필요하고, 파손과정의 설명에 다양한 변수들이 혼재되어 있는 사회간접자본시설의 파손과정 분석에 특히나 유효하다. 베이저안 통계의 근간은 사전분포(혹은 사전지식)와 사후분포와의 관계를 규명 혹은 갱신하는 것으로, 사후분포는 사전분포와 우도함수의 곱에 비례한다는 것에서 출발한다(Bayes and Price, 1763) (Eqs. (18) ~ (19)).

$$\pi(\beta|\xi) \propto L(\beta|\xi)\pi(\beta) \quad (18)$$

β 는 사전분포 $\pi(\beta)$ 에 대응하는 확률변수이며, β 의 사후분포 $\pi(\beta|\xi)$ 는 베이저안 정리에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$\pi(\beta|\xi) = \frac{L(\beta|\xi)\pi(\beta)}{\int L(\beta|\xi)\pi(\beta)d\theta} \quad (19)$$

베이저안 계산절차를 간단히 요약하면, 1)사전분포 $\pi(\beta)$ (초기값)의 정의, 2)새롭게 얻어진 자료 ξ 를 활용한 우도함수 $L(\beta|\xi)$ 의 정의, 3)사전분포 $\pi(\beta)$ 의 수정 및 사후분포 $\pi(\beta|\xi)$ 갱신으로 정의될 수 있다. 그러나 “기준화 정수(Normalizing constant)”로 불리는 (Eq. (19) 참조), 즉, ξ 의 임계확률의 계산이 어렵거나 불가능하다는 문제가 남아 있었다. 이를 해결한 것이 MCMC기법이다.

MCMC를 구현하기 위해서는 Eqs. (12)~(15)를 만족하는 우도함수의 정의, M-H기법을 활용한 MCMC의 구현, 사후분포의 도출과정, Geweke 통계량을 활용한 수렴과정의 검증 등과 관련하여 상당히 많은 설명과 수식들이 필요하다. 지면상 모수예측의 핵심인 우도함수의 정의와 M-H기법에 대해서만 간단히 설명한다. 먼저 현장에서 수집 가능한 자료는 $\bar{\xi} = (\delta_{ij}^k, z^k, \bar{x}^k)$ 로 여기서, δ_{ij}^k 는 상태변화의 발생여부에 따라 0, 1로 결정되는 더미(dummy)변수이며, z^k 는 조사시점간의 간격이다. 베이저안의 갱신규칙에 따라 우도함수 $L(\beta|\bar{\xi})$ 는 $\pi_{ij}(z)$ 를 활용하여 다음과 같이 정의된다.

$$L(\beta|\bar{\xi}) = \prod_{i=1}^{J-1} \prod_{j=i}^J \prod_{k=1}^K \left\{ \sum_{h=i}^j \prod_{l=i}^{h-1} \frac{\theta_l^k}{\theta_l^k - \theta_h^k} \prod_{l=h}^{j-1} \frac{\theta_l^k}{\theta_l^k - \theta_h^k} \exp(-\theta_h^k z^k) \right\}^{\delta_{ij}^k} \quad (20)$$

Eq. (16)에서 제시된 바와 같이 β_i 는 설명변수 $x_m^k (k = 1, \dots, \varepsilon; m = 1, \dots, M)$ 의 함수로 정의되므로, 사전분포를 $M+1$ 차원의 정규분포 $\beta_i \sim N_M(\mu_i, \Sigma_i)$ 를 가정하여 사후분포와 유사하도록 정식화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \pi(\beta|\bar{\xi}) &\propto L(\beta|\bar{\xi}) \prod_{i=1}^{J-1} g(\beta_i|\mu_i, \Sigma_i) \propto \\ &\prod_{i=1}^{J-1} \prod_{j=i}^J \prod_{k=1}^K \left\{ \prod_{l=1}^{j-1} \theta_l^k \sum_{h=i}^j \prod_{l=i}^{h-1} \frac{1}{\theta_l^k - \theta_h^k} \cdot \prod_{l=h}^{j-1} \frac{1}{\theta_l^k - \theta_h^k} \right. \\ &\left. \exp(-\theta_h^k z^k) \right\}^{\delta_{ij}^k} \cdot \prod_{i=1}^{J-1} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\beta_i - \mu_i)\Sigma_i^{-1}(\beta_i - \mu_i)\right\} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, μ_i, Σ_i 는 각각 사전분포의 평균과 공분산 행렬이며, 사후분포를 구하기 위해 필요한 기준화 정수 $L(\bar{\xi}) = \int L(\beta|\bar{\xi}) \prod_{i=1}^{J-1} g(\beta_i|\mu_i, \Sigma_i) d\beta$ 의 계산에 MCMC 과정이 적용된다.

이 샘플링 기법에 “Markov”라는 이름이 붙은 이유는

추출된 샘플이 바로 직전(현재)의 상태에만 영향을 받는 특성, 그리고 샘플추출이 확률분포에 근거한 몬테카를로 샘플링(Monte-Carlo sampling)이기 때문이다(Train, 2009). M-H기법의 원리를 간단히 소개하면, 사전분포를 샘플링 된 제안밀도(Jumping distribution)를 활용하여 사후분포로 갱신하는 과정의 반복을 통해 목표분포(불변분포)와의 거리를 좁혀나가는 방법이다(Metropolis et al., 1953; Hastings, 1970; Koop et al., 2007). MCMC과정에서 도출된 샘플들은 두 개로 샘플그룹으로 나뉘게 되는데, 하나는 수렴영역에 도달하기 위해 필요한 번인(Burn-in)샘플그룹, 그리고 수렴 이후에 분포구성 및 모수추정에 활용되는 유효샘플그룹이다. 여기서, 유효 샘플그룹에 대한 수렴여부확인을 위해 여러 통계기법이 개발되었으나(Gelman et al., 1992; Geweke, 1992; Raftery et al., 1992; Zellner et al., 1995) 일반적으로 Geweke 통계량이 널리 활용된다.

6.3. 실증분석

본 연구에서는 BMH모형을 활용한 NHPCI의 파손모형을 제시하였다. 실증연구의 분석과정을 요약하면 1)LTTPP 자료의 연도별 취합, 2) NHPCI의 계산, 3) 공용역전현상 제거, 4) 유지보수 수행연도 자료 제거, 5)구간별/연도별 설명변수(ESAL과 SNP)의 계산, 6)NHPCI 자료의 변환(이산형), 7)BMH분석자료셋 가공, 7)BMH 모형분석, 8) 분석결과 해석으로 정의된다.

분석자료의 구성에 2007~2014까지 8년간의 시계열 자료로 활용함으로써 방대한 원시자료를 구축하였으나, 이상치제거(공용역전현상)와 유지보수 수행연도 자료,

설명변수가 확보되지 않은 자료셋을 모두 삭제하는 과정에서 상당부분의 샘플이 분석에서 제외되었다. 최종적으로 분석에 활용된 자료는 총 4,312세트로 샘플의 규모는 충분하다고 할 수 있다.

BMH모형을 통해 추정된 파라미터는 Table 5와 같으며, 각 LOS등급별 기대수명을 이용한 파손커브(Deterioration curve)를 도식하면 Fig. 7과 같다.

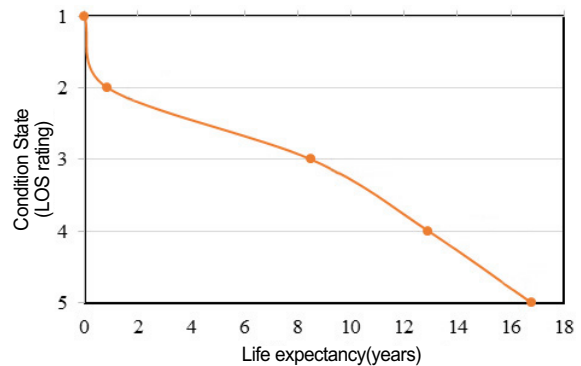


Fig. 7 Deterioration Curve of the NHPCI

Table 5의 분석결과를 순차적으로 살펴보면, 교통하중 ESAL은 LOS 상태등급B, C에서의 파손과정 설명에 유효한 설명변수로 분석되었다. 반면, 포장강도 SNP는 모든 등급에서 역관계를 나타내 기각되었다. NHPCI의 LOS등급별 누적 기대수명은 A=0.88년, B=7.65년, C=12.92년, D=16.78년으로 나타나 B등급 이후에는 파손이 점점 가속화되는 것을 알 수 있다(Fig. 7 참조). 여기서, 일반국도의 일반적인 유지보수 기준으로 D등급으로 설정했으므로 네트워크 평균 기대수명은 12.92년으로 판단할 수 있다. 이는 기존연구(Do et al., 2012)에

Table 5. Parameter Estimation of BMH Model for Deterioration Modeling of NHPCI

Condition state (LOS-rating)	Unknown parameters			Explanatory variables		Hazard function	Life expectancy (year)	Cum. life expectancy (year)
	$\beta_{i,0}$	$\beta_{i,m(1)}$	$\beta_{i,m(2)}$	$\bar{x}_1^{(3)}$	$\bar{x}_2^{(4)}$			
1 (A)	0.13155 (-0.00018) ¹⁾	- ²⁾	-	0.0686	0.536	1.14	0.88	0.88
2 (B)	-2.057 (0.002075)	0.32967 (0.001114)	-	0.0686	0.536	0.13	7.65	8.52
3 (C)	-1.5141 (0.041937)	0.48682 (-0.04081)	-	0.0686	0.536	0.23	4.40	12.92
4 (D)	-1.3509 (-0.01983)	-	-	0.0686	0.536	0.26	3.86	16.78

Note: 1) Geweke's Z-score, tolerance interval [-2,+2]

2) Deleted parameter due to inversed relationship

3, 4) Network average ESAL and SNP, Normalized by (0,1] respectively

5, 6) Refer to Eq. (16), (17) respectively

서 신뢰성 분석을 통해 제시했던 결과(중간하중 그룹 12.2년)와도 거의 유사한 수준임을 알 수 있다.

본 연구에서는 파손모형의 이상적 조건 중 하나를 파손과정의 불확실성(분산)의 파악으로 정의한 바 있다. BMH모형에서는 MCMC기법을 통해 추출한 파라미터 샘플을 통해 불확실성에 대한 정량적인 분석이 가능하다. Fig. 8은 MCMC과정의 궤적(Trace-plot)을 나타내며, 이 샘플에 대한 분포를 도출하면 각 LOS등급에 대한 기대수명 분포를 알 수 있다(Fig. 9 참조).

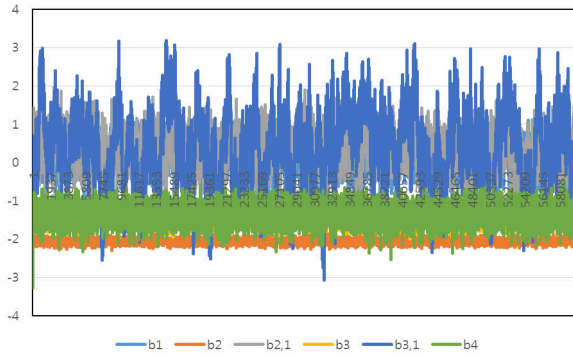


Fig. 8 Trace-plots of MCMC

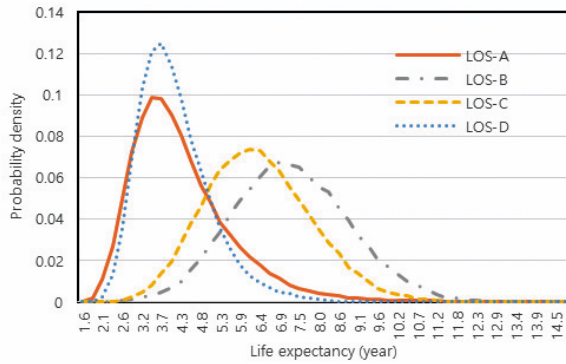


Fig. 9 Distribution of Life Expectancy by LOS Ratings

Fig. 8을 살펴보면 각 파라미터샘플(60,000개)이 특정영역(즉, 수렴영역)안에서 랜덤워크(Random walk)를 지속하는 것을 확인할 수 있다. 이를 분포로 도식하면 Fig. 9와 같이 LOS등급별 기대수명의 확률분포를

Table 6. Statistical Intervals of Life Expectancy by 3-sigma Rule (68-95.5-99.7)

LOS rating	Minimum			Maximum			Bench mark
	3-σ	2-σ	1-σ	1-σ	2-σ	3-σ	
1	-	-	-	-	-	-	-
2	0.36	0.46	0.63	1.24	1.86	2.78	0.88
3	7.04	7.44	7.93	9.25	10.26	11.55	8.53
4	10.42	11.10	11.93	14.09	15.58	17.47	12.93
5	12.45	13.55	14.96	18.96	22.10	26.35	16.79

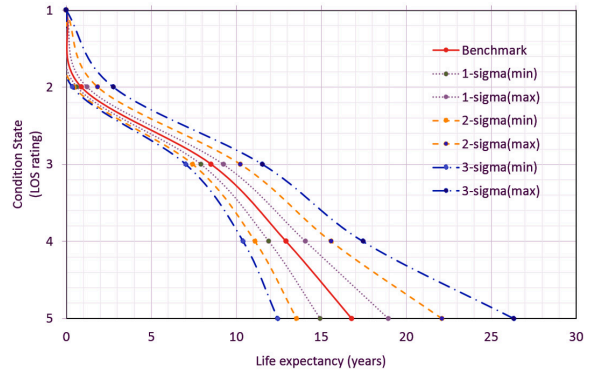


Fig. 10 Statistical Interval of Life Expectancies by 3-sigma Rule (68-95.5-99.7%)

얻을 수 있다. 본 연구에서는 이 확률분포를 근거로 기대수명의 불확실성을 3-시그마 규칙에 의거하여 평가하였다(Table 6, Fig. 10 참조).

Table 6, Fig. 10을 살펴보면 일반국도PMS의 일반적인 보수수준인 LOS-D(4)등급의 통계적 기대수명의 범위는 각각 $1-\sigma=[11.93, 14.09]$, $2-\sigma=[11.10, 15.58]$, $3-\sigma=[10.42, 17.47]$ 로 나타났다. 즉, 기대수명의 통계적 범위는 최소 2.2에서 최대 7.05년까지의 편차가 발생하는 것으로 분석되었다.

마지막으로 마르코프전이 확률(MTP)의 성질 $\Pi(nZ) = \{\Pi(Z)\}^n$ (Tsuda et al., 2006)을 이용하여 MTP 갱신을 통한 네트워크 서비스수준의 변화과정을 추정하였다(Fig. 11 참조).

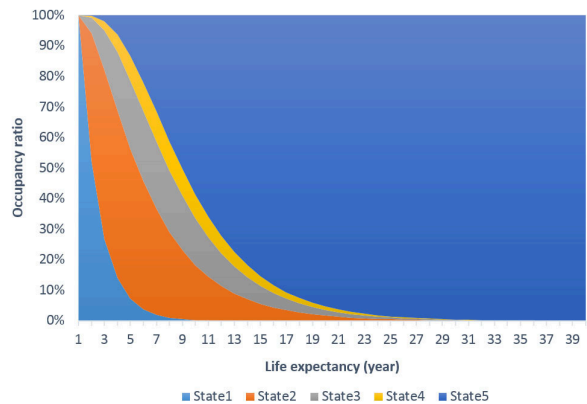


Fig. 11 Estimation of Network Service Level by Updating MTP Matrix

Fig. 11을 살펴보면, 일반국도의 B(10)수명(10%가 보수기준에 다다르는데 걸리는 시간)은 약 3년으로 나타났다. 7년차에 50.8%, 10년에 72.7%, 그리고 일반적인 포장의 설계수명으로 인식되는 20년에는 97.1%가 유지보수 기준에 도달하는 것으로 분석되었다.

7. 결론

본 연구에서는 서비스중심의 포장자산관리를 위한 기반연구로서, 포장서비스의 종합지표인 NHPCI를 활용하여 일반국도 포장의 파손과정을 분석하였다. 실증분석을 위해 일반국도 PMS에서 8년간 수집한 장기공용성 모니터링 자료를 활용하였으며, NHPCI의 분포특성과 국도 유지보수기준을 고려하여 NHPCI의 서비스수준체계를 설정하였다. 파손과정의 분석 도구로는 자산관리를 지원하기 위한 5가지 조건을 충족하는 베이시안 마르코프 다단계 하자드 모형을 적용하였으며, 이를 통해 서비스등급별 기대수명과 분산정보, 그리고 마르코프 전이확률의 갱신과정을 통한 네트워크 서비스수준 변화과정을 도출하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. NHPCI는 10점 체계이나 분석결과 모든 샘플이 2~8점에 분포하였다. 잉여공간에 대한 스케일 조정, 혹은 5점체계 전환과 같은 추가적인 연구가 필요하다.
2. NHPCI와 개별상태지표간의 관계식을 도출하여 종합상태지표의 정량적 해석방안을 제시하였다.
3. NHPCI의 분포특성과 국도유지보수기준을 고려하여 개발된 서비스수준체계는 기존연구성과와 유사한 결과(예방적 보수 5.64~5.68, 덧씌우기 4.57~4.77, 대수선 3.76~3.82)을 보여 주었으며, 개별지표 중 균열이 보수기준에 가장 빨리 도달함을 알 수 있었다.
4. 현재 일반국도의 보수등급인 LOS-D에 해당하는 기대수명은 12.92년으로 나타났으며, LOS-B 등급 이후 파손이 점점 가속화되는 것으로 분석되었다.
5. 3- σ 규칙에 의거하여 살펴본 기대수명의 통계적 범위는 각각 1- σ =[11.93, 14.09], 2- σ =[11.10, 15.58], 3- σ =[10.42, 17.47]로 최소 2.2년에서 최대 7.05년까지 편차가 발생하는 것으로 분석되었다.
6. MTP의 갱신과정을 통해 네트워크 서비스수준 변화과정을 살펴본 결과 B(10)수명은 약 3년으로 나타났으며, 7년 까지 50.8%, 10년 차까지 72.7%, 그리고 포장의 설계수명인 20년에는 97.1%가 보수기준에 도달하는 것으로 나타났다.

REFERENCES

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1993), *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO, Washington, D.C.

Bayes, T. and Price, R. (1763), "An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chance. By the late rev. Mr Bayes,

communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, M. A. and F. R. S.", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 53, pp.370-418, DOI: 10.1098/rstl.1763.0053.

- Do, M., Lee, Y., Lim, K., and Kwon, S. (2012), "Estimation of Performance and Pavement Life using National Highway Pavement Condition Index", *J. of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 14, No. 5, pp.11-19 (in Korean).
- KEC (2012), *Highway Pavement Condition Survey and Analysis*, Korea Expressway Corporation (in Korean).
- Gelman, A. and Rubin, D.B. (1992), "Inference from Iterative Simulation using Multiple Sequences", *Statistical Science*, Vol. 7, No. 4, pp.457-511.
- Geweke, J. (1992), "Evaluating the Accuracy of Sampling-based Approaches to the Calculation of Posterior Moments", in Bernardo, J. M., Berger, J.M., Dawid, A.P. and Smith A.F.M (eds.), *Bayesian Statistics*, Oxford University Press, New York.
- Han, D., Kaito, K., and Kobayashi, K. (2014), "Application of Bayesian Estimation Method with Markov Hazard Model to Improve Deterioration Forecasts for Infrastructure Asset Management", *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 7, pp.2107-2119, DOI: 10.1007/s12205-012-0070-6.
- Han, D. and Lee, S. (2016), "Stochastic Forecasting of Life Expectancies considering Multi-maintenance Criteria and Localized Uncertainties in the Pavement-deterioration Process", *ASTM J. of Testing and Evaluation*, Vol. 44, No. 1, pp.679-691, DOI: 10.1520/JTE20140246.
- Hastings, W.K. (1970), "Monte Carlo Sampling Methods using Markov Chains and Their Applications", *Biometrika*, Vol.57, No.1, pp.97-109.
- Huang, Y.H. (2004), *Pavement Analysis and Design (2nd ed.)*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Institute of Public Works Engineering Australasia (IPWEA) (2015), *International Infrastructure Management Manual, 5th eds.*, Institute of Public Works Engineering Australasia.
- ISO (2014a), ISO 55000; *Asset Management - Overview, Principals and Terminology*, International Standard Organization, Geneva.
- ISO (2014b), ISO 55001; *Management System-Requirement*, International Standard Organization, Geneva.
- ISO (2014c), ISO 55002; *Management Systems-Guidelines for the Application of ISO 55001*, International Standard Organization, Geneva.
- Kaito, K. and Kobayashi, K. (2007), "Bayesian Estimation of Markov Deterioration Hazard Model", *J. of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 63(A), No. 2, pp. 336-355 (In Japanese).
- Kobayashi, K., Do, M., and Han, D. (2010), "Estimation of Markovian Transition Probabilities for Pavement Deterioration Forecasting", *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp.343-351, DOI: 10.1007/s12205-010-0343-x.
- Koop, G., Poirier, D.J., and Tobias J.L. (2007), *Bayesian Econometric Methods*, Cambridge University Press, N.Y., 2007.

- Lancaster, T. (1990), *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, New York.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A., and Teller, H. (1953), "Equations of State Calculations by Fast Computing Machines", *J. of Chemical Physics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1087-1091, DOI: 10.1063/1.1699114.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2010), *Annual Final Report of the National Highway Pavement Management System 2010*, MLTM.
- Odoki, J.B. and Kerali, H.G.R. (2000), *Highway Development and Management Series Vol. 4: Analytical Framework and Model Descriptions*, PIARC, La Defense Cedex.
- Raftery, A.E. and Lewis, S.M. (1992), "One Long Run with Diagnostics: Implementation Strategies for Markov Chain Monte Carlo", *Statistical Science*, Vol.7, No.4, pp.493-497, ODI:10.1214/ss/1177011143.
- Son, H., Kwon, S., Lee, J., Baek, C., Lim, J., Sin, H. (2013), "A Study for Determining the Rehabilitation Method Group using NHPCI on Asphalt Concrete Pavement of National Highway", *J. of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp.1-9, DOI : <http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2013.15.2.001> (in Korean).
- Train, K. E. (2009), *Discrete Choice Methods with Simulation (2nd ed.)*, Cambridge University Press, New York, USA.
- 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, DOI:10.1007/s12205-010-0343-x.
- Yoshida, T. (2016), "Composite Indicators for Assessing Maintenance Needs for Road Pavement from the Viewpoint of Road Functions", *J. of Japan Society of Civil Engineers(E1)*, Vol. 72, No. 1, pp.12-20, <http://doi.org/10.2208/jscejpe.72.12> (in Japanese).
- Zellner, A. and Min, C.K. (1995). "Gibbs Sampler Convergence Criteria", *J. of the American Statistical Association*, Vol. 90, No. 431, pp.921-927, DOI: 10.2037/2291326.