

NHPCI 지표를 활용한 공용성 추정과 수명 산정

Estimation of Performance and Pavement Life using National Highway Pavement Condition Index

도 명 식 Do, Myungsik
 이 용 준 Lee, Yong-Jun
 임 광 수 Lim, Kwang-Su
 권 수 안 Kwon, Soo-Ahn

정회원 · 국립한밭대학교 도시공학과 교수 (E-mail: msdo@hanbat.ac.kr)
 정회원 · 국립한밭대학교 도시공학과 석사과정 (E-mail: subak1020@hanmail.net)
 정회원 · 국토해양부 서울지방국토관리청 시설서기관 (E-mail: lim579@korea.kr)
 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 선임연구위원 (E-mail: sakwon@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The new methodology is proposed for estimation of long-term performance and pavement life based on the national highway database in Daejeon area. Furthermore, this study tried to verify the applicability of performance estimation using NHPCI (National Highway Pavement Condition Index) on tendency of pavement deterioration as time goes by under Korean road environments.

METHODS : Reliability theories are applied to estimate the mean life and to determine the appropriate distribution using 3 levels of traffic loads (high, medium, low) based on maintenance and rehabilitation history data for 15 years.

RESULTS : As a result, Lognormal distribution is suitable for explanation of pavement lifetime in Daejeon area regardless of traffic loads. In addition, we found that the results of mean life and maintenance timing based on NHPCI for the pavement sections of 3 levels of traffic loads are available.

CONCLUSIONS : Based on this study, it was found that mean life of high, medium and low levels of traffic loads are about 8.1 years, 12.2 years and 12.7 years, respectively. Higher level of traffic loads shorten the pavement mean life.

Keywords

pavement management system, national highway pavement condition index, mean life, performance estimation, maintenance timing

Main Author : Do, Myungsik, Associate Professor
 Hanbat National University, San 16-1 Dukmyoung-dong,
 Yuseong-gu, Daejeon, 305-719, Korea
 Tel :+82.42.821.1192 Fax : +82.42.821.1185
 email : msdo@hanbat.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
<http://www.ksre.or.kr/>
 ISSN 1738-7159 (Print)
 ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

1980년대 후반부터 우리나라는 공용중인 일반국도의 포장을 합리적이고 체계적으로 관리하기 위해 포장관리 시스템(PMS: Pavement Management System)을 도입하여 운영하고 있으며, 포장의 질을 최저의 비용을 통해 최적의 상태를 유지하는데 그 목적이 있다(한국건

설기술연구원, 2008).

포장구간의 효율적인 유지관리를 위한 의사결정 및 LCCA(생애주기비용분석)를 위한 가장 기초적인 분석이 바로 정확한 포장 수명(pavement life)의 산정과 공용성의 추정이다.

신뢰할 수 있는 도로구간의 수명예측을 위해서는 유

지보수 이력자료 등 관측된 수명 자료가 어떤 분포형태를 따르는지를 파악하는 것은 모집단의 수명분포를 이용하여 모수적 방법에 의한 신뢰성 척도에 대한 추론이 가능해지기 때문에 매우 중요한 과정이며, 관련 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다.

한편, 우리나라의 경우 도로 포장관리시스템 연구를 통해 일반국도 포장평가지수인 NHPCI(National Highway Pavement Condition Index)를 개발하였으며, 정책결정자, 도로관리, 도로 이용자가 전체 일반국도의 포장상태를 쉽게 파악할 수 있도록 정량적인 지표로 제시한 바 있다(한국건설기술연구원, 2008).

그러나 종합적인 도로구간의 상태(건전도)를 정량적인 방법으로 제시한 NHPCI 지표는 아직 현장에서 활용되지 못하고 있는 실정이며, 기존의 포장의 상태지수로 널리 사용되고 있는 IRI(International Roughness Index), MCI(Maintenance Control Index), PSI(Present Serviceability Index) 등의 지표간의 관련성 및 장기 공용성을 나타내는 지표로 활용될 수 있는지에 대한 검증도 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 1996년부터 2010년까지 최근 15년간의 포장 표면관측자료(균열, 러팅, IRI 등)와 유지보수 이력 자료를 기반으로 신뢰성 개념을 이용하여 실제 일반국도를 대상으로 조사한 아스팔트 포장 수명 자료를 가장 잘 설명하는 분포형태를 선정하고 추정된 모수를 기반으로 장래 수명을 산정하는 방안을 제시하고자 한다.

나아가, NHPCI 지표를 활용한 공용성 추정 즉, 시간 경과에 따른 NHPCI 값의 악화추세를 산정하여 실제 관측된 수명자료를 신뢰성 이론을 이용한 모수추정법으로 산정된 평균수명과 비교를 통해 국내에 맞는 적합한 모형인지 검증을 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 기존 연구 고찰 및 방법론

2.1. 기존 연구 고찰

포장의 효율적인 유지관리를 위해서는 필요한 예산의 추정과 유지보수의 시점 및 공법 결정을 위한 의사결정 로직이 필요하며, 이 과정에서 해당 도로구간의 수명 예측이 매우 중요하다. 즉, 과거 및 현재 포장의 상태를 기반으로 장기 공용성(수명)의 추정과정은 유지보수가 필요한 구간의 예측과 필요한 예산의 추정에 중요한 기초 정보로 활용되기 때문이다.

국내의 경우, 포장의 공용성에 대한 기존 연구로는 회귀모델을 이용한 연구(권수안, 2002; Kim, 2006)와 Markov chain 모델을 이용한 확률론적 공용성 예측에 대한 연구(유평준, 2002) 등이 있다. 한편, 생애주기비용을 통한 사회간접자본의 자산가치에 대한 연구(Chung, 2006; 도명식, 2009)와 신뢰성 개념을 도입하여 포장 수명의 적정 확률분포형태의 선정과 수명 예측에 대한 연구도 최근 활발히 이루어지고 있다(도명식 외, 2010; Do, 2011).

국외의 최근 연구 동향을 살펴보면, Markov Chain을 이용한 공용성 추정 및 추이확률에 대한 연구(Mishalani and Madnat, 2002; Yang, et al., 2005; Kobayashi et al., 2010)와 Duration 모델을 이용해 포장악화(파손)의 위험률(hazard) 함수형태를 분석한 연구 등이 있다(Loizos et al., 2005). 특히 Loizos (2005)는 유럽 국가를 대상으로 한 분석에서 크랙의 파손이 대수정규(Lognormal) 헤저드 모델로 설명됨을 밝혔다.

포장의 수명(공용성)은 교통량, 기후, 포장강도, 공용기간, 대형차량 비율, 평탄성 등 다양한 인자들의 영향을 받으며, 특히 그 가운데에서 총 교통량(AADT)과 같은 절대값 보다는 하중의 강도 예를 들어, 축하중 교통량(ESAL: Equivalent Single-Axle Loads)의 크기가 포장의 수명에 더 큰 영향을 미친다는 연구결과가 많이 보고되고 있다(권수안, 2002; Gharaibeh et al., 2003). 여기서, ESAL이란 혼합교통량을 설계교통량으로 환산하기 위하여 표준 단축하중(8.2t) 교통량으로 환산한 교통량을 말하며, 현재 우리나라는 버스는 0.3, 경트럭은 0.1, 중트럭은 1.2, 트레일러는 2.0의 환산계수를 적용하고 있다(한국건설기술연구원, 2010).

한편, 도명식·권수안(2010)의 연구에서 신설과 덧씌우기 구간을 대상으로 최적 수명분포를 선정하고 평균 수명 및 신뢰도를 산정한 바 있지만 포장구간의 교통량 및 과거 유지보수 이력자료를 기반으로 한 수명예측과 모수적 분석을 시도한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 NHPCI 검증을 위해 대전지방 국토관리청 관할 국도의 유지보수(신설 포함) 이력 자료를 이용하였으며, 축하중 교통량의 크기를 기준으로 3가지로 구분된 국도의 포장표면자료(균열, 러팅, IRI 등)를 이용하여 경년적 악화수준을 산정하는 방안을 제시한다. 나아가 모수적 추정방법에 의해 산정한 평균수명과 실제 유지보수 이력자료를 이용하여 산정한 실제 수명을 비교하여 NHPCI 지표의 적용가능성을 살펴보

고자 한다.

2.2. 포장의 수명과 신뢰성 이론

신뢰성 이론에 근거한 분석 자료는 대부분 부품이나 시스템의 고장(파손)이 발생할 때까지의 수명의 길이에 대한 것으로 단위는 시간으로 측정된다. “포장 구간의 수명은 포장구간이 공용을 시작하여 파손으로 인해 덧씌우기 등 유지보수 작업을 하기 전까지의 공용년수를 말하며, 유지보수가 이루어진 포장의 경우 다음 덧씌우기나 재포장을 하기 전까지의 공용년수”를 말한다(권수안, 2002).

따라서 본 연구에도 공용 개시 시점에서 포장표면의 노화에 따라 유지보수 기준(임계값)에 도달한 구간 가운데 유지보수(덧씌우기)가 이루어진 시점까지의 경과 시간과 현재 공용중인 구간 자료(수명, 포장표면, 교통량 등)를 그 분석 대상으로 하였다.

한편 통계적 추론의 방법으로는 획득한 자료의 모집단이 특정 분포를 따른다는 가정 하에서 적용되는 모수적 방법과 모집단의 분포에 대해 연속성이나 대칭성 등을 제외한 가정을 할 수 없는 경우에 적용되는 비모수적 방법이 있으며(배도선, 1999), 고장(파손)확률은 대상 구간이 일정한 기간 내에 고장 날(임계값 이하로 떨어져 유지보수를 해야 할) 확률로 정의되며, 생존확률은 고장 확률과 반대의 개념으로 살아있을(공용 가능할) 확률로 정의된다(도명식, 2010).

한편, 생존확률함수 $R(t)$ 는 누적 확률밀도함수 $F(t)$ 의 여함수로 정의된다(Eq. (1) 참조). 고장확률함수는 $f(t)$ 의 누적 확률밀도함수로 정의되고 Eq. (3)에서와 같이 미분한 값은 확률밀도함수 $f(t)$ 가 된다(Lancaster, 1990; 배도선, 1999).

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^\infty f(t)dt \quad (1)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (2)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3)$$

생존확률함수는 대상 포장구간의 수명이 t 년 이상 지속될 가능성을 나타내는 척도이며, 누적확률함수는 대상 포장구간의 수명이 t 년 이전에 고장(파손 즉, 공용불가능 상태)날 가능성을 나타내는 척도이다.

한편, 대상 포장구간의 수명특성을 나타내는 지표로

평균수명(mean life)은 연속확률변수 T 의 확률밀도함수가 $f(t)$ 일 때, Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다,

$$E[T] = \int_0^\infty tf(t)dt \quad (4)$$

모수적 방법을 이용하기 위해서는 고장률 함수(혹은 위험률 함수)의 산정이 선행되어야 하며, 이는 대상 포장구간 가운데 t 년까지 고장(파손)없이 공용중인 구간 가운데 t 년에서 고장날 비율을 나타내는 것으로 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있고, Eq. (5)의 양변을 t 에 대해 적분하면 Eq. (6)을 얻을 수 있다.

$$\lambda_t = \frac{1}{R(t)} \left(-\frac{d}{dt} R(t) \right) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad 0 \leq t \leq \infty \quad (5)$$

$$\int_0^t \lambda(u)du = -\int_0^t \frac{d}{du} \{ \ln R(u) \} du = -\ln R(t) \quad (6)$$

따라서 수명 자료가 어떤 분포를 따르든 Eq. (7)이 성립한다.

$$R(t) = \exp \left\{ -\int_0^t \lambda(u)du \right\} \quad (7)$$

신뢰성 이론에서 수명분포로 많이 이용되는 것이 지수분포, 와이블분포, 정규분포, 대수정규분포이며, 분포의 특징에 대한 자세한 내용은 기존 연구성과(Lancaster, 1999; Gourieroux, 2000; 박동호, 2006; 도명식, 2010; Do, 2011)를 참조하기 바란다.

관측된 포장의 수명(혹은 파손) 자료가 어떤 수명분포를 따르는지를 파악하는 것은 모집단의 수명분포를 이용하여 모수적 방법으로 신뢰성 척도에 대한 추론이 가능해져 정확한 통계적 분석을 할 수 있기 때문에 매우 중요하다(Gourieroux, 2000; 도명식·권수안, 2010).

3. NHPCI 지표의 적용성 검증

3.1. NHPCI 개요

포장의 상태를 나타내는 지표는 다양하며, 일반적으로 포장의 상태 및 파손지표로 쓰이는 것은 균열(Crack, %), 소성변형(rutting, mm), 라벨링(ravelling, %), 가장자리파손(edge break, m²), 포트홀(pothole, 개), 중단평탄성(IRI, International

Roughness Index, m/km)으로 이중 중단평탄성은 포장의 종합지표로도 많이 쓰인다.

한편, 도로의 공용성을 판단하는 지표는 국가나 지역 별로 다양하다. 특히 미국을 중심으로 한 지역의 PSI(Present Serviceability Index)와 세계은행에서 개발한 HDM-4에서 주로 이용하고 있는 IRI, 일본에서 주로 사용하는 MCI(Maintenance Control Index) 지표 등이 있다.

우리나라의 경우 지금까지 고유의 공용성 평가지표가 없어 세계은행에서 제시한 IRI를 주로 사용하여 국도의 유지관리를 위한 기준 지표로 사용하여 왔으나, 도로 포장관리시스템 연구과제에서 일반국도 포장평가지수인 NHPCI를 개발하였다.

$$NHPCI = \frac{1}{(0.33 + 0.003 \times X_{CR} + 0.004 \times X_{RD} + 0.0183 \times X_{IRI})^2} \quad (8)$$

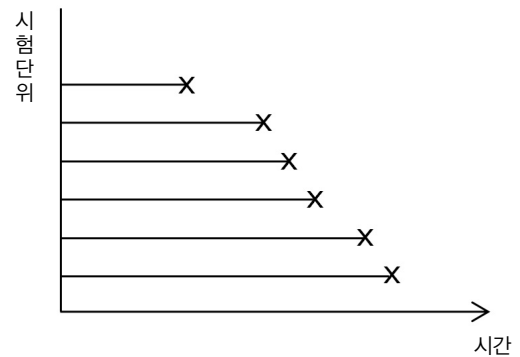
NHPCI는 포장조사구간 40개의 구간을 대상으로 국도관리사무소의 포장관리자, 산학연의 포장 전문가들로 구성된 10인의 포장 전문 패널위원들이 제시한 평균값으로 사용하였으며, 포장상태에 대한 정성적인 평가를 정량적인 지수로 나타내기 위해 다양한 상태의 포장도로를 패널 평가한 후 소성변형, 균열율, IRI 등 정량적 포장 상태 자료를 독립변수로 놓고, 패널의 정성적 평가 결과를 종속변수로 한 중회귀분석을 실시하여 지표를 산출하였다(한국건설기술연구원, 2008).

3.2. 분석대상지역

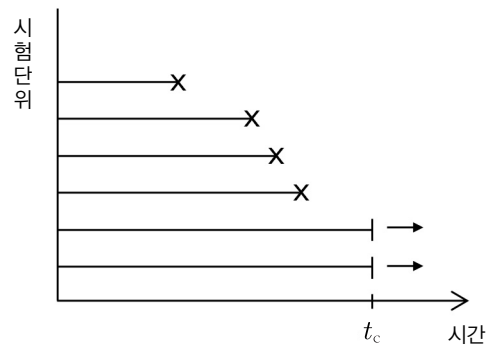
포장의 하중 수준별 평균 수명 및 시간경과에 따른 NHPCI 악화 추세를 살펴보기 위해 대전지방국토관리청 관할의 국도 이력자료를 사용하였다. 또한, 기존 연

구(도명식, 2010; Do, 2011)에서는 완전자료 즉, 도로가 파손되어 유지보수공사가 시행된 구간만을 이용하였지만, 본 연구에서는 장기간 공용중인 도로구간의 수명자료가 누락될 수 있다는 점에 착안하여 1종 관측중단 자료를 사용하였다.

즉, 2010년을 기준으로 현재 공용중인 자료도 포함하여 분석을 실시하였다. 다시 말하면, 주어진 시험시간(2010년) 까지의 고장개수가 확률변수가 되는 관측중단 방법을 이용하였다.



(a) Complete Data



(b) Censored Data

Fig. 1 Complete Data and Censored Data

관측중단자료를 포함한 또 다른 이유는 포장 재료의 개선과 시공 기술의 발달로 인한 도로 포장구간의 수명

Table 1. Examples of NHPCI Calculations on Each Section

Inter val	Pavement Condition												AADT	ESAL	NHPCI			
	2007			2008			2009			2010					2007	2008	2009	2010
	Crack (%)	RUT (mm)	IRI (m/km)	Crack (%)	RUT (mm)	IRI (m/km)	Crack (%)	RUT (mm)	IRI (m/km)	Crack (%)	RUT (mm)	IRI (m/km)						
A	0.4	7.7	1.8	1.0	7.0	1.9	3.3	5.5	4.0	14.5	7.2	3.0	9246	551	6.43	6.38	5.28	4.76
B	0.7	2.0	1.1	1.0	4.1	0.9	0.9	3.4	1.4	0.8	6.9	3.0	3952	740	7.71	7.48	7.23	5.81
C	0.4	5.0	1.9	0.1	7.1	2.0	1.3	5.2	2.4	3.4	5.1	2.3	4198	335	6.71	6.37	6.29	6.15
D	0.6	8.3	2.2	1.2	8.5	2.2	1.4	8.0	3.1	0.1	4.5	15.5	29077	1597	6.10	5.99	5.59	2.50

의 변화도 함께 분석하기 위함이다.

시간의 경과에 따른 NHPCI의 변화, 즉 경년적 NHPCI 악화수준을 산정하기 위해, 대전지방국토관리청 관할의 국도를 대상으로 1996년~2010년 동일구간의 연도별 NHPCI 지수를 산정하여 매년 악화수준을 살펴보았다.

2010년을 자료 취득을 위한 기준시점으로 정하고 이 시점으로부터 최종 유지보수 시점에서 경과된 시간을 기준으로 축하중 레벨로 분류하였다. 하중에 따른 구분은 기존 연구를 기초로 Low 구간은 ESAL 0~2,000, Medium 구간은 2,000~5,000, High 구간은 5,000이상으로 선정하였다(Tsunokawa, 2003; 도명식, 2010).

대전청의 경우, Low 456개 구간, Medium 91개 구간, High 8개 구간으로 분류하여 분석하였다. 하중강도가 High인 구간이 제외된 것은 Table 2와 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 High 구간의 데이터 수의 부족으로 결과값의 신뢰도가 떨어지기 때문이며, NHPCI 지수가 시간경과에 따라서 악화되는 것이 비정상이거나, 역전되는 현상이 발생한 구간들은 제외하였기 때문이다.

Table 2. Targeted Analysis Data of Different ESAL Levels

	National Highway in Daejeon Area		
	Low	Medium	High
After 3 Years	16	1	0
After 4 Years	36	5	0
After 5 Years	45	14	0
After 6 Years	63	14	3
After 7 Years	69	12	0
After 8 Years	64	9	3
After 9 Years	29	9	0
After 10 Years	32	11	0
After 11 Years	32	7	2
After 12 Years	34	4	0
After 13 Years	36	5	0
Total	456	91	8

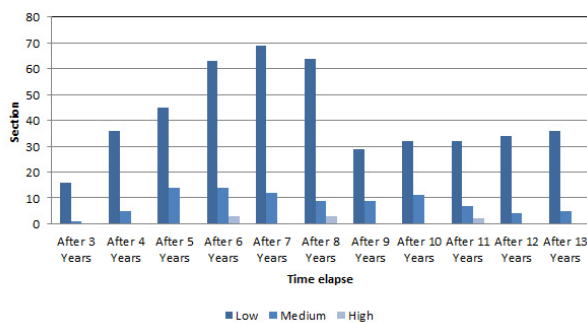


Fig. 2 Distribution of ESAL Levels(Daejeon Area)

따라서 본 연구에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 ESAL을 기준으로 Low수준과 Medium수준의 포장표면자료 및 유지보수 이력자료를 기반으로 신뢰성 개념을 통하여 산정된 평균수명 및 시간경과에 따른 NHPCI 악화수준의 비교를 통하여 NHPCI 적용가능성을 검증하고자 한다.

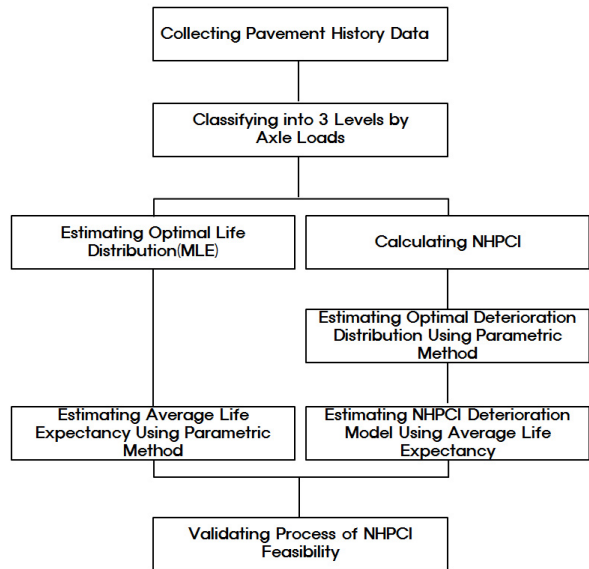


Fig. 3 Validation Process NHPCI Feasibility

4. 수명 분포의 선정과 모수 추정

4.1. 최대우도추정법을 이용한 모수 추정

본 연구의 일차적인 목적은 포장의 유지보수 이력자료 즉, 수명자료를 이용하여 적합한 모수적 수명 분포를 파악하고 여기서 구한 모수를 이용하여 포장의 수명을 추정하는 것이다.

관측된 수명자료가 어떤 수명분포를 따르는가는 신뢰성 분석에서 매우 중요한 과정으로 이러한 모집단의 수명분포가 찾아지면 모수적 방법에 의한 신뢰성 척도를 추론할 수 있다.

이러한 모수적 수명분포의 모형을 위한 모수 추정에는 확률지(Probability Paper)를 이용하는 방법과 최대우도 추정법(MLE, Maximum Likelihood Estimation)을 이용한 방법이 주로 사용되며, 본 연구에서는 신뢰성 분야에서 많이 이용되는 최대우도 추정법을 이용하였다(배도선, 1999).

최대우도 추정법은 확률밀도함수 $f(t)$ 를 가지는 어떤 모집단으로부터 n 개의 표본을 추출하였을 때 이 표본을 이용하여 $f(t)$ 를 결정하는 모수의 추정 방법 가운데

데 하나로 통계적으로 여러 바람직한 성질들을 만족하므로 많이 사용되고 있다(배도선, 1999; 도명식, 2010; 青木, 2005).

확률밀도함수 $f(t)$ 를 가지는 모집단으로부터 서로 독립적인 관측값 t_1, t_2, \dots, t_n 을 얻었을 때, $f(t)$ 의 모수를 θ 라 하면 θ 의 우도함수(Likelihood Function)는 Eq. (9)와 같이 정의된다.

$$L(\theta) = f(t_1, \theta)f(t_2, \theta) \cdots f(t_n, \theta) \quad (9)$$

즉, θ 의 우도함수 L 은 t_1, t_2, \dots, t_n 이 주어졌을 때 θ 의 함수로 표현되며 이 함수를 최대로 하는 θ 의 값을 최대우도 추정값(Maximum Likelihood Estimator: MLE)이라 부르며, 계산의 편리성 때문에 자연대수를 취한 대수우도함수(log likelihood function)를 많이 사용하며, 극대화하고자 하는 목적함수인 대수우도함수는 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Max}_\theta \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i, \theta) \quad (10)$$

한편, 최우추정량을 구하기 위해 본 연구에서는 Newton-Raphson법을 사용하였으며, 근사해를 구하기 위한 수렴 판정기준은 0.0001로 하였다.

최대우도 추정법을 이용하여 최적 수명분포의 선정을 위해 비교한 4가지 분포(지수, 와이블, 대수정규, 정규 분포)별 모수와 척도들의 결과를 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3. Estimates of Optimal Life Distribution (Anderson-Darling)

	National Highway in Daejeon Area		
	Low	Medium	High
Weibull	18.835	23.804	22.388
Log-Nomal	13.665	22.063	22.259
Exponential	81.083	29.749	23.164
Normal	29.243	25.668	22.562

축하중 레벨에 따른 최적 수명분포를 추정할 결과, 축하중의 크기와 상관없이 모두 대수정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 해당 수명자료가 특정 분포를 얼마나 잘 따르는가를 측정하기 위한 적합도 검정에는 AD(Anderson-Darling) 통계값을 사용하였으며, AD 통계량은 Eq. (11)과 같다.

$$Q_n = n \int_{-\infty}^{+\infty} [F_n(x) - F(x)]^2 \psi(x) dF(x) \quad (11)$$

여기서, $\psi(x)$ 는 가중치 함수로, $\psi(x) = [F(x)(1 - F(x))]^{-1}$ 인 경우 AD 통계량이라고 하며 일반적으로 Eq. (12)와 같이 표시한다.

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)(1 - F(x))} dF(x) \quad (12)$$

최적 수명분포의 선정을 위해서는 AD 통계량이 작으면 작을수록 특정 분포를 따르게 되는 적합성이 크다고 판단할 수 있다.

4.2. 평균수명 산정

포장의 수명자료가 대수정규분포를 따를 때 신뢰성 이론을 이용하면 평균수명, 분산, 신뢰도 및 B_{10} 수명 등 PMS의 운영에 매우 유용한 정보를 얻을 수 있다(도명식, 2010).

먼저 포장의 평균수명과 분산은 이미 구한 위치모수와 척도모수를 이용하여 Eq. (13), Eq. (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E[T] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (13)$$

$$\sigma^2 = e^{(2\mu + \sigma^2)(e^{\sigma^2} - 1)} \quad (14)$$

또한 신뢰도를 이용하면 현재 국도의 설계 수명인 10년을 어느 정도의 확률로 공용할 수 있는 가를 산정할 수 있다. Eq. (15)에 이미 구한 모수를 대입하면 대상 구간이 10년이 되었을 때의 신뢰도를 구할 수 있다.

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) \quad (15)$$

나아가 B_{10} 수명은 통상 대상 아이템의 불신뢰도가 10%에 도달하는 시점을 말하는 것으로 p 번째 백분위수(p -fractile)에서 $p=0.1$ 인 경우를 말한다.

대상 구간의 포장수명이 대수정규분포를 따르는 경우 $0 < p < 1$ 의 값에 대한 p 번째 백분위수 B_{100p} 는 $P(T < B_{100p}) = p$ 를 만족하는 값으로 정의할 수 있으므로

다음의 관계가 성립한다.

$$R(B_{100p}) = 1 - p = 1 - \Phi\left(\frac{\ln B_{100p} - \mu}{\sigma}\right) \quad (16)$$

따라서 이 방정식을 B_{100p} 에 대해 정리하면

$$B_{100p} = \exp[\sigma\Phi^{-1}(p) + \mu] \quad (17)$$

가 얻어진다. 따라서 Eq. (17)을 이용하면 대상 구간의 불신뢰도가 10%에 도달하는 시점을 산정할 수 있다 (여현동, 2010; Do, 2011).

포장의 수명 자료가 대수정규분포를 따를 때 하중별 평균수명산정을 위해 Eq. (13), Eq. (14), Eq. (17)을 이용하여 산정한 결과를 요약하면 Table 4와 같다.

Table 4. Average Life Expectancy and Applications

	Average Life	R(t=10)	B_{10} 수명
Low	12.737	56.3%	5.372
Medium	12.189	54.1%	5.330
High	8.074	22.7%	4.589

먼저, 평균수명을 살펴보면 대전청의 경우 Low 구간이 12.7년, Medium 구간이 12.2년, High 구간이 8.1년으로 축하중 레벨이 낮을수록 평균수명이 길어짐을 확인할 수 있다. 이는 기존 연구에서 포장의 파손이 교통량의 절대값보다는 하중의 강도에 더 큰 영향을 받는다는 것과 일치하는 결과임을 확인할 수 있다.

또한 현재 국도의 설계 수명인 10년이 되었을 때의 신뢰도를 살펴보면 대전청의 경우 Low 구간이 56.3%, Medium 구간이 54.1%, High 구간이 22.7%로 평균수명과 마찬가지로 하중강도가 적을수록 신뢰도가 커짐을 알 수 있다.

4.3. NHPCI 악화추세 분포

대상구간의 악화추세를 산정하기 위하여 1996년~2010년 대전지방국토관리청의 포장이력자료를 이용하여 각 구간의 유지보수 직후부터 1년씩 시간이 경과할 때의 NHPCI 지수를 분석 후 경년적 악화수준을 산정하였다.

한국건설기술연구원(2010)에서 국도포장 상세조사구간 자료를 이용하여 NHPCI를 산정하여 분석한 결과, NHPCI 5 이하 구간은 덧씌우기 또는 절삭 덧씌우기의 공법이 필요하다고 제시한 바 있다. 나아가 전국 일반국도 포장노면상태를 국토관리청별로 정리한 결과 NHPCI 6정도로 양호한 상태이며 전국의 전반적인 포장상태는 비슷한 것으로 나타났다(한국건설기술연구원, 2010).

따라서 본 연구에서도 기존 연구 성과를 고려하여 유지보수 기준을 NHPCI가 5수준에 도달하는 시점으로 정하였다.

Fig. 4는 대상구간에 대하여 시간의 경과에 따른 노면상태의 NHPCI 지수의 변화과정을 나타내고 있으며, 각 연도별 NHPCI 지수를 산정한 후, 시간경과별 악화 예측모델을 구축하였다.

즉, 해당 대상구간에 대해 시간경과별 악화수준을 산정한 뒤, 2010년을 기준으로 최종유지보수 시점으로부터 경과되는 시간에 따라 분석하였다.

여기서 Table 3은 하중강도별 유지보수 이력(수명)자료를 이용하여 적합한 분포를 찾는 방안을 제시한 반면,

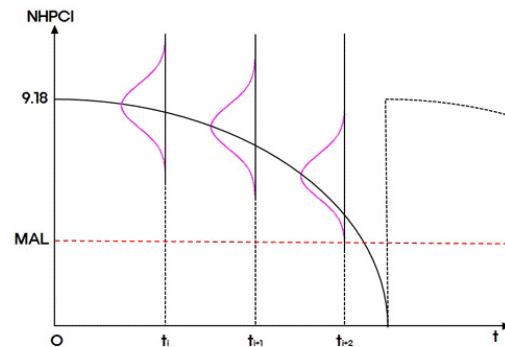


Fig. 4 NHPCI Deterioration Distribution with Time Elapse

Table 5. Estimates of Optimal Deterioration Level Distribution for NHPCI(Anderson-Darling)

구분		3years	4years	5years	6years	7years	8years	9years	10years	11years	12years	13years
Low	Weibull	1.00	0.73	0.52	0.72	0.38	0.77	0.85	0.32	1.02	0.79	0.73
	Log-Nomal	1.07	1.02	1.02	1.69	1.46	2.03	1.03	0.64	1.12	1.10	1.11
	Exponential	1.00	0.87	0.54	1.26	0.52	0.82	1.21	0.83	1.03	0.97	0.93
	Normal	1.59	2.36	1.91	1.82	3.39	2.83	3.35	2.80	3.25	2.16	2.31
Medium	Weibull	-	2.56	1.40	1.25	1.37	1.55	1.57	1.46	2.52	3.14	2.57
	Log-Nomal	-	2.57	1.25	1.51	1.34	1.55	1.68	1.77	2.40	3.17	2.62
	Exponential	-	2.93	2.10	2.21	2.21	1.54	2.15	1.49	2.53	3.14	2.79
	Normal	-	2.65	2.79	1.14	2.37	1.95	1.55	1.53	2.96	3.29	2.54

Table 5의 경우에는 Fig. 4에서 표현하고 있는 바와 같이 유지보수 이후 시간이 경과(1년씩)함에 따라 측정된 포장표면자료를 근거로 산출된 NHPCI지수가 어떠한 분포형태에 적합한가를 산정한 결과이다.

Table 5는 시간경과에 따른 NHPCI 악화수준이 어떤 분포형태를 따르는지를 살펴본 결과를 종합한 것으로, 대전청 Medium 구간의 최적 NHPCI 악화수준분포는 여러분포의 형태를 띠고 있었으며, 대전청 Low 구간의 경우는 시간경과에 상관없이 모두 와이블 분포의 형태를 띠고 있음을 확인할 수 있다.

4.4. NHPCI 악화추세 산정

시간경과에 따른 NHPCI 평균 악화수준 산정은 신뢰성 이론을 이용하여 각 분포별 모수를 통하여 아래 과정을 통하여 구할 수 있다. 먼저 지수분포, 와이블분포 및 대수정규 분포를 따를 경우 각각 Eq. (18)~(20)을 이용하면 구할 수 있다.

$$E(T) = \int_0^{\infty} xf(x)dx = \int_0^{\infty} x\lambda e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda} \quad (18)$$

$$E(T) = \frac{\eta}{m} \Gamma\left(\frac{1}{m}\right) \quad (19)$$

$$E[T] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (20)$$

시간경과에 따른 평균 NHPCI 악화수준 산정결과를 요약하면 Eq. (21)과 Eq. (22)와 같다. 예를 들어 Eq. (21)에서 t=10 즉, 하중강도가 Low인 구간의 평균 NHPCI는 10년동안 3.54만큼 나빠짐으로 유지보수 직후의 NHPCI가 9.18임을 감안하면 10년이 지난 시점에서의 NHPCI는 5.64가 됨을 알 수 있다(Eq. (8) 참조).

$$\text{누적 } NHPCI(t)_{Low} = 0.459t - 1.0472 (t \geq 3) \quad (21)$$

$$\text{누적 } NHPCI(t)_{Medium} = 0.1778t^{1.313} \quad (22)$$

대전청 구간을 대상으로 한 하중별 누적 NHPCI 수준을 추정한 결과, Eq. (21)과 같이 Low 구간의 경우 선형회귀에 가장 적합($R^2=0.99$)하였으며, Medium 구간의 경우 Eq. (22)와 같이 거듭제곱회귀에 가장 적합($R^2=0.98$)한 것으로 나타났다.

3.1절에서 설명한 기존연구(한국건설기술연구원, 2008)에서 NHPCI 5이하의 구간은 덧씌우기 또는 절

삭 덧씌우기의 공법이 필요하다고 제시한 바 있다.

따라서 기존 연구와의 정합성을 살펴보기 위해 대전청 관할 국도를 대상으로 한 포장의 관측 자료를 기반으로 구한 평균수명 즉, 유지보수 시기와 NHPCI 예측모델을 비교 검증하기로 한다.

Eq. (21)과 Eq. (22)를 이용하면 유지보수가 실시되고 t년 경과시점에서의 NHPCI값을 예측할 수 있다. 즉, Low 구간과 Medium 구간의 NHPCI 예측모델은 Eq. (23)과 Eq. (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$NHPCI(t)_{Low} = 10.2272 - 0.459t (t \geq 3) \quad (23)$$

$$NHPCI(t)_{Medium} = 9.18 - 0.1778t^{1.313} \quad (24)$$

Eq. (23), (24)에서 유추할 수 있는 바와 같이, 대전청 Low 구간의 경우 어느 정도 일정하게 악화되는 반면에, Medium 구간의 경우 초기에 완만하게 악화되다가 12년 이후에 급속하게 악화된다.

본 연구에서 제안한 신뢰성이론을 이용하여 구한 Low 구간과 Medium 구간의 평균수명이 약 12.7년과 12.2년이었으므로(Table 4 참조), NHPCI 악화예측모델에 t=12를 대입하면 하중별로 NHPCI값이 4.719와 4.5359가 되어 유지보수 후 11년에서 12년이 새로운 유지보수 시점이 되는 것을 확인할 수 있다.

이는 4.2절에서 제안한 신뢰성이론을 이용하여 산정한 하중별 평균수명과 NHPCI 악화예측모델을 이용해 산정한 유지보수 시기가 거의 일치함을 의미하기 때문에 국도의 유지관리를 위한 의사결정에 NHPCI 지표를 활용할 수 있음을 알 수 있다.

향후 본 연구에서 제안한 방법을 통하여 각 지방청 관할 국도의 이력자료를 이용하여 각 지역의 악화추세 특성을 살펴볼 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 산정된 NHPCI 악화추세지수를 통하여 유지보수 구간 예측이 가능하므로 각 연도별 유지보수 예산을 산정하는데 많은 도움을 줄 것이라 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 신뢰성 개념을 도입하여 최근 15년간의 대전지방국토관리청 관할의 국도구간을 대상으로 3가지 하중강도별 포장 표면과 유지보수 이력 자료를 기반으로 신뢰성 개념을 이용하여 아스팔트 포장 수명 자료를 가

장 잘 설명하는 분포형태를 선정하고 추정된 모수를 기반으로 장래 수명을 산정하는 방안을 제시하였다.

분석 결과 대상 지역 포장의 수명 자료를 가장 잘 설명하는 수명분포는 대수정규(Lognormal)분포이며, 하중별(Low, Medium, High) 평균수명은 각각 12.7년, 12.2년, 8.1년으로 나타났다.

나아가, NHPCI 지표를 활용한 공용성 추정 즉, 시간 경과에 따른 NHPCI 수준을 산정하여 국내에 맞는 적합한 모형인지 검증하기 위해, 신뢰성이론을 이용하여 추정된 평균수명과 NHPCI 악화예측모델에 의해 추정된 유지보수 시기를 비교한 결과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 즉, NHPCI 평가지표의 활용가능성을 확인하였다.

마지막으로, 하중강도가 작은(Low) 구간의 경우 도로의 포장표면 상태가 선형으로 악화되는 반면, 하중강도가 중간인(Medium) 구간의 경우에는 12년을 경과하면서 급격히 나빠짐을 확인하여 향후 예방적 유지보수 등 유지보수 전략수립에 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

본 연구는 기존 국도의 포장상태를 나타내는 지표를 외국의 기준이 아닌 국내에서 개발한 NHPCI를 활용하여 하중수준별 악화예측을 처음 시도한 연구로 그 의미가 있으며, 본 연구에서 제안한 악화예측과 평균수명 산정방법을 이용하면 유지보수 구간의 수요산정이 가능하며, 각 연도별 유지보수 예산을 추정하는데 많은 도움이 되리라 기대된다.

References

Bae, D.S., Jeon, Y.L., 1999. *Reliability Analysis*, ARKHE

Chung, S., Hong, T., Han, S. Son, J. and Lee, S., 2006. Life cycle cost analysis based optimal maintenance and rehabilitation for underground infrastructure management. *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol.10, No.4, 243-253.

Do, M.S. and Kim, J.H., 2009. Asset Evaluation Method for Road Pavement Considering Life Cycle Cost, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.1D, pp.63-72.

Do, M.S., 2010. Estimation of Mean Life and Reliability of Highway Pavement Based on Reliability Theory, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.30 No.5, pp.497-504.

Do, M.S. and Kwon, S.A., 2010. Selection of Probability Distribution of Pavement Life Based on Reliability Method, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.12, No.1, pp.61-69

Do, M.S., 2011. Comparative analysis on mean life reliability with functionally classified pavement sections, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.15, No.2 pp.261-270.

Gharaibeh, N.G., and Darter, M.I., 2003. Probabilistic analysis of highway pavement life for Illinois, *Transportation Research Record 1823*, No.03-4294, pp.111-120,

Gourieroux, C., 2000. *Econometrics of qualitative dependent variables*, Cambridge Univ. Press.

KICT., 2008. *2007 Annual Research Report of the National Highway Pavement Management System*.

KICT., 2010. *2009 Annual Research Report of the National Highway Pavement Management System*.

Kim, S. and Kim, N., 2006. Development of performance prediction models in flexible pavement using regression analysis method, *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol.10, No.2, pp.91-96.

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.

Kwon, S.W., Jung, K.Y., Seo, Y.C., 2002. A Study on Decision Criteria of traffic volumes for Choosing of Modified Asphalt Pavement in Korea National Highway, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.4, No.3, pp.25-33

Lancaster, T., 1990. *The econometric analysis of transition data*, Cambridge Univ. Press.

Lee, Y.J., Do, M.S., Lim, K.S., Lee, S.H., 2011. Applicability of National Highway Pavement Condition Index and Estimation of Maintenance Demand and Agency Cost, *Proceedings of the KSRE Conference 2011*, pp.203-207.

Loizos, A. and Karlaftis, M.G., 2005. Prediction of pavement crack initiation from in-service pavements: A duration model approach, *J. of the Transportation Research Board*, No.1940, *TRB*, pp.38-42.

Mishalani, R. G., and Madanat, S. M., 2002. Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models, *J. of Infrastructure Systems*, 8(4), pp.139-148.

Park, D.H., Lim, J.H., Nam, K.H., 2006. *Concept and application of lifetime distribution for Engineers*, Youngji Munhwa-sa.

Tsunokawa K. and Ul-Islam, R., 2003. Optimal Pavement Design and Maintenance Strategy for Developing Countries: An Analysis using HDM-4, *The Intl. J. of Pavement Engrg*, Vol.4, No.4, pp.193-208.

Yang, J., 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*, Vol.131, No.11, pp.861-872.

You, P.J., Lee, D.H., 2002. Methodology of a Probabilistic Pavement Performance Prediction Model Based on the Markov Process, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.4, No.4, pp.1-12

青木一也・山本浩司・津田尚胤・小林潔司., 2005. 多段階ワイブル劣化ハザドモデル, *土木學會論文集*, No.798, VI-68, pp.125-136.

(접수일 : 2012. 1. 3 / 심사일 : 2012. 1. 8 / 심사완료일 : 2012. 9. 3)