

신뢰성 개념을 이용한 적정 포장 수명분포 선정

Selection of Probability Distribution of Pavement Life Based on Reliability Method

도 명 식 Do, Myung-Sik
권 수 안 Kwon, Soo-Ahn

정회원 · 국립한밭대학교 토목환경도시공학부 교수 (E-mail : msdo@hanbat.ac.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 책임연구원 (E-mail : sakwon@kict.re.kr)

ABSTRACT

In this paper, we present the methodology about an optimal probability distribution selection as well as survival rate estimation with the national highway database from 1999 to 2008. Probability paper methods are adopted to estimate the parameters of each hazard model. The goodness-of-fit test, such as the Anderson-Darling statistics, was performed. As a result, we found that Lognormal distribution is an appropriate distribution of newly constructed sections as well as overlaid sections. We also ascertained that the results of survival rate for pavement life between the proposed method and observed data are similar. Such a selection methodology and measures based on reliability theory can provide useful information for maintenance plans in pavement management systems as long as additional life data on pavement sections are accumulated.

KEYWORDS

pavement management system, reliability theory, hazard model, probability distribution, probability paper

요지

본 연구에서는 신뢰성 개념을 도입하여 최근 10년간의 수원과 의정부 지역의 일반국도 아스팔트 포장구간의 수명 데이터를 기반으로 적합한 모수적 수명분포 선정과 헤저드 함수 및 생존확률을 추정하였다. 최적 수명분포형을 찾기 위해 확률지 개념을 이용하여 모수를 추정하였으며 적정 확률분포형태의 결정은 Anderson-Darling 통계값을 이용하였다. 그 결과 분석 대상 지역 포장의 수명 데이터를 가장 잘 설명하는 수명분포는 대수정규(Lognormal)분포인 것으로 분석되었다. 또한 본 연구에서 제안한 대수정규분포에 의해 추정된 생존확률함수는 실제 관측값과 차이가 거의 없음을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 신뢰성 개념을 이용한 분석 방법은 포장 관리 및 유지보수 데이터가 축적되어감에 따라 비교적 용이하게 계속 update가 가능하며 따라서 보다 정확한 포장수명에 대한 신뢰도 값에 접근해 갈 수 있는 이점이 있다.

핵심용어

포장관리시스템(PMS), 신뢰성 이론, 헤저드 모델, 확률분포, 확률지 개념

1. 서론

현재 우리나라는 국도 및 고속국도에서 운영 중인 포장구간을 대상으로 효율적인 관리를 위해 포장관리시스템(PMS: Pavement Management System)을 도입하여 운영 중에 있으며, PMS는 포장에 관련되는 계획, 설계, 건설, 유지, 보수, 평가, 자원, 편익, 연구 등 많은 복잡한 프로젝트를 종합적이고 체계적으로 이용하여 공용기간 중의 도로를 관리하는

것으로, 최적 포장의 질을 최저의 비용을 통해 유지하는데 그 목적이 있다(권수안, 2002; 한국건설기술연구원, 2009).

초기 포장 건설과 유지보수 활동에 따른 공용성(수명)의 추정은 생애주기비용분석(LCCA)에 큰 영향을 미친다. 이는 도로 시설물에 대한 관리자의 보수 빈도에 영향을 미치고 다시 관리자 비용과 사용자 비용에 영향을 미친다. 즉 LCCA 분석을 위해서는 각 설계 대안에 따른 포장구간의 수명을 결

정하고 그에 따르는 유지보수 시점 및 공법을 결정해야한다. 이러한 포장구간의 효율적인 유지관리를 위한 의사결정 및 LCCA 분석을 위해 가장 기초적인 분석이 바로 정확한 포장 수명(pavement life)과 생존(공용가능할)확률의 예측이다.

이러한 정확한 포장의 수명예측을 위해서는 포장의 수명 데이터를 이용한 적합한 모수적 수명분포의 파악이 선행되어야 하며, 관측된 고장(혹은 수명) 데이터가 어떤 수명분포를 따르는지를 파악하는 것은 모집단의 수명분포를 이용하여 모수적 방법에 의한 신뢰성 척도에 대한 추론이 가능해지기 때문에 매우 중요한 과정이다. 즉, 최적 분포형태를 이용하여 생존확률, 헤저드(고장률 혹은 위험률) 함수, 누적 고장(파손)확률 및 평균 수명 등을 산정할 수 있게 된다.

따라서 본 연구에서는 신뢰성 개념을 이용하여 1999년부터 2008년까지 실제 일반국도를 대상으로 조사한 아스팔트 포장 수명 데이터를 가장 잘 설명하는 분포형태를 선정하고 추정된 모수를 기반으로 생존확률함수와 헤저드 함수를 산정하는 방안을 제시하고 생존확률을 산정하는 것을 목적으로 한다.

2. 기존 연구 고찰 및 방법론

2.1. 기존 연구 고찰

우리나라는 현재 약 14,000km의 국도 연장을 가지고 있으며 1980년대 후반부터 국도 유지 예산의 효율적인 활용과 포장의 적정한 상태 유지를 위해 국도 PMS를 구축하여 운영 중에 있다. 또한 매년 약 3,000km의 일반국도에 대해 조사 대상 구간을 선정하고 노면조사를 통해 포장상태 자료(중단 평탄성, 소성변형, 균열)를 수집하고 교통량 및 보수이력 등을 고려한 동질성구간에 대해 포장상태 등급을 결정하여 유지보수를 위한 기초 자료로 활용하고 있다(한국건설기술연구원, 2009).

이러한 포장의 효율적인 유지보수를 위해서는 필요한 예산의 추정과 유지보수의 시점 및 공법 결정을 위한 의사결정 로직이 필요하며, 이 과정에서 가장 중요한 것이 공용 중인 포장구간의 생존확률 즉 공용 가능한 수명 예측의 신뢰성이다.

과거 및 현재 포장의 상태를 기반으로 장기 공용성(수명)을 얼마나 정확하게 예측하는 가는 필요한 예산의 추정 및 생애주기분석에 필요한 비용과 편익의 산정과도 밀접한 관련을 가지고 있기 때문이다.

국내의 경우, 포장의 공용성과 수명에 대한 연구로는 회귀 모델을 이용한 연구(권수안, 2002; Kim, 2006)와 Markov chain 모델을 이용한 확률론적 공용성 예측에 대한 연구(유평준, 2002, Kobayashi et al., 2010) 등이 있다. 한편, LCCA를 통한 사회간접자본의 경제성 분석에 대한 연구

(Chung, 2006; 도명식, 2007)와 교량의 서비스 수명에 대한 연구 등이 있다(Hong et al., 2006). 그러나 신뢰성 개념 등을 도입한 포장 수명의 적정 확률분포형태의 산정에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

국외의 최근 연구 동향을 살펴보면, Markov Chain을 이용한 공용성 추정 및 추이확률에 대한 연구(Mishalani and Madnat, 2002; Yang, et al., 2005)와 Duration 모델을 이용해 포장악화(파손)의 위험률(hazard) 함수형태를 분석한 연구 등이 있다(Loizos et al., 2005).

특히 Loizos (2005)는 유럽국가를 대상으로 한 분석에서 크랙의 파손이 대수정규(Lognormal) 헤저드 모델로 설명됨을 밝혔으며, Gharaibeh et al.,(2003)는 미국 일리노이주를 대상으로 포장 수명의 고장(파손)확률을 산정하였지만 어떤 분포형태를 따르는지와 모수 추정에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

나아가 기존 대부분의 연구에서는 포장 수명의 확률분포형태의 파악이나 생존확률의 산정에 중점을 두기 보다는 PMS의 운영, 경제성 분석 및 위험률 분포나 파손확률의 분포형태의 적합성 등을 주로 다루었으며(Yang et al., 2005; Loizos et al., 2005), 토목분야에서도 하수관거 분야와 발전설비, 전자부품 등의 분야에서 주로 신뢰성 개념을 도입한 연구가 이루어지고 있으나, 도로 및 포장의 분야에서는 거의 없는 실정이다(서순근, 2002; 주재명, 2008; Park, 2004; Chung et al., 2006).

2.2. 포장의 수명과 신뢰성 개념

신뢰성 이론에서 사용되는 데이터는 대부분 부품이나 시스템의 고장(파손)이 발생할 때까지의 수명의 길이에 대한 것으로 단위는 시간으로 측정된다.

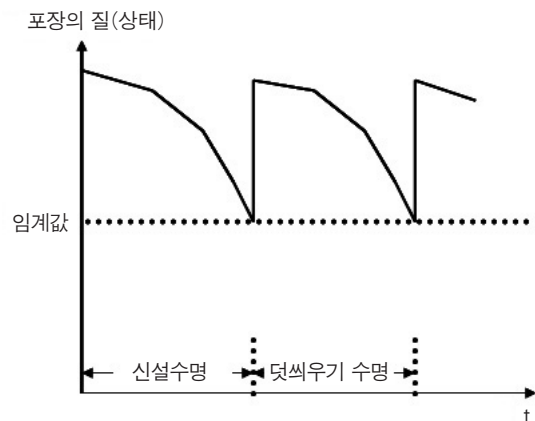


그림 1. 포장의 노화과정과 수명

그림 1에서 보는 바와 같이 포장 구간의 수명은 신설포장이 공용을 시작하여 파괴로 인해 덧씌우기를 하기 전까지의

공용년수를 말하며, 덧씩우기된 포장의 경우 다음 덧씩우기나 재포장을 하기 전까지의 공용년수를 말한다(권수안, 2002).

한편, 포장의 경우도 유지보수를 위한 기준(임계값)에 도달할 때까지의 수명의 길이를 이용하여 생존확률의 추정 즉, 유지보수 시기를 결정할 수 있으며 이러한 예측을 위한 통계적 추론이 필요하게 된다.

한편 통계적 추론의 방법으로는 획득한 데이터의 모집단이 특정 분포를 따른다는 가정 하에서 적용되는 모수적 방법(parametric method)과 모집단의 분포에 대해 연속성이나 대칭성 등을 제외한 가정을 할 수 없는 경우에 적용되는 비모수적 방법(nonparametric method)이 있다(배도선, 1999).

포장구간을 대상으로 한 고장(파손)확률(failure probability)은 대상 구간이 일정한 기간 내에 고장 날(임계값 이하로 떨어져 유지보수를 해야 할) 확률로 정의되며, 생존확률(survival probability)은 고장확률과 반대의 개념으로 살아있을(공용 가능할) 확률로 정의된다.

한편, 생존확률함수 $R(t)$ 는 누적 확률밀도함수 $F(t)$ 의 여함수로 정의되며, 식(1)과 같은 관계가 성립한다. 고장확률함수는 $f(t)$ 의 누적 확률밀도함수로 정의되고 식(3)에서와 같이 미분한 값은 확률밀도함수 $f(t)$ 가 된다(Lancaster, 1990; 배도선, 1999).

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

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

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

그림 2는 시간 t 에 대한 확률밀도함수 $f(t)$ 에서 고장확률함수 $F(t)$ 와 생존확률함수 $R(t)$ 의 관계를 나타내고 있다. 생존확률함수는 신뢰도함수(reliability function)라고도 하며, 대상 포장구간의 수명이 t 년 이상은 될 가능성을 나타내는 척도로 시간이 증가하면 감소하는 특성이 있다.

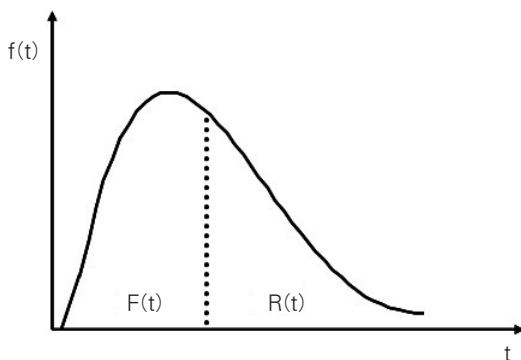


그림 2. 생존확률과 고장(파손)확률 밀도함수

반면 누적확률함수는 불신뢰도(unreliability)함수라고도 하며, 대상 포장구간의 수명이 t 년 이전에 고장(파손 즉, 공용불가상태)날 가능성을 나타내는 척도이다.

한편, 대상 포장구간의 수명특성을 나타내는 지표로 평균수명(mean life) 혹은 평균고장시간(mean time to failure: MTTF)이 있으며 연속확률변수 T 의 확률밀도함수가 $f(t)$ 일 때, 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

한편, 통계적 추론을 위한 방법론 선정의 기준이 되는 척도가 고장(파손)률 함수(failure rate function) 혹은 위험률 함수(hazard function)이다.

즉, 모수적 방법을 이용하기 위해서는 고장률 함수의 산정이 선행되어야 하며, 이는 대상 포장구간 가운데 t 년 까지 고장(파손)없이 공용중인 구간 가운데 t 년에서 고장날 비율을 나타내는 것으로 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_t &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} \\ &= \frac{1}{R(t)} \left(-\frac{d}{dt} R(t) \right) = \frac{f(t)}{R(t)}, 0 \leq t \leq \infty \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 식(5)의 양변을 t 에 대해 적분하면 다음의 관계가 성립한다.

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

따라서 수명 데이터가 어떤 분포를 따르든 식(7)이 성립한다.

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

2.3. 수명분포의 결정과 통계적 추론

신뢰성 이론에서는 대상 아이템의 수명에 대해 여러 가지 분포가 사용되고 있으며, 대표적인 분포로는 지수분포, 와이블분포, 정규분포, 대수정규분포 등이 있다.

여기서는 대표적인 분포인 와이블분포와 지수분포, 대수정규분포에 대해 간단히 언급하기로 한다(Lancaster, 1999; Gourieroux, 2000; 박동호, 2006).

신뢰성 이론에서 가장 널리 이용되는 확률분포가 지수(Exponential)분포이며, 고장률이 시간과는 무관하게 일정

한 분포로 제품의 노후화가 이루어지지 않은 상태에서 우연 요인(chance cause)에 의해 고장이 발생하는 상황을 모형화 하는데 적절한 모형이다(靑木, 2005).

반면 와이블(Weibull)분포는 분포함수의 모수값에 따라 다양한 모양을 나타낼 수 있으며, 복잡하고 이론적인 어려움이 있음에도 불구하고 수명과 관련된 수학적 모델링에 많이 이용된다.

Weibull 분포의 확률밀도함수는 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, 생존확률함수와 고장률함수는 식(9), (10)과 같다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (8)$$

$$R(t) = \int_t^\infty f(t)dt = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (10)$$

여기서, $1/\eta$ 는 척도모수($\eta > 0$)이며, $\beta (> 0)$ 는 형태모수로 $\beta = 1$ 은 우발 고장기를 나타내고 $\beta > 1$ 은 마모 고장기를 나타낸다.

포장을 비롯한 대부분의 사회간접자본은 시간의 경과와 함께 노화(혹은 열화; deterioration)가 진행되고 파손의 대부분이 설계수명의 후반기에 발생하며 시간이 지남에 따라 고장률이 증가하는 현상이 발생하는 특성이 있다. 따라서 Weibull 분포는 이러한 파손 진전율을 표현하기에 적합한 분포함수이다.

한편 식(8)에서 $\beta = 1$ 이면 Weibull 분포는 지수분포가 된다. 즉, 지수분포는 Weibull 분포의 특수한 경우이며, 수명 데이터가 지수분포를 따르는 경우 고장률 $\lambda(t)$ 은 식(10)에서 시간 t 와는 상관없이 $1/\eta$ 로 상수가 된다.

지수분포의 신뢰도 $R(t)$, 불신뢰도 $F(t)$, 확률밀도함수 $f(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \exp\left(-\frac{t}{\eta}\right) \quad (11)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta}\right), t \geq 0 \quad (12)$$

$$f(t) = \frac{1}{\eta} \exp\left(-\frac{t}{\eta}\right), \eta > 0, t \geq 0 \quad (13)$$

한편 대수정규(Lognormal)분포의 경우 고장률 함수가 어느 시점에서 단조성 변동이 생긴다는 것이 발견되어 수명분포의 검정 등에 많이 응용되고 있으며, 대수정규분포를 따르는 수명 데이터에 대수를 취하면 근사적으로 정규분포를 따르게 된다.

대수정규분포의 확률밀도함수는 식(14)와 같으며, μ 는 위

치모수로서 대수평균을 나타내고, σ 는 척도모수로서 대수표준편차를 나타낸다.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}, t > 0 \quad (14)$$

대수정규분포의 누적분포함수와 신뢰도 함수는 식(15), (16)과 같으며, 대수정규분포의 고장률 함수는 초기에는 시간이 지남에 따라 고장률이 증가하다가 일정기간 후에는 감소하는 경향을 가지는 특성이 있으며 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma u} \phi\left(\frac{\ln u - \mu}{\sigma}\right) du = \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) \quad (15)$$

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

여기서 $\Phi(t)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수를 나타낸다.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{\sigma t R(t)} \phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) \quad (17)$$

따라서 관측된 포장의 수명(혹은 파손) 데이터가 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).

3. 분석 대상 지역과 수명 데이터 특성

3.1. 분석 대상 지역

포장의 공용성은 교통량, 기후, 포장강도, 공용기간, 대형차량 비율 등 다양한 인자들의 영향을 받는다. 특히 교통하중특성과 기후, 기초(base)의 두께 등이 포장의 수명에 큰 영향을 미치게 된다(권수안, 2002; 유평준, 2002; Loizos et al., 2005; Yang et al., 2005).

본 연구에서는 포장 수명의 적정 확률분포형태의 선정과 생존확률을 산정하기 위한 사례 분석으로 수원과 의정부 지방국도관리사무소 관할의 국도를 대상으로 하였다. 그 이유는 이 지역이 강수량 및 기온의 차이 등 기후의 영향이 비슷한 지역이면서 동시에 예산편성 및 중차량의 방향별 특성 그리고 도로 관리자와 시공사의 기술적 차이를 가능한 한 배제할 수 있는 지역이라 판단되었기 때문이다.

먼저 1999년부터 2008년의 10년간 대상지역의 유지보수(신설 포함) 이력 자료를 이용하여 포장의 수명을 포장 유지보수 방법을 기준으로 신설과 덧씌우기로 구분하였다. 여기

서 포장의 수명을 신설과 덧씌우기로 구분한 것은 기존 연구에서 유지보수 방법간에 유의한 차이가 있음을 밝히고 있기 때문이다(유평준, 2002; 권수안, 2002),

3.2. 포장 수명 데이터의 특성

대상 구간 포장 수명의 적정 확률분포형태 선정과 생존확률 산정을 위해서, 먼저 대상 지역에서 조사된 최근 10년간 유지 보수된 구간 수를 살펴보면 그림 3에서 보는 바와 같이 매년 변동이 있으며, 덧씌우기된 구간에 비해 신설포장 구간의 건수가 상대적으로 많음을 알 수 있다.

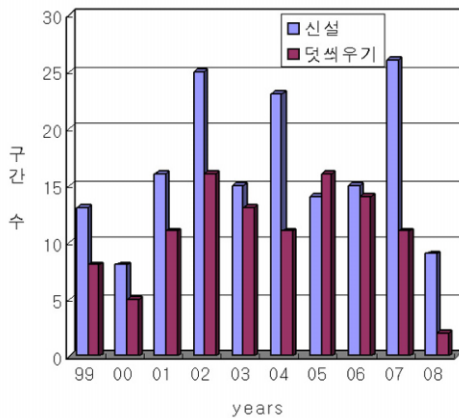


그림 3. 포장 유지보수 데이터(1999~2008)

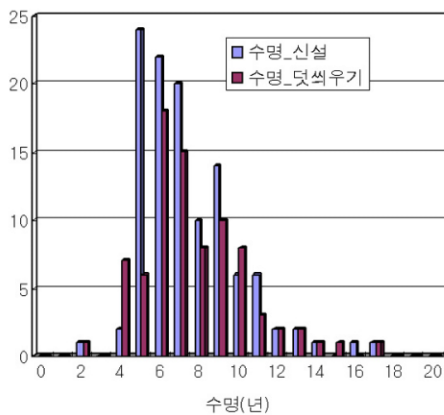


그림 4. 신설과 덧씌우기 구간의 수명 빈도

한편 10년간의 유지보수 이력 데이터 가운데 교통량 관련 자료 등의 누락으로 활용할 수 없는 구간을 제외한 신설 구간 112개 샘플, 덧씌우기 구간 83개 샘플의 수명 데이터를 기반으로 살펴본 결과, 신설포장의 경우 그림 4에서와 같이 초기 4년간에는 거의 유지보수(덧씌우기)가 이루어지지 않다가 5~7년에 집중적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 수명 분포가 왼쪽으로 기운(skewed) 형태를 보이고 있으며 그 이후에 점차 감소하고 있다.

반면 덧씌우기로 유지보수가 이루어진 구간의 수명특성은 덧씌우기 시행 후 4년부터 유지보수가 이루어지며, 6~7년의

수명이 가장 많은 동시에 넓게 분포되어 있음을 알 수 있다.

한편, 주어진 시간 t 에서의 고장(파손)발생 빈도를 나타내는 고장밀도함수 $f(t)$ 를 살펴보면, 그림 5에서와 같이 신설구간의 경우 5년에서 7년 사이에 포장의 파손으로 인한 유지보수가 이루어질 가능성이 각각 20%정도로 전체의 약 60%가 집중되어 있는 것을 알 수 있으며, 그 이후 점차 감소하여 장기 수명 특성을 가지는 구간이 있음을 보이고 있다.

반면 덧씌우기 구간의 경우에는 신설포장과는 달리 $f(t)$ 의 분포가 6년에 정점에 이르렀다가 점차 감소하는 모양을 보이고 있다. 여기서 고장(파손)밀도함수는 면적의 합이 1이 되므로 수명의 상대빈도의 개념으로 해석할 수 있다.

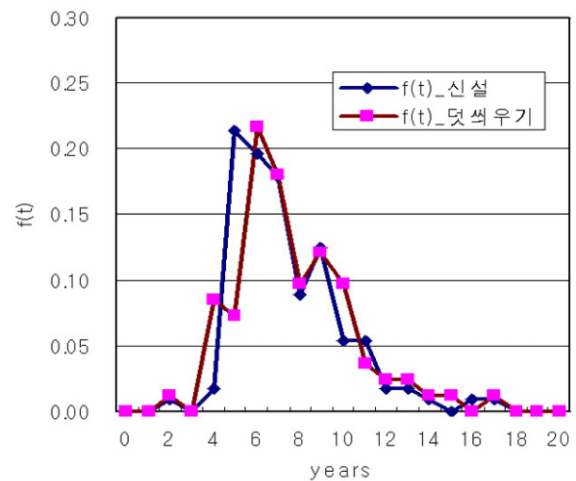


그림 5. 고장(파손)밀도 함수

이어서 수명 데이터의 통계적 추론을 위한 판단 근거가 되는 고장률함수를 살펴보기로 한다. 여기서 고장률함수는 t 년까지 유지보수 없이 공용중인 구간 중에서 t 년에 덧씌우기할 비율을 나타내는 지표이다.

한편 식(13)에서 알 수 있는 바와 같이 지수분포의 경우 확률밀도함수는 시간 t 가 경과하면서 점차 감소하는 특성이 있으므로 본 연구 대상지역의 신설 및 덧씌우기 구간은 지수분포를 따르지 않음을 알 수 있다(그림 5 참조).

또한 식(10)에서 설명한 바와 같이 고장률이 시간 t 와 상관없이 일정한 상수의 값을 가지면 포장 수명 데이터를 지수분포를 이용해 추정할 수 있으나 고장률이 일정한 패턴을 가지고 증가 혹은 감소하면 다른 분포를 이용하여 모수를 추정해야 한다(박동호, 2006; Lancaster, 1990; Gourieroux, 2000).

4. 수명 분포의 선정과 모수 추정

4.1. 확률지 개념을 이용한 모수 추정

본 연구에서는 포장의 수명 데이터를 이용하여 적합한 모

수적 수명 분포를 파악하고 구한 모수를 이용하여 포장의 생존확률함수를 추정하는 것을 목적으로 하고 있다.

따라서 첫 번째 단계로 적합한 수명 분포를 찾기 위해 신뢰성 분야에서 많이 활용되는 확률지(probability paper)를 이용한 모수 추정방법을 이용하였다(배도선, 1999).

먼저, Weibull 분포의 적합성을 검정하기 위해서는 포장의 고장 및 파손(수명) 시간(년) t_i 를 작은 것부터 크기 순으로 나열한 뒤, 포장의 수명 데이터를 x축에 $\ln t$ 를 두고 y축에 $\ln \ln 1/(1-F(t))$ 로 로그 변환된 확률공간상에 사상시켜 선형성을 점검하게 된다. 즉, 식 (9)의 Weibull 분포의 신뢰도함수는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] = \exp\left(-\frac{t^\beta}{t_0}\right) \quad (18)$$

여기서, $t_0 = \eta^\beta$ 로 정의하며, 식 (18)의 양변에 자연로그를 두 번 취하면 식 (19)가 얻어진다.

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = \beta \ln t - \ln t_0 \quad (19)$$

식(19)는 $\ln t$ 와 $\ln \ln 1/(1-F(t))$ 사이에 직선관계가 있음을 나타내며, 이 관계를 이용하여 와이블 확률지가 고안되었다. 즉, 관측된 수명 데이터를 와이블확률지에 플로팅했을 때 직선형태가 나타나면 식(19)에 의해 이 포장의 수명 데이터는 Weibull 분포를 따른다고 판정할 수 있으며 이 분포의 특성을 이용해 모수들을 추정하게 된다.

그림 6은 와이블 확률지를 이용해 덧씩우기 구간의 수명 데이터를 로그변환해서 확률공간상에 사상시킨 것으로 $\ln t$ 와 $\ln \ln 1/(1-F(t))$ 사이에 직선관계가 성립함을 알 수 있다.

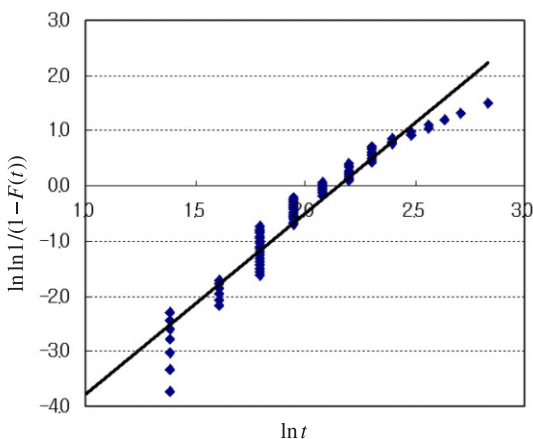


그림 6. Weibull 확률지를 이용한 모수 추정(덧씩우기 구간)

한편 대수정규분포의 적합성의 검정도 대수정규확률지를 이용하면 가능하며, 확률변수 T 가 $LN(\mu, \sigma^2)$ 을 따르면

$\ln T$ 의 분포는 $N(\mu, \sigma^2)$ 을 따르게 되므로, $\ln T$ 를 표준화하면 식(20)이 성립한다. 여기서 μ 와 σ^2 은 $LN(\mu, \sigma^2)$ 의 위치모수와 척도모수이다.

$$Z = \frac{\ln T - \mu}{\sigma} \sim N(0, 1) \quad (20)$$

식(15)를 이용하면

$$\ln t = \sigma \Phi^{-1}(F(t)) + \mu \quad (21)$$

의 관계를 구할 수 있으며, 식 (21)은 $\ln t$ 와 $\Phi^{-1}(F(t))$ 가 표준편차 σ 를 기울기로 가지는 일차식의 관계가 성립함을 알 수 있다. 여기서 $\Phi(t)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수를 나타낸다. 따라서 포장의 수명 데이터가 대수정규분포를 따르면 로그를 취한 값은 정규분포를 따르므로 정규확률지로 μ 와 σ 를 추정하게 된다.

그림 7에는 정규대수 확률지를 이용해 신설 구간의 수명 데이터를 확률공간상에 사상시킨 것으로 $\ln t$ 와 $\Phi^{-1}(F(t))$ 가 직선의 관계가 성립함을 알 수 있다.

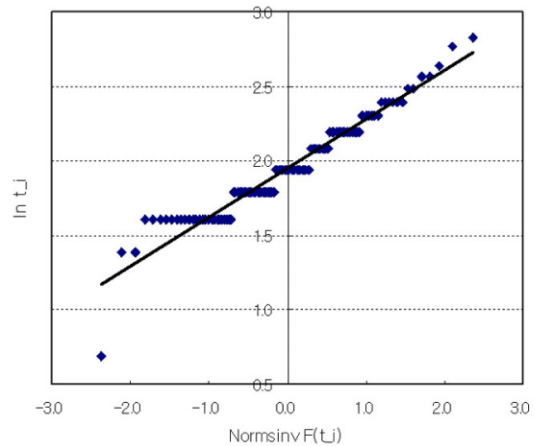


그림 7. Lognormal 확률지를 이용한 모수 추정(신설 구간)

표 1에는 가장 빈번하게 활용되는 4가지 분포(지수, 와이블, 대수정규, 2-모수 지수)를 대상으로 추정된 모수와 지표들을 정리한 것이다. 본 연구에서는 해당 데이터가 특정 분포를 얼마나 잘 따르는지를 측정하기 위해 AD(Anderson-Darling) 통계량이 사용되었으며 이 통계량이 가장 작은 분포가 데이터에 가장 적합하다고 판단할 수 있다(배도선, 1999).

또한 헤저드 함수가 시간 t 와 상관없이 일정한 상수인 지수형(지수, 2-모수 지수)분포를 제외한 다른 분포형태는 식 (19)와 (21)의 선형관계에서 구한 상관계수가 상대적으로 큰 분포형태가 더 적합한 것으로 판단할 수 있다.

따라서 표 1에서 분석 대상 지역의 신설 및 덧씩우기 포장의 수명 데이터는 대수정규(Lognormal)분포가 가장 적합한

분포형태이며, Weibull 분포도 양호한 결과를 얻었음을 알 수 있다.

표 1. 추정 결과

		Exponential	Weibull	Log-Normal	2-모수 Exponential
신설 (n=112)	위치모수	-	-	1.951	-
	형상모수	-	4.095	-	-
	척도모수	7.420	8.085	0.321	5.468
	분계점	-	-	-	1.951
	상관계수	N.A.	0.935	0.970	N.A.
	위험률함수	0.195	-	-	0.245
	AD value	25.084	5.925	1.963	31.190
덧씌우기 (n=83)	위치모수	-	-	1.976	-
	형상모수	-	3.590	-	-
	척도모수	7.663	8.445	0.355	5.732
	분계점	-	-	-	1.931
	상관계수	N.A.	0.969	0.980	N.A.
	위험률함수	0.186	-	-	0.230
	AD value	17.376	2.278	1.043	21.270

4.2. 생존확률 및 헤저드 함수 산정

4.1절에서 사례 지역의 포장 수명 데이터의 특성을 잘 표현하는 분포형태가 대수정규분포와 Weibull 분포임이 확인되었다.

그림 8과 9는 표 1에서 추정된 모수를 이용해 신설 및 덧씌우기 구간을 대상으로 4가지 분포형태와 실제 관측값의 생존확률을 비교하기 위해 나타낸 것으로, 신설 및 덧씌우기 구간 모두 실제 관측한 수명의 생존확률분포가 대수정규분포 및 Weibull 분포와 매우 유사함을 알 수 있다.

여기서 좀 더 구체적으로 두 분포형태를 대상으로 실제 관측값과 비교해 보면, 생존확률이 90% 이하로 떨어지는 시점은 신설 구간의 경우 실제 관측 데이터와 Lognormal 분포는 6년과 7년 사이인데 반해 Weibull 분포는 5년과 6년 사이로 추정되었다.

반면, 생존확률이 50% 이하로 떨어지는 시점은 관측값과 Lognormal, Weibull 모두 8년과 9년 사이로 추정하였다.

덧씌우기 구간의 경우에는 생존확률이 90% 이하로 떨어지는 시점을 관측값과 두 분포모델 모두 5년과 6년 사이로 추정했으며, 50% 이하로 떨어지는 시점도 모두 7년과 8년 사이로 추정하였다.

즉, 사례 지역 신설 구간의 경우 포장의 수명이 8년 이상은 될 확률이 50%이며, 덧씌우기 구간의 경우 수명이 7년 이상은 될 확률이 50%라고 해석할 수 있다.

한편 그림 10과 11에는 추정된 모수를 이용해 각 분포형태의 헤저드(위험률) 함수를 플로팅한 것이다.

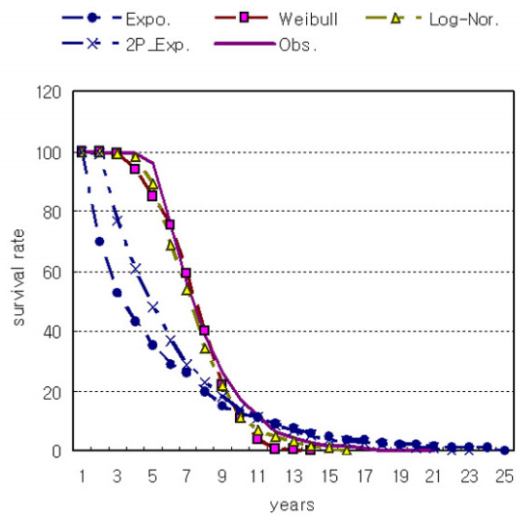


그림 8. 신설 구간의 생존확률

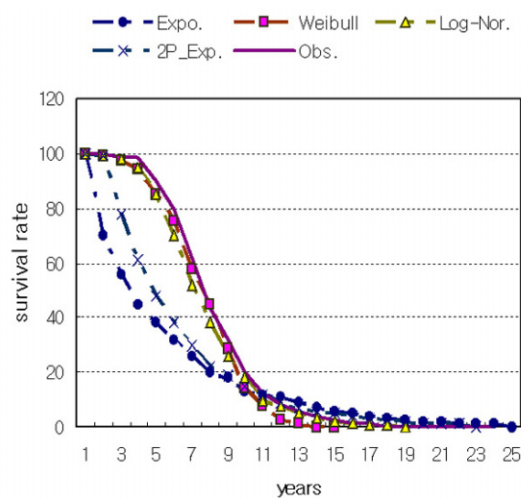


그림 9. 덧씌우기 구간의 생존확률

그림 10의 신설 구간의 헤저드 함수를 살펴보면, 지수분포와 2-모수 지수분포는 상수의 값을 가지며, 와이블 분포의 경우 형상모수가 4.095로 1보다 큰 값을 가져 시간의 증가와 함께 증가하는 형태를 나타내고 있다.

반면 대수정규분포의 경우에는 척도모수가 0.31로 초기에는 증가하다가 일정한 시간이 지나면 거의 일정한 형태를 보이고 있으며 4개의 분포형태 가운데에서 관측된 고장(파손)률을 가장 잘 설명하는 것으로 판단된다.

한편 그림 11의 덧씌우기 구간의 경우에서도 마찬가지로 형상모수가 3.59로 시간이 경과함과 동시에 급격히 고장률이 증가하는 와이블 분포보다는 대수정규분포가 상대적으로 잘 설명하는 것으로 판단된다.

다만, 본 연구에서 수집한 신설 112개 구간과 덧씌우기 83개 구간의 수명 데이터의 고장률 자료가 연속성을 가지지 못한 결점이 있어 향후 지속적인 데이터의 update 및 보완이 필요할 것이다. 나아가 본 연구에서 대상으로 한 국도의 수명

데이터의 경우 신설과 덧씌우기로 구분을 하였을 뿐 하중특성을 고려한 분석, 예를 들어 ESAL의 대소에 따른 영향을 다루지 않았다. 향후 이에 대한 연구가 추가로 이루어져야 할 것이다.

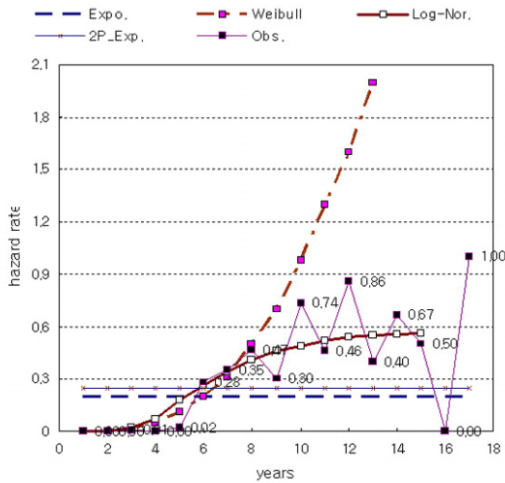


그림 10. 신설 구간의 hazard rate

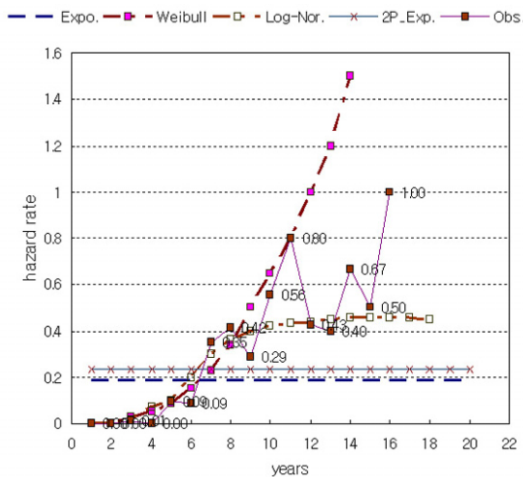


그림 11. 덧씌우기 구간의 hazard rate

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 신뢰성 개념을 도입하여 최근 10년간의 수원과 의정부 지역의 국도 구간(신설 112 구간, 덧씌우기 83 구간)의 수명 데이터를 기반으로 적합한 모수적 수명 분포를 찾고 확률지 개념으로 구해진 모수를 이용하여 신설구간과 덧씌우기 구간의 생존확률과 헤저드 함수를 산정하는 방안을 제안하였다.

포장의 수명 데이터를 가장 잘 설명하는 모수적 수명 분포 형태를 찾기 위해 많이 활용되는 지수분포, 와이블 분포, 대수정규분포와 2-모수 지수분포를 대상으로 분석한 결과 대수정규분포가 해당 수명 데이터의 특성을 가장 잘 설명하는 것

으로 나타났다.

생존확률을 분석한 결과, 신설 구간의 경우 포장의 수명이 8년 이상은 될 확률이 50%이며, 덧씌우기 구간의 경우 수명이 7년 이상은 될 확률이 50%로 추정되었다.

마지막으로 향후 신설 및 덧씌우기 구간 내에서의 중량특성 등을 고려한 평균 수명 및 신뢰도에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 방법은 포장관리 및 유지보수 데이터가 축적되어감에 따라 비교적 용이하게 계속 update가 가능하며 따라서 보다 정확한 고장(파손)확률에 대한 신뢰도 값에 접근해 갈 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

권수안, 정경영, 서영찬(2002). “국도 아스팔트포장의 특수포장 적용을 위한 교통량 기준제안 연구,” *한국도로포장공학회는문집* 제4권 3호, 25~33.

도명식, 한대석, 이종달, 이영욱(2007). “HDM을 활용한 국도 포장 유지보수 공법에 대한 경제성 평가,” *대한토목학회논문집*, 제27권 3D, 311~323.

박동호, 임재학, 남경현(2006). *공학도를 위한 수명분포개념과 응용*, 영지문화사

배도선, 전영록(1999). *신뢰성 분석*, 아르케

서순근, 하천수(2002). “열화자료와 설명변수 정보를 고려한 사용 현장 신뢰성 자료의 분석,” *신뢰성응용연구*, 제2권제2호 63~84.

유평준, 이동현(2002). “확률적 포장 공용성 예측모델 개발 방법론,” *한국도로포장공학회는문집* 제4권제4호, 1~12.

주재명, 김동민, 변용태, 김진우, 김형철(2008). “확률론적 FMECA를 이용한 발전설비의 신뢰도 기반 유지보수계획 수립,” *조명전기설비학회논문집*, 제22권제1호, 58~65.

한국건설기술연구원(2009). *2008 도로포장관리시스템 최종보고서*.

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, 4, 243~253.

Gharai beh, N.G., and Darter, M.I. (2003) “Probabilistic analysis of highway pavement life for Illinois”, *Transportation Research Record* 1823, No.03-4294, 111~120,

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

Hong, T., Chung, S. Han, S. and Lee, S. (2006) “Service life estimation of concrete bridge decks,” *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol.10, 4, 233~241.

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, 91~96.

Kobayashi, K., Do, M. and Han, D. (2010) “Estimation of Markovian

- transition probabilities for pavement deterioration forecasting”, *KSCE J. of Civil Engineering* (forthcoming).
- Lancaster, T. (1990) *The econometric analysis of transition data*, Cambridge Univ. Press.
- 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, 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), 139~148.
- Park, S. (2004). “Identifying the hazard characteristics of pipes in water distribution systems by using the proportional hazard model: 2. Applications.” *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol.8, No.6, 669~677.
- 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, 861~872.
- 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ードモデル”, *土木學會論文集*, No.798, VI-68, 125~136.

접 수 일 : 2009. 11. 12
 심 사 일 : 2009. 11. 12
 심사완료일 : 2010. 2. 1