

# 효율적인 고속도로 교량의 유지관리를 위한 교량 부재별 수명분포 및 평균수명 산정 방안 연구

이용준<sup>1</sup> · 이민재\*

<sup>1</sup>충남대학교 토목공학과

## A Study on Estimating of Probability Distribution and Mean Life of Bridge Member for Effective Maintenance of the Bridge

Lee, Yongjun<sup>1</sup>, Lee, Minjae\*

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Chungnam National University

**Abstract :** This study found a proper parametric life distribution based on maintenance history data of each bridge member under the jurisdiction of the Korea Expressway Corporation for the past 10 years by introducing the concept of reliability and suggested a measure to calculate the mean life and reliability of each bridge member using the parameter obtained with the maximum-likelihood classification. As a result of analyzing the exponential distribution, weibull distribution and log normal distribution being utilized frequently in order to find the parametric life distribution type which well described the life data of each bridge member, it was found that the log normal distribution and weibull distribution described the characteristics of the relevant life data the best. As a result of calculating the mean life of each bridge member based on the estimated parameter, the average life of the steel bridge coating was 18.51 years which was the longest, followed by the bridge deck as 17.56 years. The mean life of the drainage facility and the bridge bearing were 12.27 years and 12.57 years respectively, showing the shortest life.

**Keywords :** Bridge Member, Survival Analysis, Bridge Management System, Mean Life, Probability Distribution

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

1995년 성수대교의 붕괴 이후 노후교량의 대규모 개축과 2000년을 전후하여 도로망이 확충되어 국내 도로 교량의 평균수명은 높지 않은 편이다. 그러나 교량의 건설현황에서 알 수 있듯이 공용수명이 20~30년 이상되는 노후교량의 수가 조만간 급격히 증가할 것이다. 따라서 합리적인 유지관리 의사결정을 위해서 지금부터 자산관리적 관점에서 장기적인 관리전략의 수립이 가능한 유지관리 체계의 구축을 준비하여야 할 것으로 판단된다.

이에 따라 우리나라는 교량을 효율적으로 관리하기 위하여 교량관리시스템을 운영해왔다. 교량관리시스템(Bridge

Management System; BMS)은 계획, 설계에서부터 건설, 유지보수 및 평가에 이르기까지 모든 과정을 체계적으로 관리하는 시스템으로 최적 교량의 질을 최저의 비용을 통해 유지하는데 그 목적이 있다.

현재 우리나라를 포함한 선진국을 중심으로 교량의 공용성과 경제성, 생애주기비용, 유지보수시점 및 공법, 교량설계 등 다양한 영역에서 연구가 진행 중이며, 사회기반시설의 유지보수에 대한 개념은 생애주기 비용에 근거하고 있기 때문에 초기건설비용부터 유지비용 및 폐기비용까지 다양한 요소들에 대한 신뢰성 있는 분석이 필요하다(권수안, 2002; 한국건설기술연구원, 2009; 도명식, 2010). 즉, 관리자 비용과 사용자 비용을 함께 고려하는 생애주기비용분석(LCCA)을 위해서는 각 설계 대안에 따른 교량의 수명을 결정하고 그에 따르는 유지보수 시점 및 공법을 결정해야한다. 이러한 교량의 효율적인 유지관리를 위한 의사결정 로직 및 LCCA 분석을 위해 가장 기초적인 분석이 바로 정확한 공용수명의 예측이다.

기존 사회기반시설물의 사용수명(공용성)을 예측하기 위한 방법으로는 회귀모델에 의한 결정론적 모델과 확률론적(혹은

\* Corresponding author: Lee, Minjae, Professor, Department of Civil Engineering Chungnam National University, Daejeon, South Korea 305-764

E-mail: lmjcm@cnu.ac.kr

Received March 25, 2016; revised May 3, 2016

accepted May 13, 2016

통계학적) 모델이 있다. 그러나 다양한 요인으로 인해 노화가 진행되는 구간의 경우 결정론적 모델로 설명하기에는 어려움이 많으며(Hong et al., 2006), Markov 체인 등을 이용한 확률론적 모델에도 기본 가정에 대한 꾸준한 의문 제기가 이루어지고 있는 실정이다(Kim, 2006; Loizos and Karlaftis, 2005).

따라서 본 연구는 교량유지관리시스템 기초연구로서, 최근 10년간의 고속도로 교량을 대상으로 조사한 교량의 유지보수 이력데이터를 이용하여 교량부재별 평균 수명 및 고장확률의 산정을 통해 관리자가 보다 효율적으로 유지관리 의사결정을 할 수 있는 지표를 제시하였다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 신뢰성 개념을 이용하여 최근 10년간 실제 고속도로 교량을 대상으로 8개 부재별로 구분하였다. 최적 수명 분포를 추정하기 위해 최대우도법을 이용하였으며, 가장 잘 설명하는 분포형태를 선정하고 추정된 분포를 통하여 교량부재별 공용수명과 기타 지표값을 산정하였다.

또한, 산정된 결과값을 통해 관리자가 좀 더 교량을 효율적으로 관리할 수 있는 기초 지표로 활용할 수 있도록 하였다.

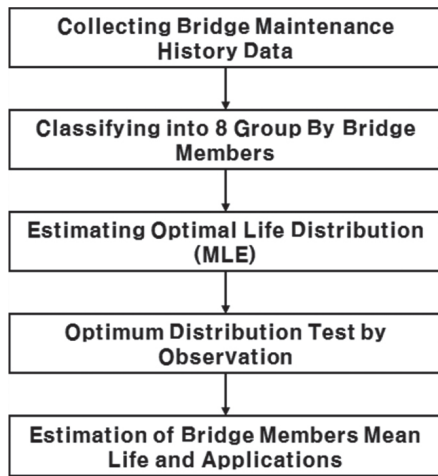


Fig. 1. Research Methodology

## 2. 기존 연구 고찰 및 방법론

### 2.1 기존연구 고찰

구조물 성능에 대한 이론적, 실험적 연구의 증대, 정보통신기술을 이용한 계측 및 모니터링 기법의 발전, 보수보강 기술의 개발 등 생애주기관리를 위한 관련 요소기술들은 계속해서 변화, 발전해 왔지만 이러한 요소기술의 통합을 이루어 생애주기관리체계를 구축하기 위한 노력은 최근에 와서야 적극적으로 검토되고 있는 실정이다. 국내의 경우, 생애주기를 고려한 교량관리시스템을 통하여 생애주기동안 발생하는 유지관리 조치와 비용을 고려하여 변화되는 교량 성능

을 추정함으로써 관리주체가 요구하는 다양한 제약조건을 만족하는 맞춤형 전략을 제공할 수 있도록 개발되고 있다(박경훈, 2014). 선진 각국에서는 교량 통행하중의 증가 및 통행차량의 증대, 지속적인 교량의 공용수명 증가 및 열화, 보수 및 교체 예산의 한계, 불충분한 예산에 맞춘 교량 보존 및 유지 프로그램, 세입 감소, 구매력 저감, 가용한 예산에 대한 경쟁 심화 등이 교량 자산관리 도입의 주요 요인으로 고려되고 있다. 미국 도로관련 기관에서는 수년간 자산관리와 관련된 기준 제정 및 정비, 연구 활동, 시스템개발을 도로관련 위원회와의 협동 연구 등을 통해 각 주정부 교통국이 효율적으로 자산관리체계를 적용할 수 있도록 도움을 주고 있다. 육상 도로 교통의 전체적인 자산관리체계 수립과 관련된 내용에 초점이 맞추어져 있으며, 교량을 비롯하여 전체 기반시설물, 즉 터널, 포장 등의 국가기반시설을 전체적인 자산으로 간주하여 이를 유지관리하는 방안을 연구 개발 중이다(TRB, 2009). 뉴욕DOT(2014), 미네소타DOT(2014), 루이지애나DOT(2015)는 교량의 효율적인 유지관리를 위해 Transportation Asset Management Plan (TAMP)이라는 보고서를 작성하고 있다. 이 보고서는 교량의 공용성 모델 개발, 리스크 기반 자산관리, 생애주기비용분석을 통한 교량 유지관리 방법론을 제시하고 있다. 미국에서 개발하거나 활용하고 있는 교량의 자산관리와 관련된 프로그램으로는 AssetManager NT와 PT, BLCCA, MOOS Bridge Level Model과 Network Level Model, PONTIS 등이 있다. 결국 효율적 교량 유지관리를 위한 의사결정지원시스템의 개발로 인한 편익은 궁극적으로는 한정된 예산을 활용하여 투자효율성을 극대화하는 것이라 할 수 있으며, 최적화된 교량의 관리 활동을 통해 자산의 수명 연장과 함께 자산의 서비스 유지를 위한 생애주기비용이 축소될 수 있으므로 이는 교량 자산관리가 한정된 자원 내에서 최고의 가치를 제공하는 최상의 유지관리 활동이자 자산관리 전략임을 의미한다.

### 2.2 교량 부재별 수명과 신뢰성 개념

신뢰성 이론에 근거한 분석 자료는 대부분 부품이나 시스템의 고장(파손)이 발생할 때까지의 수명의 길이에 대한 것으로 단위는 시간으로 측정된다. 교량의 수명은 교량이 공용을 시작하여 파손으로 인해 보수·보강 등 유지보수 작업을 하기 전까지의 공용년수를 말하며, 유지보수가 이루어진 교량의 경우 다음 보수·보강을 하기 전까지의 공용년수를 말한다(권수안, 2002).

따라서 본 연구에서도 공용 개시 시점에서 교량부재별로 노화에 따라 유지보수 기준(임계값)에 도달한 구간 가운데 유지보수가 이루어진 시점까지를 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 고장확률과 반대의 개념으로 살아있을(공용 가능할) 확률로 정의된다(도명식, 2010).

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

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

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

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

생존확률함수는 대상구간의 수명이  $t$ 년 이상은 지속될 가능성을 나타내는 척도이며, 누적확률함수는 대상구간의 수명이  $t$ 년 이전에 고장(파손 즉, 공용불가능 상태)날 가능성을 나타내는 척도이다(도명식, 2010).

한편, 대상 교량의 수명특성을 나타내는 지표로 평균수명(mean life)은 연속확률변수  $T$ 의 확률밀도함수가  $f(t)$ 일 때, 식(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 교량 부재별로  $t$ 년 까지 고장(파손)없이 공용중인 교량 부재별 가운데  $t$ 년에서 고장 날 비율을 나타내는 것으로 식(5)와 같이 나타낼 수 있고, 식(5)의 양변을  $t$ 에 대해 적분하면 식(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 식(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, 관측된 교량 부재의 수명(혹은 파손) 자료가 어떤 수명분포를 따르는지를 파악하는 것은 모집단의 수명분포를 이용하여 모수적 방법

로 신뢰성 척도에 대한 추론이 가능해져 정확한 통계적 분석을 할 수 있기 때문에 매우 중요하다(Gourieroux, 2000; 도명식, 2010).

### 3. 분석 대상 지역과 수명 데이터 특성

#### 3.1 대상구간의 수명 특성

본 연구에서는 교량 부재별의 파손확률과 평균 수명을 산정하기 위한 사례 분석으로 한국도로공사가 관리하고 있는 고속도로 교량을 대상으로 하였다. 먼저 2004년부터 2013년의 10년간의 고속도로 교량의 유지보수 이력자료를 이용하여 교량받침, 신축이음, 교면포장, 바닥판, 강교도장, 기초, 하부구조, 배수시설 총 8개 부재로 구분하였다.

최근 10년간의 유지보수 이력 데이터 가운데 유지보수 관련 이력 등의 누락으로 활용할 수 없는 구간을 제외한 교량 받침 24,922개, 신축이음 9092개, 교면포장 6,870개, 바닥판 2,844개, 강교도장 237개, 기초 220개, 하부구조 6,082개, 배수시설 3,251개 유지보수 이력데이터를 기반으로 살펴본 결과, Fig. 2에서와 같이 약 50년을 기준으로 초기 6년간에는 거의 유지보수가 이루어지지 않다가 7~16년에 집중적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 수명 분포가 왼쪽으로 기운(skewed) 형태를 보이고 있으며 그 이후에 점차 감소하고 있다.

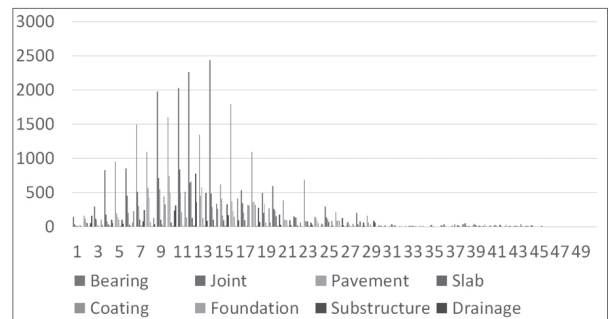


Fig. 2. Maintenance data of bridge members

한편, 주어진 시간  $t$ 에서의 고장발생 빈도를 나타내는 고장밀도함수  $f(t)$ 를 살펴보면, Fig. 3에서와 같이 10~14년 사이에 교량의 파손으로 인한 유지보수가 이루어질 가능성이 커짐에 따라 Fig. 4와 같이  $R(t)$ 는 급격히 감소함을 알 수 있다. 여기서 고장밀도함수는 전체 면적의 합이 1이 되므로 수명의 상대빈도의 개념으로 해석할 수 있다(도명식, 2010).

한편 고장률함수(hazard rate 혹은 failure rate)는 나이가  $t$ 인 부품이나 시스템이 가지는 고장 발생의 위험정도를 정량적으로 나타내는 함수로서 교량의 경우  $t$ 년까지 유지보수 없이 공용중인 구간 중에서  $t$ 년에 유지보수를 시행할 비율이라 해석할 수 있다(도명식, 2010).



즉, 고장률함수는 현재의 수명이 그 다음 짧은 기간 동안에 나타날 단위 고장 발생률을 의미하며 양의 실수 값을 가지는 것으로 식 (6)에서 알 수 있는 바와 같이 확률밀도함수의 신뢰도 함수에 대한 비율이며 그 자체는 확률이 아니라는 점에 유의해야 한다(Lancaster, 1990; 도명식, 2010)

또한 고장률이 시간 t와 상관없이 일정한 상수의 값을 가지면 교량부재 수명 데이터를 지수분포를 이용해 추정할 수 있으나 고장률이 일정한 패턴을 가지고 증가 혹은 감소하면 다른 분포를 이용하여 모수를 추정해야 한다(박동호, 2006; Lancaster, 1990; Gouriéroux, 2000; 도명식, 2010).

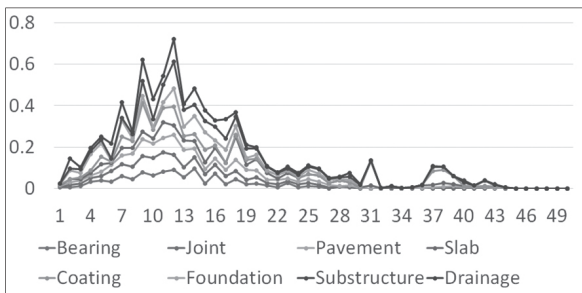


Fig. 3. Failure density function of bridge members

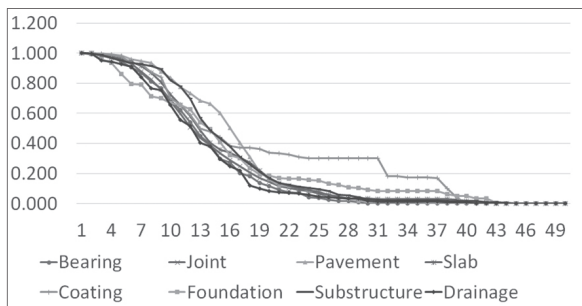


Fig. 4. Reliability of bridge members

### 3.2 최대우도추정법을 이용한 모수 추정

본 연구는 교량 부재별의 유지보수 이력자료를 이용하여 적합한 모수적 수명 분포를 파악하고 여기서 구한 모수를 이용하여 교량 부재별의 평균수명을 추정하는 것이다.

관측된 수명자료가 어떤 수명분포를 따르는가는 신뢰성 분석에서 매우 중요한 과정으로 이러한 모집단의 수명분포가 찾아지면 모수적 방법에 의한 신뢰성 척도를 추론할 수 있다(도명식, 2010).

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 최대우도법을 이용하였다(배도선, 1999).

최대우도법은 확률밀도함수  $f(t)$ 를 가지는 어떤 모집단으로부터  $n$ 개의 표본을 추출하였을 때 이 표본을 이용하여  $f(t)$ 를

결정하는 모수의 추정 방법 가운데 하나로 통계적으로 여러 바람직한 성질들을 만족하므로 많이 사용되고 있다(배도선, 1999; 도명식, 2010).

확률밀도함수  $f(t)$ 를 가지는 모집단으로부터 서로 독립적인 관측값  $t_1, t_2, \dots, t_n$ 을 얻었을 때,  $f(t)$ 의 모수를  $\theta$ 라 하면  $\theta$ 의 우도함수(Likelihood Function)는 식(8)과 같이 정의된다(배도선, 1999).

$$L(\theta) = f(t_1, \theta)f(t_2, \theta) \cdots f(t_n, \theta) \quad (8)$$

즉,  $\theta$ 의 우도함수  $L$ 은  $t_1, t_2, \dots, t_n$ 이 주어졌을 때  $\theta$ 의 함수로 표현되며 이 함수를 최대로 하는  $\theta$ 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 식(9)와 같이 나타낼 수 있다(배도선, 1999).

$$\text{Max}_{\theta} \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i, \theta) \quad (9)$$

한편, 최우추정량을 구하기 위해 Newton-Raphson법을 사용하였으며, 근사해를 구하기 위한 수렴 판정 기준은 0.0001로 하였다.

최대우도법을 이용하여 최적 수명분포의 선정을 위해 비교한 4가지 분포(지수, 와이블, 대수정규, 정규분포)별 모수와 척도들의 결과를 요약하면 Table 1과 같다.

Table 1. Estimates of optimal life distribution (Anderson-Darling)

	Weibull	Log-Normal	Exponential	Normal
Bearing	91.39	284.43	3495.88	187.99
Joint	94.28	57.35	1124.22	193.35
Pavement	92.82	42.21	898.97	166.55
Slab	11.58	40.46	306.73	33.77
Steel Coating	9.79	6.14	18.09	16.35
Foundation	2.749	3.505	12.915	8.191
Substructure	109.94	125.49	929.34	139.61
Drainage	34.39	67.64	394.26	52.66

교량 부재별에 따른 최적수명 분포를 추정한 결과, 교량받침, 바닥판, 기초, 하부구조, 배수시설은 와이블 분포가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 신축이음, 교면포장, 바닥판, 강교도장의 경우 대수정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 이는 교량부재에 따라 파손특성이 달라 수명 분포가 다른 것으로 나타난 결과이며, 유지보수 시점이 다르다고 볼 수 있다. 교량부재별 수명이력자료가 특정 분포를 얼마나 잘 따르는가를 측정하기 위한 적합도 검정에는 AD (Anderson-Darling) 통계값을 사용하였으며, AD통계량은 식(10)과 같다.

$$Q_n = n \int_{-\infty}^{+\infty} [F_n(x) - F(x)]^2 \psi(x) dF(x) \quad (10)$$

여기서,  $\psi(x)$ 는 가중치 함수로,  $\psi(x)=[F(x)(1-F(x))]^{-1}$ 인 경우 AD 통계량이라고 하며 일반적으로 식(11)과 같이 표시한다(배도선, 1999).

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)(1-F(x))} dF(x) \quad (11)$$

최적 수명 분포의 선정을 위해서는 AD 통계량이 작으면 작을수록 특정 분포를 따르게 되는 적합성이 크다고 판단할 수 있다(배도선, 1999).

Table 2는 추정된 최적 수명 분포를 이용하여 추정된 모수 추정결과이며, 추정된 모수를 이용하여 평균수명과 신뢰도를 산정하였다.

Table 2. Parameter estimate result

		Parameter
Bearing	Shape	2.35
	Scale	14.18
Joint	Location	2.24
	Scale	0.55
Pavement	Location	2.51
	Scale	0.52
Slab	Shape	2.04
	Scale	19.83
Steel Bridge Coating	Location	2.69
	Scale	0.67
Foundation	Shape	1.55
	Scale	16.27
Substructure	Shape	2.21
	Scale	16.67
Drainage	Shape	2.01
	Scale	13.85

## 4. 교량의 평균 수명 및 신뢰도

### 4.1 교량부재별 누적 고장확률 함수 산정

본 절에서는 교량부재별 누적 고장확률 함수 산정을 통해 추정된 수명분포가 적합한지 판단하였다.

먼저 교량 부재별 수명 데이터가 대수정규분포와 와이블분포를 따른다는 조건을 만족했으므로 추정된 모수를 누적분포 함수에 대입하면 교량부재별로 고장 확률을 산정할 수 있다. Fig. 5~Fig. 12는 교량 부재별 실제 관측값으로 산정한 누적 고장확률과 추정된 모수를 누적분포함수로 산정한 누적 고장확률을 비교하여 나타내었다. 알 수 있는 바와 같이 수명데이터가 대수정규분포와 와이블분포를 따른다고 가정하여 추정된 분포가 관측된 누적 고장확률분포와 거의 유사함을 확인할 수 있어 추정된 수명분포가 적합한 것으로 나타났다. 바닥판과 강교도장을 제외한 모든 부재가 공용개시 후 13년과 15

년 사이에 파손확률이 50%를 넘게 되고, 공용후 25년 이후에 파손확률이 90%를 넘게 되는 것으로 추정되었다.

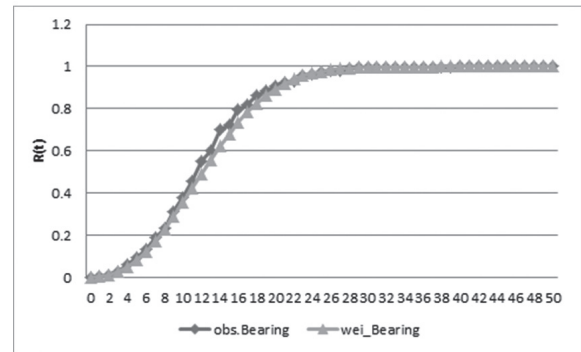


Fig. 5. Accumulated failure probability function of bearing

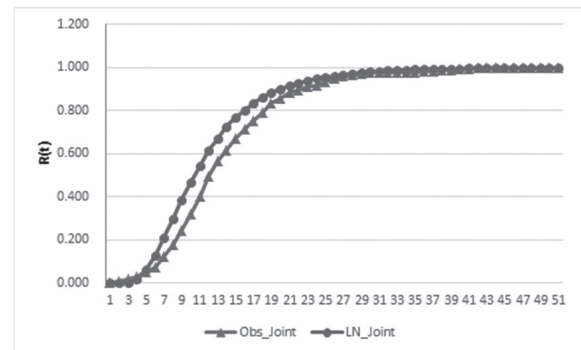


Fig. 6. Accumulated failure probability function of joint

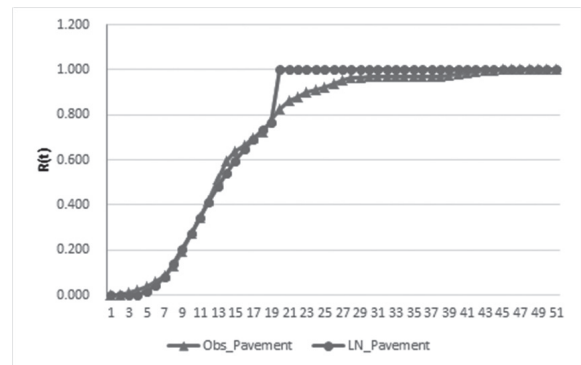


Fig. 7. Accumulated failure probability function of pavement

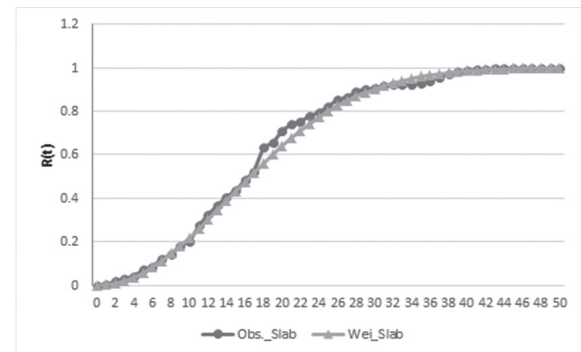


Fig. 8. Accumulated failure probability function of slab

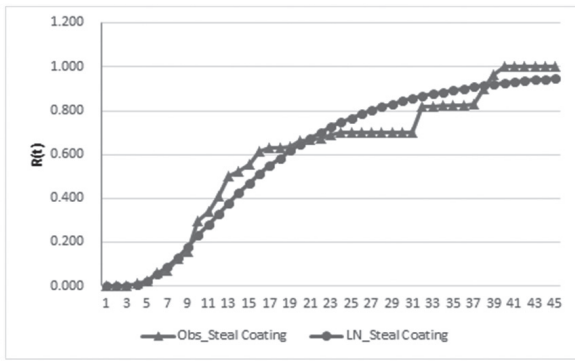


Fig. 9. Accumulated failure probability function of steel coating

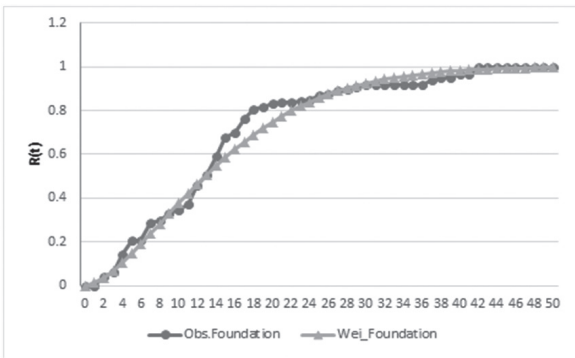


Fig. 10. Accumulated failure probability function of foundation

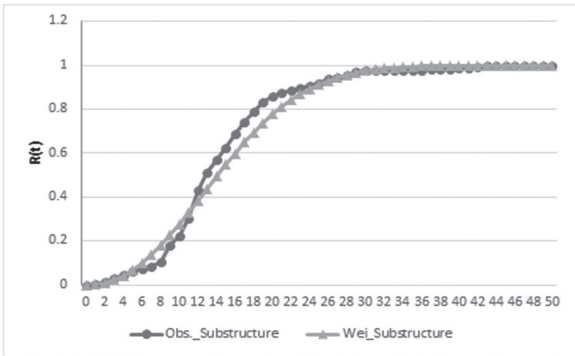


Fig. 11. Accumulated failure probability function of substructure

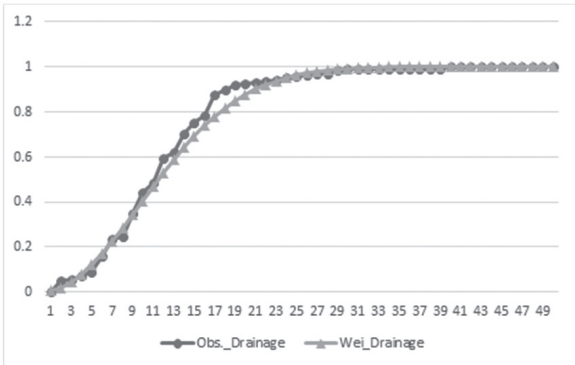


Fig. 12. Accumulated failure probability function of drainage

### 4.2 평균수명 산정

교량 부재별의 수명 자료가 대수정규분포와 와이블분포를 따를 때 신뢰성 이론을 이용하면 평균 수명, 신뢰도 및 B10수명 등 교량을 관리하는 관리자들은 교량의 상태정보를 보다 쉽게 얻을 수 있다.

먼저 교량 부재가 대수정규분포를 따를때 평균수명과 분산은 이미 구한 모수를 이용하여 식(12), 식(13)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E[T] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \tag{12}$$

$$\sigma^2 = e^{(2\mu + \sigma^2)(e^{\sigma^2} - 1)} \tag{13}$$

또한 신뢰도를 이용하면 현재 교량부재별로 평균수명 및 설계수명을 어느 정도의 확률로 공용할 수 있는 가를 산정할 수 있다. 식(14)에 이미 구한 모수를 대입하면 대상 구간이 평균수명 및 설계수명이 되었을 때의 신뢰도를 구할 수 있다. 이는 평균수명일 때 신뢰도를 구한다면, 현재 교량부재별 신뢰도에 따른 유지보수 시기를 알 수 있다.

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) \tag{14}$$

나아가  $B_{10}$ 수명은 통상 대상 아이템의 불신뢰도가 10%에 도달하는 시점을 말하는 것으로 p번째 백분위수(p-fractile)에서 p=0.1인 경우를 말한다(배도선, 1999).

대상 교량부재의 수명이 대수정규분포를 따르는 경우  $0 < p < 1$ 의 값에 대한 p번째 백분위수  $B_{100p}$ 는  $P(T < B_{100p}) = p$ 를 만족하는 값으로 정의할 수 있으므로 다음의 관계가 성립한다(배도선, 1999).

$$R(B_{100p}) = 1 - p = 1 - \Phi\left(\frac{\ln B_{100p} - \mu}{\sigma}\right) \tag{15}$$

따라서 이 방정식을  $B_{100p}$ 에 대해 정리하면

$$B_{100p} = \exp[\sigma\Phi^{-1}(p) + \mu] \tag{16}$$

가 얻어진다. 따라서 식(16)을 이용하면 대상 교량 부재의 불신뢰도가 10%에 도달하는 시점을 산정할 수 있다.

한편 교량 부재가 와이블분포를 따를때 평균수명과 분산은 이미 구한 형상모수와 척도모수를 이용하여 식(17), 식(18)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E[T] = \frac{\eta}{m} \Gamma\left(\frac{1}{m}\right) \tag{17}$$

$$\sigma^2 = \frac{\eta^2}{m} \left[ 2\Gamma\left(\frac{2}{m}\right) - \frac{1}{m} \left\{ \Gamma\left(\frac{1}{m}\right) \right\}^2 \right] \tag{18}$$

또한 대수정규분포와 마찬가지로 식(19)에 이미 구한 모수를 대입하면 대상 교량부재별 평균수명 및 설계수명이 되었을 때의 신뢰도를 구할 수 있다.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (19)$$

나아가 와이블분포의  $B_{100p}$ 에 대해 정리하면 식(20)과 같다.

$$B_{100p} = \hat{\eta}[-\ln(1-p)]^{1/\hat{m}} \quad (20)$$

교량 부재별로 수명 자료가 와이블 분포와 대수정규분포를 따를 때 하중별 평균수명 산정을 위해 식(12)~식(20)을 이용하여 산정한 결과를 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3. Mean life expectancy and applications

	Mean Life	R(t=Average Life)	R(t=Design Life)	B10Life
Bearing	12.57	0.47	0.00	5.44
Joint	13.32	0.26	0.00	5.70
Pavement	14.15	0.39	0.00	6.32
Slab	17.56	0.46	0.00	6.57
Steel Coating	18.51	0.37	0.03	6.23
Foundation	14.63	0.43	0.00	3.81
Substructure	14.77	0.47	0.00	6.03
Drainage	12.27	0.46	0.00	4.52

먼저, 평균 수명을 살펴보면 강교도장이 18.51년으로 가장 길었으며, 바닥판이 17.56년으로 그 다음 순이었다. 배수시설과 교량받침의 경우 평균수명이 각각 12.27년, 12.57년으로 가장 짧았다. 부재별 평균수명일 때 신뢰도를 살펴보면, 교량받침, 바닥판, 하부구조, 배수시설의 신뢰도가 약 47%, 기초 43%, 교면포장 39%, 강교도장 37%, 신축이음 26%였다. 앞에서 설명했듯이 본 연구에서는 공용 개시 시점에서 교량부재의 노화에 따라 유지보수 기준(임계값)에 도달한 구간 가운데 유지보수가 이루어진 시점까지의 경과 시간을 그 분석 대상으로 하였다. 즉, 현재 추정된 신뢰도 지표는 현재 교량 부재별 유지보수 시점이라고 할 수 있다. 교량받침, 바닥판, 하부구조, 배수시설의 경우 다른 부재보다 빠른 시기에 예방적 유지보수를 할 수 있다고 판단할 수 있다.

또한 현재 교량의 설계 수명인 50년이 되었을 때의 신뢰도를 살펴보면 교량부재 모두 신뢰도가 0%임을 알 수 있다. 이는 설계 수명동안 적절한 유지보수를 실행하지 않는다면 교량의 모든 부재가 완전히 파손된다는 것을 뜻한다.

한편, 불신뢰도가 10%에 도달하는 시점은 기초가 3.81년으로 가장 짧았으며, 교면포장과 바닥판이 6.32년, 6.57년으로 가장 길게 분석되었다.

## 5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 신뢰성 개념을 도입하여 최근 10년간의 한국도로공사 관할의 교량부재별의 유지보수 이력 데이터를 기반으로 적합한 모수적 수명 분포를 찾고 최대우도법으로 구해진 모수를 이용하여 교량관리시스템(BMS) 기초 자료로 활용할 수 있는 교량 부재별 평균수명, B10수명, 신뢰도 등의 척도를 산정하는 방안을 제시하였다.

교량 부재별의 수명 데이터를 가장 잘 설명하는 모수적 수명 분포형태를 찾기 위해 많이 활용되는 지수분포, 와이블분포, 대수정규분포를 대상으로 분석한 결과 대수정규분포와 와이블분포가 해당 수명 데이터의 특성을 가장 잘 설명하는 것으로 나타났다. 이 때 모수 추정을 위해서 최대우도법을 사용하였으며, 적합성 검정을 위해서는 AD통계량을 이용하였다.

추정된 모수를 기반으로 교량 부재별 평균수명을 산정한 결과, 강교도장이 18.51년으로 가장 길었으며, 바닥판이 17.56년으로 그 다음 순이었다. 배수시설과 교량받침의 경우 평균수명이 각각 12.27년, 12.57년으로 가장 짧았다.

또한, 교량의 평균수명일 때 추정된 신뢰도 지표는 현재 교량 부재별 유지보수 시점이라고 할 수 있다. 교량받침, 바닥판, 하부구조, 배수시설의 경우 다른 부재보다 빠른 시점에 유지보수를 하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제시한 방법론을 이용한다면 교량 유지보수 데이터가 축적되어갈수록 보다 정확한 분석이 가능하며, 관리자가 효율적으로 관리할 수 있는 신뢰도 지표가 될 것으로 기대된다.

마지막으로 교량의 경우 교통량, 축하중 교통량, 제설제 등 여러 환경인자로 인해 수명이 짧아지므로, 이러한 환경인자들이 교량의 수명에 얼마나 영향을 미치는지 향후 연구로 고찰할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 일반연구지원사업(기초연구)의 연구비지원(NNRF-2014R1A1A2059768)과 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비지원(16RDRP-B066173-04)에 의해 수행되었습니다.

## Reference

Ahn, J., Park, J., Lee, D., and Lee, M (2012). "A Study on Asset Valuation Method for Road Facilities Maintenance" *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 13(4), pp. 141-151.



- Bae, D. S., and Jeon, Y. L. (1999). "Reliability Analysis" ARKHE.
- 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*, 29(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*, 30(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*, 12(1), pp. 61–69.
- Do, M., Kwon, S., and Back, B. (2012). "Necessity of the Decision Making System for Efficient Road Management" *KSRE J. of Road Engineering*, 12(4), pp. 23–31.
- Do, M., Kwon, S., Lee, S., and Kim, Y. (2014). "Development of the Decision-Making System for National Highway Pavement Management" *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(2), pp. 645–654.
- FHWA (2006). 2006 Status of the Nation's Highways, Bridges, and Transit: Conditions & performance, US DOT.
- Hong, T., Chung, S. Han, S., and Lee, S. (2006). "Service life estimation of concrete bridge decks" *KSCE J. of Civil Engineering*, 10(4), pp. 233–241.
- Hudson, W., Hass, R. and Uddin, W. (1997). *Infrastructure Management*, McGraw Hill.
- Kang, J., Lee, D., Park, J., and Lee, M. (2012). "A Study on Development of BIM-based Asset Management Model for Maintenance of the Bridge" *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 13(5), pp. 3–11.
- KICT (2010). Annual Research Report of the National Highway Pavement Management System 2009.
- Kim, S., and Kim, N. (2006). "Development of performance prediction models in flexible pavement using regression analysis method" *KSCE J. of Civil Engineering*, 10(2), pp. 91–96.
- KEC (2012). *Pavement Management and Maintenance Manual*.
- KEC (2010). *Exposure Environment Level Manual*.
- KEC (2011). "A Review of Performance Grade Level Standard of Asphalt"
- Kwon, S. W., Jung, K. Y., and 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*, 4(3), pp. 25–33.
- Lee, Y., Kim, Y., and Lee, M. (2014). "Basic Study for Effective Management of Repairable Bridge" *Proceedings of KICEM Annual Conference 2014*, KICEM, pp. 2287–6065.
- 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*, 1940, TRB, pp. 38–42.
- Louisiana DOT (2015). "Transportation Asset Management Plan"
- Minnesota DOT (2014). "Transportation Asset Management Plan"
- NewYork DOT (2014). "Transportation Asset Management Plan"
- MOLIT (2011). "Statistics Annual Report"
- MOLIT (2013). "Korea Highway Capacity Manual"
- Seo, Y., Kim, J., Jeong, K. and Lee, K. (2000). "Development of the Main Algorithm of Pavement Management System for the Korea Expressway System" *Proceedings of the KSRE Conference 2000*, pp. 133–138.
- TRB, NCHRP Report 632 (2009). "An Asset-Management Framework for the Interstate Highway System" *Transportation Research Board*.
- Paterson, W. D. O. (1987). "Road Deterioration and Maintenance Effects, World bank Publications" Washington, USA.
- Park, K., Song, J., and Hwang, Y (2014). "Bridge Management System Considering Life-Cycle Cost and Performance of Bridges" *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 62(6), pp. 10–15.
- Park, D., Lim, J., and Nam, K (2006). "Life Distribution Concepts and Applications for Engineers" Youngji Publishers.
- Park, J., Jo, N., Lee, J., Lee, D., Chae, M., and Kim, K. (2011). "Comparative Analysis of Asset Management in Highway considering LoS – Comparing FHWA



vs EX” *Proceedings of the KICEM Conference 2011*,  
KICEM, pp. 185–186.

---

**요약 :** 본 연구에서는 신뢰성 개념을 도입하여 최근 10년간의 한국도로공사 관할의 교량부재별의 유지보수 이력 데이터를 기반으로 적합한 모수적 수명 분포를 찾고 최대우도법으로 구해진 모수를 이용하여 교량 부재별 평균수명 및 신뢰도를 산정하는 방안을 제안하였다. 교량 부재별의 수명 데이터를 가장 잘 설명하는 모수적 수명 분포형태를 찾기 위해 많이 활용되는 지수분포, 와이블분포, 대수정규분포를 대상으로 분석한 결과 대수정규분포와 와이블분포가 해당 수명 데이터의 특성을 가장 잘 설명하는 것으로 나타났다. 이 때 모수 추정을 위해서 최대우도법을 사용하였으며, 적합성 검정을 위해서는 AD통계량을 이용하였다. 추정된 모수를 기반으로 교량 부재별 평균수명을 산정한 결과, 강교도장이 18.51년으로 가장 길었으며, 바닥판이 17.56년으로 그 다음 순이었다. 배수시설과 교량받침의 경우 평균수명이 각각 12.27년, 12.57년으로 가장 짧았다. 또한 교량의 평균수명일 때 추정된 신뢰도 지표는 현재 교량 부재별 유지보수 시점이라고 할 수 있다. 교량받침, 바닥판, 하부구조, 배수시설의 경우 다른 부재보다 빠른 시기에 유지보수를 하는 것으로 분석되었다.

**키워드 :** 교량 부재, 생존분석, 교량관리시스템, 평균수명, 확률분포

---