

교량 성능 정보에 기초한 자산가치 평가 방법 연구

이용준^{1*}, 박경훈², 선종완²

A Study on the Asset Valuation Method Based on the Performance Information of Bridge

Yong-Jun Lee^{1*}, Kyung-Hoon Park², Jong-Wan Sun²

Abstract: Asset valuation of social infrastructure is essential for rational decision-making for efficient management of assets. In addition, it can be an indicator for correctly recognizing assets. In general, Korea applies depreciated replacement cost based on the straight-line method to evaluate asset value, yet this is unsuitable for evaluating actual value because it is depreciated at a constant rate over the useful life period. In order to evaluate the asset value considering the performance of the bridge, the performance index of the bridge is estimated using the Weibull distribution. Using the estimated performance indicators and defect index, a new asset value evaluation method is proposed and compared and analyzed with the existing method. The proposed valuation method can take into account the performance of the bridge, so it is judged to be more objective and reasonable than existing method.

Keywords: Asset valuation, Weibull distribution, Bridge life, Reliability, Bridge management system(BMS)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

국내 교량 구조물은 도로의 신설, 선형개량 및 확장공사 등에 의해 지속적으로 건설되어 2022년 말 기준 38,598개소로 최근 10년간 연평균 3.0%씩 증가하였다. 또한 2000년 전후 집중적으로 건설된 교량들로 인해 10년 후에는 평균 공용년수가 약 30.4년으로 준공 후 30년 이상 되는 노후 교량이 17.7%에서 50.3%로 급격하게 증가할 것으로 전망된다(MOLIT, 2023). 미국 연방도로청(FHWA)에서 운영하는 Long-Term Bridge Performance(LTBP) Program에서 제공하는 통계 데이터를 살펴보면 2022년 말 기준 준공 후 50년 이상된 노후 교량이 전체 교량의 44.2%를 차지하고 있으며 평균 공용년수가 약 45.9년에 이르고 있다(FHWA, 2023).

미국, 영국을 비롯해 선진 각국은 우리나라보다 먼저 도로 시설물의 노후화를 경험하여 도로관리에 기존의 공학적인 개념 이외에도 회계, 경영, 재무, 경제학적 자산개념을 도입하고

있다. 이를 통해 도로시설물의 서비스수준(Level of Service; LOS)을 최대화하는 동시에 예산지출을 최적화하고 장기적인 자산운용 계획을 수립하는 자산관리시스템을 운영 중에 있다. 미국 주도로교통협회(American Association of State Highway and Transportation Officials; AASHTO)에서는 자산관리에서 자산의 가치평가를 핵심 구성요소로 설명하고 있다(AASHTO, 2020). 관리자가 관할 내 자산의 가치에 대한 정확한 인식은 수리 또는 교체가 필요한 자산의 자금 조달 기회를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 국가의 고속도로 인프라 개선에 지출되는 예산의 투자에 대한 성과지표가 될 수 있기 때문이다(Dojutrek et al., 2012). 즉 사회기반시설의 자산가치 평가는 자산의 유지관리를 위한 합리적인 의사결정에 필수적이며 자산을 올바르게 인식하기 위한 지표가 될 수 있다.

본 연구에서는 국내 도로시설 중 일반국도 교량을 대상으로 유지관리 의사결정의 기초자료로 활용하기 위해 「국가회계기준에 관한 규칙(MOSF, 2009)」(이하 국가회계기준)의 따라 정액법(Straight-Line Depreciation; SLD)을 적용하여 자산가치를 평가하고자 한다. 또한 보다 합리적인 평가를 위하여 교량의 성능을 고려할 수 있는 자산가치 평가 방법을 제시하고 자산가치 평가 방법 간의 결과 비교를 통해 합리성과 활용성을 판단한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

교량의 현재 성능이 반영된 자산가치 평가 방법을 개발하

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구원, 교신저자

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구원

*Corresponding author: yongjunlee@kict.re.kr

Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

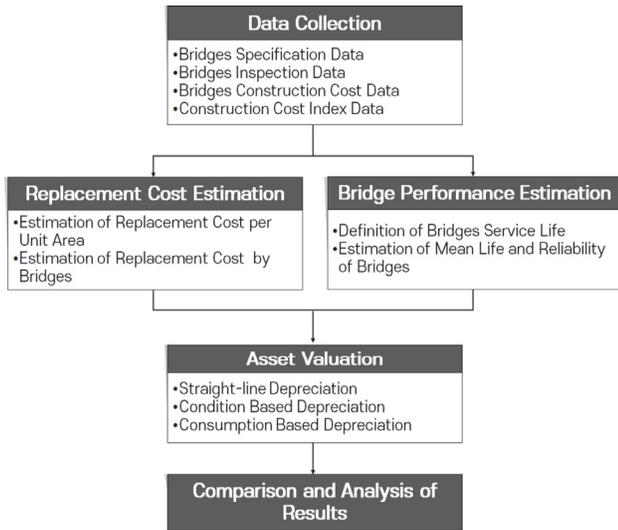


Fig. 1 Research methodology and process

고 적용하기 위한 연구의 방법 및 절차는 Fig. 1과 같다. 국내 교량의 성능 기반 자산가치 평가 방법을 개발하기 위해 교량관리시스템(Bridge Management System; BMS)(KICT, <https://nbms.kict.re.kr>)에서 교량의 기본제원, 점검이력 등의 정보를 수집하고 수집된 데이터를 바탕으로 와이블 분포(Weibull Distribution)를 활용하여 교량의 성능지표를 추정한다. 다음으로 공사비정보포장(PPS, <http://pcaea.g2b.go.kr>)에서 최근 5년간 교량 건설비용을 수집하여 단위면적당 공사비 단가를 산정하고 공용중인 교량 면적에 적용하여 재조달원가를 산정한다. 마지막으로 추정된 교량의 성능지표와 재조달원가를 활용하여 자산가치를 평가하고 기존 방법과 본 연구에서 제안하는 방법을 비교·분석하여 합리성과 적용성을 검증하고자 한다.

2. 사회기반시설 자산가치 평가 현황

2.1 자산가치 평가 관련 제도

국내 도로시설물의 자산가치 평가는 국가회계기준 제정에 따라 사회기반시설을 자산으로 인식하고 이를 국가 재무제표에 표기하기 위해 시작되었다. 사회기반시설의 평가는 국가회계기준 제37조, 제38조에 따라 해당 자산의 건설원가 또는 매입가액에 부대비용을 더한 금액을 취득원가로 하고 SLD 방법 등을 적용하여 건물, 구축물 등 세부 구성요소별로 감가상각한다.

미국은 1999년 정부회계기준위원회 GASB(Government Accounting Standards Board)에서는 정부회계기준 34번(GASB 34)에서 제정된 것을 기준으로 중앙 및 지방정부의 사회기반시설에 대한 자산가치를 매년 산정하도록 의무화하였다.

Table 1 Comparison of asset value evaluation method

Classification	Accounting standards	Asset valuation method	Depreciation method
Korea	Government accounting act	Acquisition cost Fair value	SLD
USA	GASB	Acquisition cost	SLD
England	FReM/IFRS	Acquisition cost	SLD

GASB 34에서 제안하는 자산가치 평가 방법은 크게 감가상각법(Depreciation Approach)과 수정접근법(Modified Approach)으로 나누어진다. 감가상각법은 SLD 방법을 사용하여 취득원가를 감가상각함으로써 사회기반시설의 자산가치를 평가하는 방법이고 수정접근법은 취득원가에 대해 감가상각 없이 자산가치를 평가하는 방법이다. 수정접근법은 자산관리체계를 활용하여 사회기반시설이 최소한의 상태수준으로 유지관리되고 있다는 것을 전제로 하는 산정 방식으로 수정접근법을 적용하기 위해서는 포장관리시스템, 교량관리시스템 등의 유지관리시스템을 활용하여 관리해야 한다고 규정하고 있다(Lee et al., 2010).

영국에서는 2005년에 영국 교통국(Department for Transport)에서 발행한 고속도로 자산가치 평가 지침(Guidance Document for Highway Infrastructure Asset Valuation)(Roads Liaison Group et al., 2005)을 기준으로 자산가치 평가 방법을 정의하고 있으며 도로의 자산가치 산정 방식을 감가대체원가법(Depreciated Replacement Cost)으로 규정하고 있다(Do et al., 2020). 감가상각을 위한 방법으로는 전통방법(Conventional Method)과 갱신회계방법(Renewal Accounting Method)의 두 가지를 제안하고 있다. 전통방법은 GASB 34의 감가상각법과 동일한 개념에 기초하여 가로등, 토지 등에 적용하고 있다. 갱신회계방법은 GASB 34의 수정접근법과 동일한 전제조건을 가지지만 별도의 감가비용 산출방식을 이용하여 도로, 구조물 등의 가치평가에 적용한다(Lee et al., 2010). Table 1은 국내와 해외 선진국의 자산가치 평가 방법 및 감가상각법을 비교한 결과로 사회기반시설의 자산가치를 최초로 측정할 때 취득원가로 측정하고 있으며 감가상각 방법은 SLD 방법을 사용하는 것으로 나타났다.

2.2 개선된 자산가치 평가 사례

사회기반시설의 국내외의 기존 가치평가 방법은 SLD 방법에 의해 매년 동일한 감가상각액을 일정하게 감액해주는 방식으로 현재의 성과와 서비스수준을 반영하여 평가하지 못하는 한계를 극복하기 위한 자산가치 평가 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

Dojutrek et al.(2014)은 기존 자산가치 평가 방법에 대한 한

계점을 해결하기 위해 EDBC(Elemental Decomposition and Bi-Criteria)방법을 제안했다. EDBC 방법은 서비스수준과 잔존수명을 동시에 고려하여 자산을 평가하는 방식이다. 또한 와이블 분포를 활용하여 자산의 생존확률을 예측하고 생존확률에 따른 가치를 평가하였다. 자산의 성능이 고려됨에 따라 기존 자산가치 평가 방법보다 자산의 가치가 합리적으로 평가되었고 유지관리 계획 수립시 가치평가 결과가 보다 중요한 역할을 할 수 있다는 결론을 도출하였다.

NCHRP 335(2022)에서는 감가상각 방법을 수명기반 감가상각(Age Based Depreciation; ABD), 상태기반 감가상각(Condition Based Depreciation; COBD), 비선형 편익소비기반 감가상각(Non-Linear Patterns of Benefit Consumption Based Depreciation; BCBD) 세가지 방법으로 구분하였다(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022). ABD 방법은 실제 수명에 따라 선형적으로 감가상각하는 것으로 자산의 기준내용연수에 따라 감가하는 전통적인 감가상각 방법이다. COBD 방법은 기준내용연수에 대해 신뢰할 수 없는 경우 자산의 신뢰할 수 있는 상태 데이터를 활용하여 자산에 대한 새로운 내용연수를 추정하고 추정된 내용연수에 따라 감가상각하는 방법이다. BCBD 방법은 자산의 열화형태가 비선형일 때 적용하는 방식으로 성능예측 모델 등에 의해 추정된 자산의 열화형태를 감가상각률에 적용하여 자산의 가치를 평가하는 방법이다.

David Edgerton FCPA(2013)는 사회기반시설의 감가상각을 위하여 소비기반 감가상각(Consumption Based Depreciation; CBD) 방법을 개발하였다. CBD 방법은 NCHRP 335에서 제안한 BCBD 방법과 같은 개념으로 자산의 열화 형태에 따라 감가상각율을 적용하는 방법이다.

2.3 정액법 기반 교량 자산가치 평가 방법

국가회계기준에서 사회기반시설의 자산가치 평가는 일반 유형자산과 동일하게 평가하도록 규정하고 있다. 사회기반시설 자산의 분류는 「일반유형자산과 사회기반시설 회계처리 지침(MOSF, 2016)」(이하 회계처리지침)에 따라 토지, 건물, 구축물, 기타 4가지로 분류하고 있다. 교량은 구축물에 해당되며 구축물의 자산가치는 취득원가로 평가하거나 대체적 평가방법을 적용할 경우 SLD 방법에 의한 상각후 대체원가법(Depreciated Replacement Cost Method; DRC)으로 평가하도록 규정하고 있다. DRC 방법은 취득원가 또는 제조달원가에 물리적 감가 등을 반영하여 재평가 금액을 산정하는 방법을 말하며 식 (1)과 같다.

$$SLD_{DRC} = Cost_{Replacement} \times \frac{t_{Remaining\ Useful\ Life}}{t_{Standard\ Useful\ Life}} \quad (1)$$

여기서 내용연수는 자산의 사용 가능한 수명으로 기대되는 기간을 의미하며 회계처리지침에서는 교량의 기준내용연수를 20년(±25%)으로 제시하고 있다.

식 (1)에서 제조달원가는 동일한 용역잠재력을 가진 자산을 현재 재생산 또는 재취득하는데 소요되는 현금등가액으로서 취득 또는 건설에 투입될 원가 추정액을 말하며 구축물의 제조달원가 산정식은 식 (2)와 같다. 여기서 단위면적당 제조달단가는 5년 이내 유사 사회기반시설의 실제 원가를 건설면적 m²당 단가로 환산하여 산정하도록 하고 있으나 실제 건설원가의 자료가 없을 경우에는 평균 설계단가나 건설예정원가 등을 적용하도록 규정하고 있으며 식 (3)과 같다.

$$Cost_{Replacement} = Cost\ per\ Unit\ Area_{Replacement} \times Quantity \quad (2)$$

$$Cost\ per\ Unit\ Area_{Replacement} = \frac{Cost_{Construction}}{Quantity_{Construction}} \quad (3)$$

3. 와이블 분포를 활용한 교량 성능지표 추정

3.1 개선된 교량 자산가치 평가

국내 회계처리지침에서 교량의 자산가치 평가는 Fig. 2와 같이 교량의 현재 성능을 고려하지 않고 시간의 경과에 따라 기준내용연수인 20년동안 일정한 금액만큼 감액한다. 그러나 교량은 공용 중 적절한 유지보수를 통해 성능을 유지하거나 회복하여 수명을 연장할 수 있는 시설물로 2022년 말 기준 전국 도로교량 38,598개소의 평균 공용연수가 약 20.4년인 것을 고려하면 기준내용연수 20년은 실제 수명에 비해 매우 짧게 설정되어 있다. 일본의 Measuring Infrastructure(2017)에서는 기존 법령에서의 내용연수를 기초로 수명분석을 통해 교량의 사용수명을 약 67년으로 추정하였다. 또한 Michael Barker(2020)은 1960~2010년에 준공된 미국 펜실베이니아 교량에 대하여 LCC분석을 통해 평균수명을 약 73년~83년으로 추정하였다.

회계처리지침에서는 자산의 주기적인 유지보수 등을 고려하여 합리적인 내용연수를 추정할 수 있다면 추정된 내용연수를 적용하여 감가상각할 수 있도록 규정하고 있다. 전통적인 방법으로 교량의 자산가치 평가시 SLD 방법이 근간이기

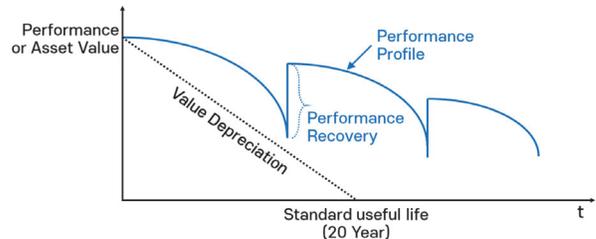


Fig. 2 Performance profile and value depreciation of bridge

때문에 합리적인 내용연수 추정은 가치평가에 중요한 과정이다. 또한 자산의 감가상각시 SLD 방법을 원칙으로 하지만 자산의 미래 경제적 효익이 소비되는 형태가 SLD 방법으로 감가상각하는 것과 중대하게 다를 경우에는 경제적 효익이 소비되는 형태를 반영한 감가상각 방법을 적용할 수 있다는 예외를 허용하고 있다. 즉 교량의 성능변화를 고려한 감가상각 방법의 적용을 고려할 수 있다.

일반국도 교량은 BMS를 운영 중에 있으며 공용 중에 발생하는 유지관리 정보를 수집 및 관리하여 교량 관리자에게 유지관리 정책과 계획, 전략 수립에 활용할 수 있도록 의사결정 지원을 하고 있다(KICT, 2022). 본 연구에서는 전통적인 자산 가치 평가의 한계점을 보완할 수 있는 성능 기반 자산가치 평가 방법의 개발에 필요한 교량의 실제 사용수명, 성능지표 등의 추정을 위하여 BMS에서 교량의 기본제원, 점검이력 정보 등을 활용하였다.

3.2 교량 사용수명 정의

신뢰성 이론은 대부분 부품이나 시스템의 고장(결함)이 발생할 때까지의 수명의 길이에 대한 것으로 단위는 시간으로 측정된다. 이를 확률로 정량화하여 정의한 것을 신뢰도라 한다. 신뢰도는 “시스템, 기기 및 부품 등이 규정된 사용조건에서 특정한 기간 동안 의도된 기능을 수행할 확률”이라고 정의하며 반대로 고장은 “제품이나 체계가 의도된 기능을 수행하지 못할 때”라고 정의한다(Seo, 2009).

신뢰성 이론에서 가장 널리 쓰이는 와이블 분포는 어떤 대상이 시간에 따라 고장률이 증가하거나 일정 또는 감소하는 세 가지 형태를 모두 추정할 수 있어 널리 쓰이는 분포이다. 와

이블 분포를 활용하여 교량의 결함(고장)이 발생하는 시간을 추정하기 위해서는 수명에 대한 정의가 필요하다. 교량은 부재가 다양하며 교체를 하는 부재(교면포장, 신축이음, 교량받침 등)도 있지만 보수를 통해 지속적으로 사용하는 부재(바닥판, 거더, 교대/교각 등)도 있어 교량의 사용수명을 정의하는데 어려움이 있다(Lee and Lee, 2016).

NCHRP 713(2012)에서는 교량의 사용수명은 수명시작과 종료사이 시간의 길이로 수명종료(End-of-Life)를 정의하였다(Thompson et al., 2012). 수명의 시작은 교량의 준공시점이 일반적이나 수명종료는 교량의 어떤 상태를 고려하느냐에 따라 다르다. 교량의 수명종류는 물리적 수명, 기능적 수명, 경제적 수명 등과 같이 다양한 규정이 가능하다(Jeong et al., 2016). 따라서 교량의 사용수명의 정의를 위해서는 교량의 수명종류와 수명종료 시점의 정의가 필요하다.

NCHRP 713에서는 교량의 수명종료를 NBI Rating 3~5 이하로 떨어지는 때를 수명종료 기준으로 삼고 수명분석을 수행하여 사용수명을 산정하였다(Thompson et al., 2012). 국내에서는 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(MOLIT, 2021)」(이하 시설물안전법)에 근거하여 모든 교량에 대한 평가는 상태등급으로 표현되며 개별 교량의 성능은 최상의 상태인 A등급부터 최악의 상태인 E등급까지 구분하고 개별 구조부재의 상태는 a-e등급으로 평가한다. 다양한 부재(부품)로 구성된 교량은 시설물안전법 시행규칙에서 구조안전상 주요부위의 중대한 결함을 정의하고 있으며 Table 2와 같다.

일반적으로 교량에서 중대한 결함은 전체 상태등급 D 및 E, 주요부재등급 d 또는 e에 해당하며 교통통제 등 교량의 정상적인 기능이 불가능한 상태를 의미한다. 중대한 결함이 발생한 교량에 대해서는 시설물안전법 제23조에 따라 사용 제한 또는 금지 등의 안전조치를 취할 수 있도록 되어 있으며 이것은 교량의 제 기능이 완전히 정지 또는 불안정하거나 규정된 성능을 발휘하지 못한다는 것을 의미하므로 신뢰성 이론에서의 고장이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 교량의 수명종료를 Table 2와 같은 교량 부재에 중대한 결함이 발생하여 안전성에 문제가 있어 사용하지 못하는 상태(주요 부재 중 한 부재라도 d 또는 e등급)로 정의하였다. 즉 교량의 사용수명은 기능적 수명으로 정의할 수 있으며 준공시점부터 중대한 결함이 발생하는 기간까지로 한다.

Table 2 Important defects of bridge

Members	Defects Type	Condition
Foundation	Safety(Scour, etc)	d or less
Piers	Differential Settlement(Displacement)	d or less
Bearing	Damage	d or less
Reinforced concrete	Chloride Attack, Carbonation, Segregation	d or less
Structural members	Structural Safety(Steel Reinforcement)	d or less
Concrete members	Crack	d or less
Structural steel	Welded	d or less
Abutment/Piers	Crack	d or less
Steel girders	Crack, Strain	d or less
Cable members	Damage	d or less
Prestressed concrete	Damage(Tendon)	d or less

Source: MOLIT(2022)

3.3 데이터 수집 및 현황

와이블 분포를 활용하여 교량의 수명 및 성능지표 추정을 위해 BMS에서 공용중인 교량의 점검 데이터를 Table 3과 같이 수집하였다. 수집한 데이터는 최근 13년 동안 교량 4,964개소를 대상으로 수행한 정밀 점검 및 진단 결과 13,277건이다.

Fig. 3은 분석 대상교량의 현황으로 평균 공용연수는 18.2

Table 3 Data collection

Overview	
Type of inspection	In-depth inspection, In-depth diagnosis
Priod of inspection	2009~2022
Number of inspection	13,277
Number of bridge	4,964

Source: BMS(KICT)

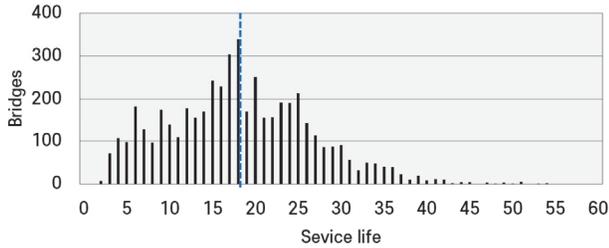


Fig. 3 Current status of target bridge service life

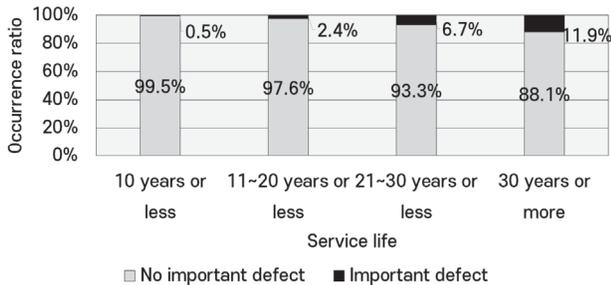


Fig. 4 Important defect ratio by target bridge service life

년으로 분석되었고 30년 이상된 노후교량은 464개소로 약 9.3%의 비율을 차지하였다. Fig. 4는 공용년수별 교량개소수 대비 중대한 결함 발생률로 공용년수가 증가할수록 중대한 결함 발생률도 증가하는 것으로 분석되었다.

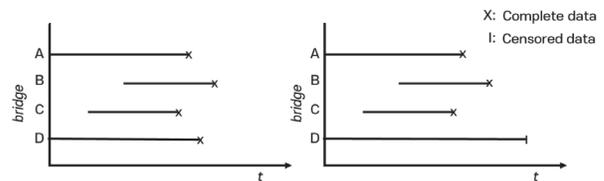
3.4 데이터 전처리

수명데이터 형식은 Fig. 5와 같이 (a)완전자료와 (b)관측중단자료로 구분할 수 있다. 완전자료는 대상 아이템이 모두 고장 날 때까지 시험하여 얻어진 데이터이고 관측중단자료는 특정 시점에서 시험을 종결하여 얻어진 데이터를 말한다(Seo, 2009). 교량의 실제 사용수명을 바탕으로 자산가치를 평가하기 위해서는 2022년 말 현재 공용기간 중 중대한 결함이 발생하지 않은 교량도 포함되어야 실제적인 사용수명을 도출할 수 있으므로 관측중단자료도 활용하였다.

데이터 전처리는 Table 4와 같이 점검년도와 중대한 결함 발생 여부에 따라 공용년수를 산정하였다. 여기서 공용년수는 결함이 발생한 교량은 최초 준공시점부터 결함 발생까지

Table 4 Example of data set

Bridge	Open Year	Inspection Year	Censored	Service Year
A	2007	2014	0 (No defective)	12
		2019	0 (No defective)	
B	1997	2014	1 (Defective)	17
		2019	0 (No defective)	5
			⋮	
Total			0 (No defective)	12,911
			1 (Defective)	366



(a) Complete data

(b) Censored data

Fig. 5 Type of life data

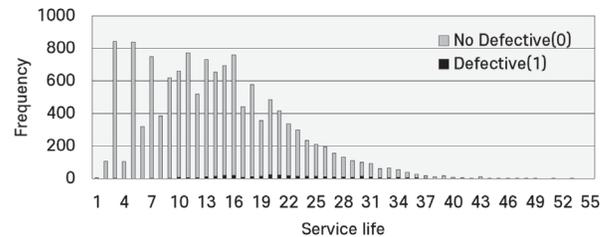


Fig. 6 Status of target bridge life data

의 공용 기간을 의미하고 결함이 발생하지 않은 교량은 최초 준공시점부터 마지막 점검년도까지의 공용 기간을 뜻한다. 결함여부에서 0은 관측중단(정상), 1은 결함발생을 뜻한다. 빈도는 그에 해당하는 교량개소수를 나타낸다. Fig. 6과 같이 총 13,277개의 데이터 중 결함발생(1)데이터 366개(2.8%), 관측중단(0) 데이터 12,911개(97.2%)로 구성되어 있다.

3.5 교량의 평균수명 및 신뢰도 추정

와이블 분포는 형상모수 값에 따라 고장률 함수의 형태가 달라지며 형상모수가 1보다 작으면 고장률이 감소하고 1보다 크면 고장률이 증가한다. 또한 형상모수 값이 1인 경우 고장률이 일정하며 지수분포로 표현이 가능하다(Seo, 2009). 와이블 분포의 확률밀도함수(Probability density function), 신뢰도 함수(Reliability function), 고장분포함수(Failure distribution function), 고장률(Hazard rate) 함수는 각각 식 (4), (5), (6), (7) 과 같으며 β 는 형상모수, η 는 척도모수이다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (4)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (6)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (7)$$

와이블 분포를 활용하여 평균수명, 신뢰도, 고장율 등과 같은 성능지표를 추정하기 위해 수명 분포의 모수를 추정해야 한다. 모수 추정에는 확률지(Probability Plot) 방법과 최대우도 추정법(Maximum Likelihood Estimation; MLE)이 주로 사용되고 확률지는 데이터가 확률분포에 얼마나 적합한지에 활용할 수 있다(Bae and Jeon, 1999).

MLE는 관측된 데이터의 발생가능성을 나타내는 우도함수(Likelihood function)를 가장 크게 하는 모수를 찾아내는 방법이다. 와이블 분포를 따르는 n개의 관측값이 주어지면 우도함수는 식 (8)과 같다.

$$L(\eta, \beta; t_i) = \prod_{i=1}^n f(t_i) \quad (8)$$

본 연구에서는 최대우도법과 확률지를 활용하여 와이블 분포의 모수를 추정하고 적합도를 검정하였다. 최대우도법을 활용하여 모수를 추정할 결과 β 는 3.94312, η 는 48.1341로 추정되었다. 일반국도 교량은 β 가 1보다 크므로 시간이 지날수록 고장률이 증가하는 증가형 고장률 형태를 띄고 있다. 여기서 고장률은 중대한 결함의 발생확률이며 노후화가 진행될수록 발생률이 증가한다는 뜻이다. Fig. 7은 수명데이터를 확률지에 도시한 결과로 대부분의 점들이 적합선을 가까이 따르고 있어 와이블 분포를 상당히 잘 따른다고 해석할 수 있다(Seo, 2009). 수명데이터가 와이블 분포를 따르는 경우 평균수명과 분산은 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$E[T] = \int_0^\infty \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] dt = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (10)$$

위의 식을 활용하여 일반국도 교량의 공용년수에 따른 신뢰도, 고장율, 평균수명을 산정할 수 있으며 Table 5와 Fig. 8은 분석 결과이다. Table 5와 같이 일반국도 교량의 평균수명은 약 41.7~45.5년으로 추정되었고 교량의 노후화 시점 기준인 30년에는 신뢰도가 85.6%로 양호한 편이나 30년 이후부터

Table 5 Mean life to failure of bridge

	Estimated value	95% Confidence interval		
		Lower	Upper	
Mean life to failure(Year)	43.6	41.7	45.5	
Reliability (%)	10 year	99.8	99.6	99.9
	20 year	96.9	95.5	98.0
	30 year	85.6	81.4	89.3
	40 year	61.8	55.0	68.5
	50 year	31.3	25.5	38.0

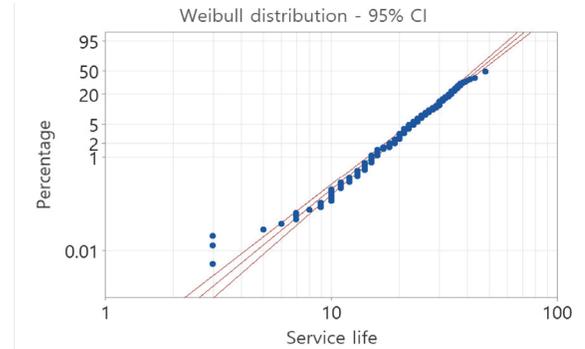


Fig. 7 Probability plot of bridges life data

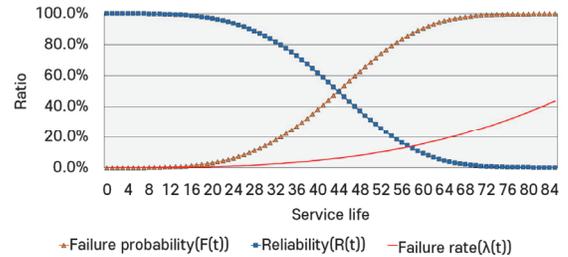


Fig. 8 Reliability and failure probability of bridges

고장율이 증가하여 공용년수 50년 일 때 신뢰도는 31.3%로 급격하게 감소한 것으로 분석되었다.

Fig. 8은 공용년수에 따른 교량의 신뢰도, 고장분포함수, 고장율의 추세를 보면 공용년수 70년 전후로 대부분의 교량에 중대한 결함이 발생하는 것으로 분석되었다.

4. 성능 기반 교량 자산가치 평가

4.1 단위면적당 재조달단가 산정

공용중인 교량의 재조달원가 산정을 위해 단위면적당 재조달단가를 산정하였다. 단위면적당 재조달단가 산정을 위해 공사비정보광장 시스템을 활용하였다. 공사비정보광장은 건설사업 단계별 효율적인 공사원가관리를 지원하기 위해 만들

Table 6 Status of Collected Construction Cost information of bridges(2017~2021)

		Overview
Delivery year		2017~2021
Superstructure	Total	79
	PSCI	39
	RCS	19
	STB	16
	RA	5

Source: Construction Cost Information System(PPS)

Table 7 Construction cost of bridges(2017~2021)

Project delivery year	Super structure	Length (m)	Width (m)	Construction cost	
				Per unit area (KRW/m ²)	Total (KRW)
2017	STB	61	19.5	3,707,311	4,409,847,020
2018	PSCI	35	18.4	1,866,005	1,201,707,147
2019	RA	50	19.725	1,420,401	1,400,870,347
			⋮		
2020	PSCI	40	10	1,900,793	760,317,048
Average				1,865,685	2,928,810,138

Source: Construction Cost Information System(PPS)

Table 8 Construction cost index

Year	Construction cost index (2015=100)*	Construction cost index (2022=100)
2017	106.0	140.0
2018	110.9	133.7
2019	115.6	128.3
2020	118.0	125.7
2021	130.4	113.7
2022	148.3	100.0

*Source: Construction Cost Management Center(KICT)

Table 9 Results of calculation of construction cost per unit area in terms of present value

Bridge no.	Project delivery year	Construction cost index	Construction cost per unit area (KRW/m ²)	
			Before conversion	After conversion
1	2017	140.0	1,456,952	2,039,811
2	2018	133.7	2,388,524	3,193,531
		⋮		
79	2020	125.7	3,007,553	3,781,043
Total			147,389,104	193,053,254
Average			1,865,685	2,443,712

어진 시스템으로 유사한 시설물 건설 공사비 정보를 검색할 수 있다. Table 6은 2017년부터 2021년까지 일반국도에 공사 발주된 교량 현황으로 최근 5년간 총 79개소가 발주되었고 PSCI 형식 교량이 약 절반을 차지하였다. Table 7은 수집된 연장, 폭, 공사비 등의 공사 정보를 활용하여 단위면적당 재조달 단가를 산정한 결과이며 1,865,685원/m²으로 분석되었다.

단위면적당 재조달단가를 현재가치로 환산하기 위하여 도로시설 건설공사비 지수를 활용하였다. 건설공사비지수는 건설공사에 투입되는 직접공사비를 대상으로 한국은행의 산업연관표와 생산자물가지수, 대한건설협회의 공사부문 시중노임 자료 등을 이용하여 가공한 통계로 건설공사 직접공사비의 가격변동을 측정하는 지수이다. Table 8은 도로시설 건설공사비 지수이며 현재가치로 환산하기 위해 2022년 말을 기준으로 공사비지수를 재산정하였다.

Table 7과 같이 수집된 공사 발주 정보에 Table 8의 연도별 건설공사비 지수를 적용하여 Table 9와 같이 단위면적당 재조달단가를 현재가치로 환산한 결과 2,443,712원/m²으로 분석되었다.

4.2 성능 기반 교량 자산가치 평가 방법

본 절에서는 일반국도 교량의 자산가치를 평가하기 위해 회계처리지침상의 자산가치 평가 방법인 SLD 방법과 제안하는 성능 기반 자산가치 평가 방법을 비교·분석하였다. 성능 기반 자산가치 평가 방법은 두 가지 유형으로 교량의 합리적인 기준내용연수를 추정하여 SLD 방법에 적용하는 방법과 교량의 열화형태와 현재 상태를 감가상각에 반영한 자산가치 평가 방법이다. 여기서 기준내용연수를 추정하여 활용하는 방법을 사용수명 기반 감가상각(Service Life Based Depreciation; SLBD) 방법, 공용년수에 따른 성능지표를 활용하는 방법을 성능 기반 감가상각(Performance Based Depreciation; PBD) 방법이라고 정의하였다.

SLBD 방법은 앞에서 추정된 교량의 평균년수 45년을 기준 내용연수로 사용하여 전통적인 자산가치 평가 방법과 동일한 SLD 방법을 적용하므로 식 (11)과 같이 표현할 수 있다. SLBD 방법에서 잔존가치는 기준 내용연수 종료시점에 도달하였다는 가정 하에 자산의 처분 시 획득할 금액에서 추정 처분비용을 차감한 금액으로 전통적인 SLD 방법과 동일한 '0' 원으로 하였다

$$SLBD = Cost_{Replacement} \times \frac{t_{Remaining\ Useful\ Life}}{t_{Estimated\ Useful\ Life}} \quad (11)$$

PBD 방법은 BCBD 방법이나 CBD 방법과 유사한 방식으로 앞서 와이블 분포로부터 추정된 신뢰도를 적용하여 감가

상각한다. 또한 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침 (MOLIT, 2022)」의 교량 등급별 결함도 지수를 고려하여 교량의 현재 상태까지 고려한다. 결함도지수는 부재 상태평가를 결정한 후 부재별 가중치를 적용하여 개별 교량의 상태평가 결과를 산정하기 위한 기준 값이며 Table 10과 같다.

PBD 방법에서 신뢰도와 결함도 지수를 동시에 고려하는 이유는 교량의 노후도가 높고 결함도가 높을수록 중대한 결함 발생확률이 높아질 것으로 판단되기 때문이다. 또한 공용년수가 다른 교량들이 동일한 상태등급이라고 해도 노후도가 높은 교량이 새로 건설된 교량보다 안전성, 내구성, 사용성이 상대적으로 낮을 것으로 판단되므로 가치평가에 반영하였다. 따라서 PBD 방법은 식(12)와 같이 정식화할 수 있다. 여기서 RI_t 와 DI_t 는 각각 개별교량의 공용년수 t년일 때의 신뢰도와 결함도 지수이다.

$$PBD = Cost_{Replacement} \times RI_t \times (1 - DI_t) \quad (12)$$

Fig. 9는 PDB 방법의 개념으로 교량의 신뢰도와 결함도지수에 따라 감가상각율을 다르게 적용하기 때문에 교량의 현재 성능을 반영할 수 있다는 특징이 있다.

Table 10 Criteria for grade and defect-rate

Condition Rating	Defect-rate index	Defect-rate range	Meaning
A	0.1	$0 \leq x < 0.13$	Excellent
B	0.2	$0.13 \leq x < 0.26$	Good
C	0.4	$0.26 \leq x < 0.49$	Fair
D	0.7	$0.49 \leq x < 0.79$	Poor
E	1.0	$0.79 \leq x$	Bad

Source: MOLIT(2022)

Table 12 Result of total asset valuation(Unit: One million KRW)

Bridge No.	Open Year	Service Year	Defect-rate index	Reliability	Replacement Cost (RC)	Replacement Cost		
						SLD	SLBD	PBD
1	1996	26	B(0.8)	0.9156	18,776.0	0.0	7,927.7	13,753.2
2	2008	14	B(0.8)	0.9924	79,903.3	23,971.0	55,044.5	63,433.7
3	2001	21	B(0.8)	0.9627	9,054.0	0.0	4,828.8	6,973.2
4	2010	12	B(0.8)	0.9958	34,978.0	13,991.2	25,650.5	27,865.6
5	2009	13	C(0.6)	0.9943	27,990.3	9,796.6	19,904.2	16,698.2
				⋮				
8,190	2003	19	B(0.8)	0.9747	3,178.4	158.9	1,836.4	2,478.5
8,191	1997	25	B(0.8)	0.9272	6,964.6	0.0	3,095.4	5,166.3
8,192	1995	27	B(0.8)	0.9027	15,520.0	0.0	6,208.0	11,208.5
8,193	2010	12	B(0.8)	0.9958	4,362.0	1,744.8	3,198.8	3,475.1
8,194	2010	12	B(0.8)	0.9958	4,362.0	1,744.8	3,198.8	3,475.1
8,195	2009	13	B(0.8)	0.9943	4,965.6	1,738.0	3,531.1	3,949.8

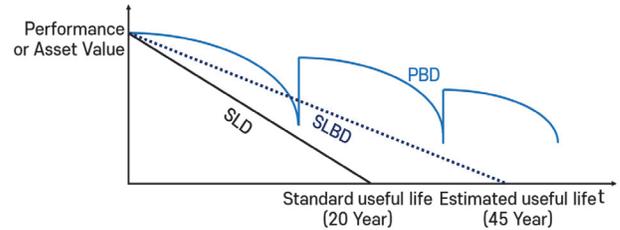


Fig. 9 Concept of PBD

4.3 성능 기반 교량 자산가치 평가 결과

2022년 말 기준 일반국도 교량 8,195개소를 대상으로 SLD 방법과 제안하는 SLBD 방법과 PBD 방법을 적용하여 교량의 자산가치를 평가하고 비교·분석하였다. Table 11은 일반국도 교량 상태등급 현황이며 PBD 방법 적용시 결함도 추정에 활용된다. Table 12는 방법별로 개별 교량의 자산가치를 평가하는 예시이다. Table 13은 방법별 자산가치 평가 결과로 일반국도 교량의 초기 자산가치의 총액은 약 33.2조로 추정되었다.

현재 일반국도 교량의 평균 공용년수는 15.4년으로 SLD 방법으로 평가한 현재 자산가치는 약 11.4조로 평가되었다. SLBD 방법과 PBD 방법은 각각 약 22.5조, 약 25.6조로 평가되었고 SLD 방법보다 약 2.0~2.2배 높게 분석되었다.

방법별 연평균 감가상각율을 살펴보면 SLD 방법은

Table 11 Number of bridge by condition rating

	Total	A	B	C	D	E
Number	8,195	3,915	3,984	385	1	0
%	100.0	47.8	47.5	4.7	0.0	0.0

*Source: BMS(KICT)

Table 13 Result of total asset valuation(Unit: One million KRW)

	RC	SLD	SLBD	PBD
Asset valuation	33,198,231.4 (100.0%)	11,398,804.8 (34.3%)	22,465,635.0 (67.7%)	25,561,729.7 (77.0%)
Annual average depreciation cost		1,410,005.6	694,193.5	493,935.5

1,410,006백만원으로 가장 높았고 PBD 방법은 493,935백만원으로 가장 낮게 분석되었다.

방법별로 결과의 차이가 있는 것은 SLD 방법은 교량의 성능은 고려하지 않고 회계지침상의 기준내용연수를 기반으로 매년 같은 감가액을 상각한 반면에 PDB 방법은 교량의 신뢰도, 결함도 지수 등 현재의 교량 성능을 고려하여 자산가치를 평가하였기 때문에 SLD 방법보다 높게 분석되었다. SLBD 방법은 SLD 방법과 같이 매년 같은 감가액을 상각하는 방식이지만 교량의 수명데이터를 바탕으로 추정된 내용연수가 회계지침상 기준내용연수보다 길기 때문에 높게 분석되었다.

또한 Table 11과 같이 일반국도 교량은 대부분 상태등급이 A~B등급으로 매우 양호한 상태로 유지되고 있다. SLBD 방법과 PBD 방법을 통해 추정된 현재 자산은 초기 자산 대비 약 67.7%~77.0% 수준으로 양호한 상태로 유지되고 있는 일반국도 교량의 현재 성능이 잘 반영된 것으로 판단된다. 하지만 SLD 방법은 초기 자산 대비 약 34.3%로 현재 교량 성능 수준에 비해 과소평가 되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 도로자산 중 일반국도 교량을 대상으로 자산가치 평가 방안에 대해 살펴보았다. 해외 선진국의 사회기반시설물에 대한 자산가치 평가 방법은 대체적으로 취득원가, 공정가액을 중심으로 사회기반시설에 대한 자산가치를 평가하고 있다. 감가상각 방법으로는 대부분의 국가에서 SLD 방법을 적용하고 있으며 국내도 이와 동일한 것으로 나타났다. SLD 방법은 매년 동일한 감가상각액을 일정하게 감액해주는 방식으로 기존 연구에서는 이러한 한계점을 개선하기 위해 현재 자산의 성능이나 상태를 고려할 수 있는 자산가치 평가 방법에 대한 필요성을 제기하였다.

본 연구에서는 교량의 성능을 고려할 수 있는 자산가치 평가 방법을 개발하고 적용하기 위해 교량의 사용수명을 정의하고 BMS에서 수집한 데이터를 수명데이터로 가공하였다. 수명데이터를 바탕으로 와이بل 분포를 활용하여 교량의 평균수명, 신뢰도, 고장을 등과 같은 성능지표를 추정하고 자산가치 평가에 활용하였다. 국내 교량 자산가치 평가시 감가상각에 적용되는 기준내용연수는 20년으로 미국, 호주, 일본 등에서 교량의 수명을 60~100년으로 설정하고 있는 것에 비해 짧은 실정이다.

제안한 SLBD 방법은 공용중인 교량의 점검이력을 바탕으로 추정된 사용수명 45년을 적용하여 교량의 가치를 평가하였고 SLD 방법보다 합리적인 결과를 도출할 수 있었다.

또한 교량 구조물은 주기적으로 점검 및 진단을 통해 결함이 발생한 부위를 조치하기 때문에 유지관리 업무의 효과를 반영하기 용이한 자산가치 평가 방법이 적합하다고 할 수 있다. PBD 방법은 공용연수에 따른 교량의 성능이나 상태를 반영할 수 있어 교량의 자산가치 평가에 가장 적합한 방법으로 판단된다. 마지막으로 제안한 자산가치 평가 방법을 교량 관리자가 활용한다면 교량의 성능에 따른 가치를 정량적인 지표로 확인 가능하여 유지관리 투입비용 대비 자산의 가치 향상 효과 등을 알 수 있어 중장기 유지보수 계획 수립시 의사결정 지원에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 국내 도로시설물의 자산관리체계의 도입 시 성능을 기반으로 하는 자산가치 평가 방법을 적용하기 위해서는 시설물의 기본제원, 점검진단, 보수보강 등의 다양한 정보를 관리할 수 있는 시스템의 구축 및 운영이 필수적이다.

또한 교량의 열화는 상부구조 형식, 재료, 교통하중 및 환경하중 등의 상호 작용을 포함한 다양한 이유로 발생하기 때문에 본 연구에서 개발한 신뢰도, 고장률 등의 성능지표를 모든 교량 시설물에 동일하게 적용하는데 다소 한계가 있다. 따라서 상부구조 형식별, 지역별 등 교량의 구조, 재료, 환경 등의 특성을 고려한 성능지표 개발에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 “기반시설 첨단관리 (Total care) 기술 개발(RS-2022-00142566)” 연구과제 지원을 받아 진행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. AASHTO (2020), AASHTO Transportation Asset Management Guide, American Association for Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
2. Bae, D. S., and Jeon, Y. R. (1999), Reliability Analysis, Arche (in Korean).
3. David Edgerton FCPA (2013), Valuation and Depreciation A guide for the not-for-profit and public sector under accrual based accounting standards, CPA AUSTRALIA.

4. Dojutrek, M. S., Makwana, P. A., and Labi, S. (2012), A Methodology for Highway Asset Valuation in Indiana, Publication FHWA/IN/JTRP-2012/31. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
5. Dojuerek, M., Volovski, M., and Labi, S. (2014), Elemental Decomposition and Multicriteria Method for Valuing Transportation Infrastructure, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2460, 137-145.
6. Do, M. S., Park, S. H., and Choi, S. H. (2017), Evaluation of Road Asset Value using Alternative Depreciation methods: Focusing on National Highway No.1, *International Journal of Highway Engineering*, 19(3), 19-30 (in Korean).
7. FHWA (2023), LTBP-InfoBridges, Available at: <https://infobridge.fhwa.dot.gov>(Accessed: July 1, 2023), U.S. Department of Transportation., Washington D.C.
8. GASB (1999), Statement No. 34 of the Governmental Accounting Standards Board, Governmental Accounting Standards Board (GASB).
9. Jeong, Y. S., Kim, W. S., Lee, I. K., and Lee J. K. (2016), Definition, End-of-life Criterion and Prediction of Service Life for Bridge Maintenance, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(4), 68-76.
10. KICT (2022), Operation and Service of Bridge Management System, Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(in Korean).
11. KICT (2023), Bridge Management System, Available at: <https://nbms.kict.re.kr/>(Accessed: July 1, 2023), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).
12. KICT (2023), Bridge and Tunnel Information System, Available at: <https://bti.kict.re.kr/>(Accessed: July 1, 2023), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).
13. KICT (2023), Construction Cost Management Center, Available at: <https://cost.kict.re.kr/>(Accessed: July 1, 2023), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).
14. Lee, M. J., Park, K. H., Park, C. W., Sun, J. W., and Lee, D. Y. (2010), A Study on Asset Valuation Method for Bridge Asset management, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 11(6), 35-44 (in Korean).
15. Lee, Y. J., and Lee, M. J. (2016), A Study on Estimating of Probability Distribution and Mean Life of Bridge Member for Effective Maintenance of the Bdrige, *Journal of the Korea Institute of Construction Engineering and Management*, 17(4), 57-65 (in Korean).
16. Michael Barker (2020), Long-Term Analysis for Short-Span Bridges, Modern Steel Construction, The American Institute of Steel Construction(AISC), Chicago.
17. MOLIT (2021), Special Act on Safety Control for Infrastructure. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
18. MOLIT (2022), Guideline and Commentary of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures-Bridge. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
19. MOLIT (2023), Yearbook of Road Statistics, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
20. MOSF (2011), Accounting Guidelines of Social Infrastructure, Ministry of Strategy and Finance (in Korean).
21. MOSF (2016), Accounting Guidelines of Tangible Assets and Social Infrastructure, Ministry of Strategy and Finance (in Korean).
22. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2022), A Guide to Computation and Use of System-Level Valuation of Transportation Assets, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D. C.
23. PPS (2023), Construction Cost Information System, Available at: <http://pcae.g2b.go.kr/>(Accessed: July 1, 2023), Public Procurement Service (in Korean).
24. Roads Liaison Group, TAG Asset Management Working Group, Great Britain: Department of Transport (2005), “Guidance Document for Highway Infrastructure Asset Valuation”, The Stationery Office, United Kingdom.
25. Seo, S. K. (2009), Minitab Reliability Analysis, Eretec (in Korean).
26. Thompson, P. D., Ford, K. M., Arman, M. H. R., Labi, S., Sinha, K. C., and Shirole, A. M. (2012), Estimating Life Expectancies of Highway Assets - Volume 1: Guidebook, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D. C.
27. 内閣府政策統括官 (2017), 日本の社会資本 2017. Japan

Received : 09/05/2023
 Revised : 09/25/2023
 Accepted : 10/04/2023

요 지 : 사회기반시설의 자산가치 평가는 자산의 효율적인 관리를 위한 합리적인 의사결정에 필수적이며, 자산을 올바르게 인식하기 위한 지표가 될 수 있다. 국내 자산가치 평가는 일반적으로 정액법 기반의 상각후대체원가를 적용하고 있어 내용연수 기간 동안 일정하게 감가상각 되어 실질적인 가치를 평가하지 못하고 있다. 교량의 성능을 합리적으로 고려한 자산가치 평가를 위해 와이블 분포를 활용하여 교량의 평균수명, 신뢰도, 고장율 등 교량의 성능지표를 추정하였다. 추정된 성능지표와 결함도지수를 활용하여 새로운 자산가치 평가 방법을 제안하고 기존 방법과 비교 분석하였다. 제안한 가치평가 방법은 교량의 성능을 고려할 수 있어 기존 방법보다 객관적이고 현실성 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 자산가치평가, 와이블 분포, 교량수명, 신뢰도, 교량관리시스템(BMS)
