

교량의 위험성을 고려한 성능기반 자산가치 평가방법에 관한 연구

이용준¹, 박경훈², 선종완^{3*}

A Study on the Performance-Based Bridge Asset Valuation Methods Considering Hazard

Yong-Jun Lee¹, Kyung-Hoon Park², Jong-Wan Sun^{3*}

Abstract: The valuation of infrastructure assets is typically conducted using the straight-line method, which employs the depreciated replacement cost as a basis. However, this approach has the limitation of failing to accurately reflect the actual value of the facility. In light of these considerations, the performance-based depreciation (PBD) method has been proposed as a means of evaluating the asset value of bridges on the basis of their performance, although it is not designed to take account of the environmental characteristics of individual bridges. This study proposes a hazard-performance based depreciation (HPBD) method that considers the risk level of individual bridges in the PBD method proposed in previous studies. The applicability of the proposed method was evaluated on more than 8,000 bridges. The risk factors for deterioration of bridges were selected, the hazard level of individual bridges was evaluated, and weights based on the hazard level were applied to the PBD method. The evaluation resulted in a present value comparable to that of the PBD method and a relatively high future value. It is postulated that the HPBD method, which considers the risk characteristics of individual bridges, can be used for a more reasonable evaluation and decision-making process.

Keywords: Asset valuation, Bridge performance, Hazard, Risk factor, Bridge management system (BMS)

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

국내 도로 교량은 국가 경제발전 및 현대화와 더불어 지속적으로 건설되어 2023년 말 기준 39,457개소로 최근 10년간 연평균 3.1%씩 증가하였다. 경제성장과 함께 집중적으로 건설된 교량들로 인해 2033년에는 준공 후 30년 이상 되는 교량이 전체의 절반 이상을 차지할 것으로 전망된다(MOLIT, 2024). 이러한 교량 시설물의 노후화에 따른 파손·붕괴를 방지하기 위해 유지관리의 중요성이 강조되고 있다. 도로시설물의 유지보수 예산 부족으로 인해 파손·붕괴 사고를 먼저 경험한 미국, 영국 등은 도로시설물의 상태뿐만 아니라 자산가치를 동시에 고려하는 자산관리 개념을 도입하였다. 이를 통해 수리 또는 교체가 필요한 시설물에 대한 유지보수 예산의 배정 기회를 향상시키고, 유지보수 예산에 대한 성과 지표로 활용

하고 있다(Dojutrek et al., 2012; Lee et al., 2023). 이처럼 사회 기반시설의 자산가치 평가는 자산의 유지관리를 위한 합리적인 의사결정에 필수적이다.

이에 본 연구에서는 한정된 예산을 고려하여 노후화된 시설물의 유지보수 투자우선순위 의사결정을 지원하기 위해 제안되었던 교량 성능기반 자산가치 평가방법(Lee et al., 2023)에 개별 교량의 위험성까지 고려할 수 있는 보다 합리적인 자산가치 평가 방법을 제안하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

Fig. 1은 교량의 잠재된 위험성을 고려한 성능에 기초한 자산가치 평가 방법을 개발하고 적용하기 위한 연구 방법 및 절차이다. 국내 교량의 성능에 위험성을 추가적으로 고려한 자산가치 평가 방법을 개발하기 위해 기존 연구(Lee et al., 2023)에서 와이블 분포(Weibull Distribution)를 활용하여 교량의 성능지표를 추정된 결과를 활용하였다.

위험성을 고려하기 위해, 국내 교량의 성능 또는 상태를 열화시키는 주요 위험요인을 선정하고 개별 교량의 위험성을 평가한다. 그 후 기존 연구에서 추정했던 와이블 분포 모수에 위험성 가중치를 적용하여 개별 교량의 위험성을 고려한 신뢰도, 평균수명 등을 추정하였다. 다음으로 공사비정보광장

¹정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, 교신저자

*Corresponding author: jwsun@kict.re.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2024년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2024년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

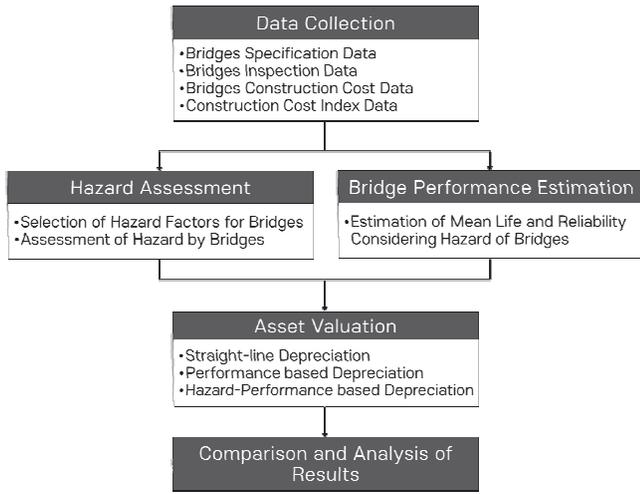


Fig. 1 Research Methodology and Process

(PPS, 2024)에서 2019년~2023년에 공사 발주된 교량 건설비용을 수집하여 단위면적당 공사비 단가를 산정하고 이를 공용 중인 교량 면적에 곱하는 방식으로 제조달원가를 산정한다. 마지막으로 교량의 위험성을 고려한 신뢰도와 제조달원가, 결함도지수를 활용하여 자산가치를 평가하였다.

2. 사회기반시설 자산가치 평가 현황

2.1 일반적인 자산가치 평가방법

국가회계기준에서 사회기반시설의 자산가치 평가는 ‘일반 유형자산과 사회기반시설 회계처리지침(MOSF, 2016)(이하 회계처리지침)’에서 규정하고 있다. 회계처리지침에 사회기반시설의 자산가치는 취득원가로 평가하거나 정액법(Straight-Line Depreciation method; SLD)에 의한상각후대체원가법(Depreciated Replacement Cost method; DRC) 등 대체적인 평가방법을 사용하도록 하고 있다. SLD 방법은 식 (1)과 같이 취득원가 또는 제조달원가에 잔존수명 등을 반영하여 재평가하는 방법이다.

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

여기서 RC 는 제조달원가(Replacement Cost), 잔존내용연수($t_{Remaining\ Useful\ Life}$)는 자산이 사용 가능할 것으로 기대되는 잔존기간을 의미하며, 기준내용연수($t_{Standard\ Useful\ Life}$)는 내용연수를 합리적으로 정하기 어려운 경우 회계처리지침에 제시된 값으로 교량은 20년($\pm 25\%$)이다(MOSF, 2016).

제조달원가는 동일한 용역잠재력(같은 규모)을 가진 자산을 현재 재취득하는데 소요되는 현금등가액으로, 특정 구축물 i 의 제조달원가 산정식은 식 (2)와 같다. 여기서 단위면적

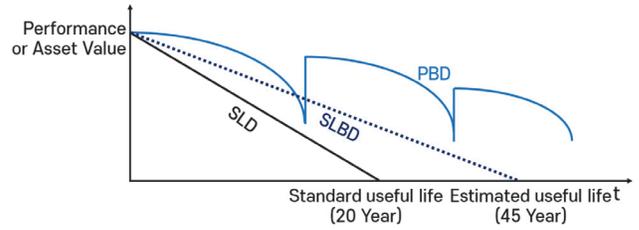


Fig. 2 Concept of SLD, SLBD, PBD

당 제조달단가(\overline{UC})는 최근 5년 이내 유사 구축물(i)의 실제 건설비용(Construction Cost)을 건설면적 m^2 (Quantity)당 단가로 환산하여 산정하거나 실제 건설원가 자료가 없을 경우에는 평균 설계단가나 건설예정원가 등을 적용하도록 규정하고 있으며 식 (3)과 같다(MOSF, 2016).

$$RC_i = \overline{UC} \times Quantity_i \quad (2)$$

$$\overline{UC} = \frac{\sum_{i=1}^n Construction\ Cost_i}{\sum_{i=1}^n Quantity_i} \quad (3)$$

2.2 성능기반 자산가치 평가방법

국내외 사회기반시설의 자산가치 평가 방법은 원칙적으로 SLD 방법에 의해 매년 동일한 금액을 감액해 주는 방식이다. Lee et al. (2023)은 Fig. 2와 같이 SLD 방법은 현재 시설물의 성능과 서비스수준을 고려하지 않아 자산가치가 과소평가 된다는 한계점을 강조하고 SLBD (Service Life-based Depreciation) 방법, PBD (Performance based Depreciation) 방법을 제안하였다.

SLBD 방법은 기존 회계처리지침 상의 기준내용연수(20년 $\pm 25\%$)가 합리적이지 못해 와이블 분포를 활용하여 추정된 교량의 평균수명 45년을 기준내용연수로 선정하고 SLD 방법으로 가치를 평가하는 방식이다(Lee et al., 2023).

PBD 방법은 식 (4)와 같이 와이블 분포로부터 추정된 신뢰도와 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(MOLIT, 2023)(이하 세부지침)’의 교량 안전등급별 결함도 지수를 곱하는 방식으로 감가상각한다. PBD 방법은 다른 방법들과 달리 교량의 신뢰도(RI)와 결함도지수(DI)에 따라 감가상각률이 다르게 적용하기 때문에 교량의 현재 성능을 반영할 수 있다는 특징이 있다(Lee et al., 2023).

$$PBD = RC \times RI \times (1 - DI) \quad (4)$$

그러나 PBD 방법은 개별 교량의 환경이나 물리적 요인에 의한 위험 특성을 고려하지 못한다는 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 개별 교량의 위험 특성을 고려할 수 있는 방법을 제안하였다.

3. 위험성을 고려한 성능지표 추정

3.1 위험요인 선정

교량의 열화 및 손상은 자연재해, 물리적 요인, 환경적 요인, 시공 불량 등 매우 다양한 요인으로 발생한다. 지진, 홍수와 같은 자연재해의 경우 발생확률은 낮지만 발생할 경우 교량에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 중차량의 통행, 차량 하부 충돌과 같은 물리적 요인과 동해 환경, 염해, 제설제 등과 같은 환경적 요인은 교량의 내구성에 심각한 영향을 미치고 교량의 구조적 안전성과 수명을 단축시킬 수 있다(EX, 2020). 이에 본 연구에서는 수집 가능한 정보를 고려하여 자연재해 요인인 지진, 물리적 요인인 중차량교통량, 환경적 요인인 동해환경, 염해환경을 주요 위험요인으로 선정하였다. 선정된 위험요인의 평가 기준은 관련 법, 지침 등과 교량관리시스템(Bridge Management System; BMS)을 활용하여 선정하였다.

자연재해 위험요인인 지진(H_e)은 「지진·화산재해대책법(MOIS, 2022)」 제14조 및 동법 시행령 제10조에 따라 제정된 「내진설계기준 공통적용사항」에서 제시하고 있는 지진구역(Table 1)과 교량 내진성능 확보 여부를 고려하였다.

물리적 위험요인 중차량 교통량(H_{hv})은 일반국도 교량 개량사업 평가 기준(KICT, 2022)을 활용하여 평가 기준을 선정하고 교량의 설계하중 등급도 동시에 고려하였다.

환경적 위험요인 동해환경(H_{ft})과 염해환경(H_c)에 대한 평가는 세부지침(성능평가 편)에서 교량의 내구성을 평가하는 기준을 준용하였다. 동해환경의 경우 일 최저기온 -2.2°C 미만이고 일 최고기온 0°C 초과이면서 강수량 0 초과인 연평균

Table 1 Earthquake zone

| Earthquake zone | Administrative Area |
|-----------------|---|
| I | Administrative areas other than zone II |
| II | North Gangwon, Jeju |

Table 2 Selection of hazard factor

| | Level 3 | Level 2 | Level 1 |
|----------------------|--|---|------------------------------|
| Score | 5 | 3 | 1 |
| Earthquake | Earthquake zone I and Unverified seismic performance | Earthquake zone II and Unverified seismic performance | Ensuring seismic performance |
| Heavy vehicles | More than 1,000 and DB-18 or less | 1,000 or less and DB-18 or less | DB-24 |
| Freezing and Thawing | $50 \leq \text{ftd}^*$ | $3 \leq \text{ftd} < 50$ | $\text{ftd} < 3$ |
| Chloride | $14 < \text{sd}^*$ | $7 < \text{sd} < 14$ | $\text{sd} < 7$ |

* ftd: Freeze-thaw days, sd: snowfall days

일수를 평가항목으로 고려하였다. 염해환경은 해안으로부터 날아들어 오는 대기중의 비례염분에 의한 염해환경과 겨울철 강설에 따라 살포되는 제설제에 포함되어 있는 염화물에 의한 염해환경으로 구분된다. 본 연구에서는 제설제 염해환경을 평가하는 기준을 활용하였으며 강설횟수를 평가항목으로 고려하였다. 여기서 강설일수는 최심신적설(하루동안 내린 눈이 최대로 깊었던 적설량)이 발생한 일수의 최근 10년간 평균 값으로 취한다.

Table 2는 개별 위험요인의 평가를 위한 평가 기준과 등급에 따른 평가 점수를 요약한 것으로 1점~5점 3단계로 정의하였다.

3.2 위험성 평가

본 연구에서는 공용 중인 교량의 위험성 평가를 위해 필요한 정보를 관련 시스템에서 수집하였다. 교량과 관련된 기본 정보와 위험요인 평가에 필요한 교량의 내진성능 확보여부 및 설계하중 등급은 BMS에서 수집하였다. 중차량 교통량은 교통량정보제공시스템(Traffic Monitoring System; TMS)에서 수집하였고, 동해환경 및 염해환경 평가에 필요한 지역별 일 최고기온, 일 최저기온, 강수량, 강설횟수 데이터는 기상자료개방포털(Weather Data Service System; WDSS)에서 수집하였다. 위험성 평가 대상교량은 약 8,200여개소로 Fig. 3과 같이 평균 공용년수는 약 16.2년이며 30년 이상된 교량은 583개소로 약 7.1%를 차지하는 것으로 조사되었다.

개별 교량의 위험성 평가는 각 위험요인별 평가 점수의 평균값으로 산정하며 식 (5)와 같다.

$$H_{Br} = \frac{H_e + H_{hv} + H_{ft} + H_c}{4} \quad (5)$$

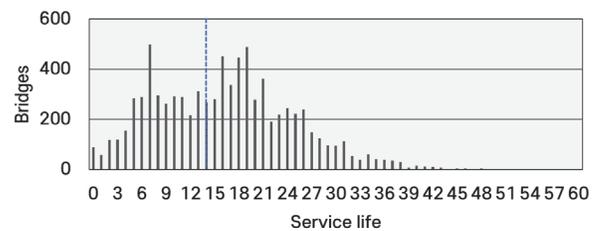


Fig. 3 Service Life status of the analyzed bridge

Table 3 Hazard weight according to hazard score

| | Hazard score | | | | |
|----------|--------------|---------|---------|---------|-----------|
| H_{Br} | 1.0~1.5 | 1.5~2.0 | 2.5~3.5 | 4.0~4.5 | 4.5~5.0 |
| Level | Very low | Low | Medium | High | Very high |
| H_w | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 0.9 | 0.8 |

위험성 평가 점수에 따른 가중치(H_w)는 Table 3과 같이 위험성이 보통 수준(Medium)일 때 1.0으로 하며 위험성 수준에 따라 0.8(Very high)~1.2(Very low)를 적용하였다.

Fig. 4는 분석 대상교량들의 위험성 평가 결과로 대부분이 낮은 수준이거나 중간 수준의 위험성에 분포되어 있다.

Table 4에서 분석 대상교량 전체의 약 58.5%가 내진성능을 확보하여 지진 위험요인에 대해 적절히 대응하고 있는 것으로 나타났다. 지진구역 I, II의 일부 교량은 내진성능 확보 여부를 판단하기 위한 내진성능평가를 순차적으로 진행하고 그 결과에 따라 지속적으로 내진성능을 개선하고 있다.

Table 5에서 분석 대상교량 대부분이 설계하중 DB-24로 설계된 1등급로 중차량 교통량에 대한 위험요인에 대해 안전성이 높은 것으로 분석되었다. DB-24 이외의 소수 교량은 차량 통행이 극히 적은 지역에 일부 존재하며, 지속적인 개축이 이루어지고 있다.

또한 Fig. 5와 같이 분석 대상교량의 동해환경 및 염해환경

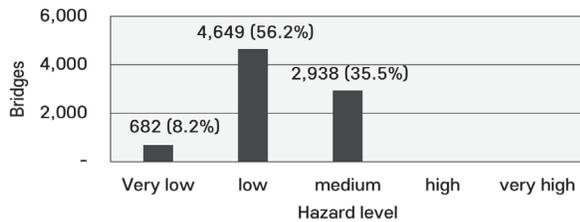


Fig. 4 Result of hazard evaluation

Table 4 Number of bridges based on seismic performance

| | Ensuring | Unverified | |
|---------------------|------------------|------------------|---------------|
| | | Zone I | Zone II |
| Seismic Performance | 4,840 (58.5%) | 3,157 (38.2%) | 272 (3.3%) |

Table 5 Number of bridges by design load

| | DB-24 | DB-18 | DB-13.5 |
|-------------|------------------|--------------|-------------|
| Design Load | 8,225 (99.5%) | 40 (0.5%) | 4 (0.0%) |

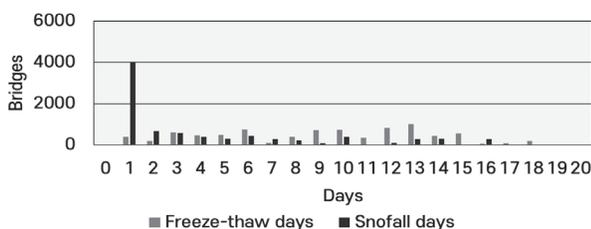


Fig. 5 Number of bridges affected by Freeze-thaw conditions and Snowfall days

을 살펴보면 동해환경 일수는 평균 약 8.6일이며 대부분 교량이 위험성 평가 기준이 매우 낮은 수준에서 보통 수준에 해당하는 50일 미만에 분포되어 있다. 염해환경 일수를 평가하는 최심신적설이 발생한 강설일수는 평균 약 3.0일이며 대부분 교량이 위험성 평가 기준이 매우 낮은 수준에서 보통 수준에 해당하는 14일 미만에 분포되어 있다.

3.3 위험성을 고려한 교량 성능지표 추정

Lee et al.(2023)에서는 와이블 분포를 활용하여 교량의 신뢰도 지수, 평균 수명 등 교량과 관련된 성능지표를 추정하였다. 와이블 분포는 형상모수(β) 값에 따라 고장율 함수의 형태가 달라지며 β 가 1보다 작으면 고장율이 감소(신뢰도 증가)하고 1보다 크면 고장율이 증가(신뢰도 감소)한다. β 값이 1인 경우 고장율이 일정하며 지수분포로 표현이 가능하다. 척도모수(η)는 수명데이터의 63.2 백분위수를 의미하여 특정수명을 정의할 수 있다(Seo, 2009). η 값이 크면 대상의 수명이 길어지고 작으면 수명이 짧아지는 것을 의미하므로 척도모수에 위험성 가중치를 곱하는 방식으로 개별 교량의 열화 특성을 수명에 반영할 수 있다.

국외의 경우 이러한 와이블 분포의 특징을 응용하여 자산가치 평가에 활용하고 있다. 일본(CAO, 2022)에서는 와이블 분포 신뢰도 함수와 연령-효율성 프로파일(Age-efficiency Profile)을 합성하여 도로시설물의 성능지표를 추정하고 자산가치 평가에 활용하였다. Chae et al. (2023)은 미국은 고속도로 표지판 각각의 리스크 평가 점수를 η 모수로 활용하여 개별 도로 표지판의 신뢰도를 추정하였다.

이에 본 연구에서는 Lee et al. (2023)에서 중대한결함이 발생한 교량과 발생하지 않은 교량의 공용년수 데이터를 바탕으로 와이블 분포를 활용하여 추정했던 β 3.94312와 η 48.1341에 식 (6)과 같이 위험성 가중치(H_w)를 고려하여 개별 교량의 위험성을 고려한 신뢰도, 평균수명을 추정하였다. 여기서 평균수명은 대상교량에 중대한결함이 발생하기까지의 평균 공용년수로 정의할 수 있으며 중대한결함은 전체 안전등급 D 및 E, 주요부재등급 d 또는 e에 해당된다. 기존 신뢰도 함수에 위험성 가중치를 적용한 이유는 개별 교량들의 위험성에 따라 중대한결함 발생확률이 낮아지거나 더 높아질 것으로 판단되므로 위험성 가중치를 척도모수에 적용한 것이다.

$$R(t) = 1 - \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \frac{\beta}{H_w \eta} \left(\frac{t}{H_w \eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{H_w \eta} \right)^\beta \right] dt \quad (6)$$

Table 6과 Fig. 6은 위의 식을 활용하여 대상교량의 위험성을 고려한 공용년수에 따른 신뢰도, 평균수명 등을 산정한 결과이다. 일반적으로 대상교량의 위험성이 보통 수준일 때 위

Table 6 Mean life to failure of bridge

| | | Very low | Low | Medium | High | Very high |
|-----------------------------|---------|----------|------|--------|------|-----------|
| Mean life to failure (Year) | | 52.6 | 48.3 | 43.6 | 39.5 | 35.1 |
| Reliability (%) | 10 year | 99.9 | 99.9 | 99.8 | 99.7 | 99.5 |
| | 20 year | 98.5 | 97.9 | 96.9 | 95.4 | 92.7 |
| | 30 year | 92.7 | 89.9 | 85.6 | 79.1 | 68.8 |
| | 40 year | 79.1 | 71.8 | 61.8 | 48.2 | 31.3 |
| | 50 year | 56.8 | 45.0 | 31.3 | 17.2 | 6.1 |

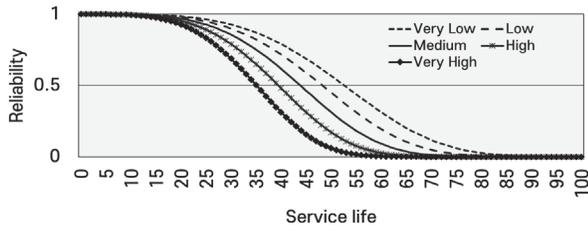


Fig. 6 Reliability probability according to bridges hazard level

험성 가중치는 1.0이므로 평균수명은 기존 연구와 동일한 약 43.6년이다. 위험성이 매우 낮은 수준일 때에는 위험성 가중치 1.2를 척도모수에 곱하게 되므로 보통 수준일 때 보다 증가한 약 52.6년이며, 위험성이 매우 높은 수준일 때에는 위험성 가중치 0.8을 척도모수에 곱하게 되므로 평균수명은 보통 수준일 때 보다 감소한 약 35.1년으로 분석되었다.

Fig. 6은 공용년수에 따른 교량의 신뢰도 산정값으로 위험성 수준이 높고 노후된 교량일수록 신뢰도가 급격하게 감소하는 것으로 분석되었다. 교량의 노후화 시점 기준인 30년에는 위험성이 매우 낮은 수준일 때 신뢰도가 약 92.7%로 매우 양호한 편이나 위험성이 매우 높은 수준일 때는 68.8%로 감소한다. 또한 공용년수 30년 이후부터 신뢰도가 급격하게 감소하여 공용년수 50년에 도달하면 위험성이 매우 낮은 수준일 때 약 56.8%, 매우 높은 수준일 때 약 6.1%로 급격하게 감소하는 것으로 분석되었다.

4. 위험성을 고려한 성능 기반 자산가치 평가

4.1 단위면적당 재조달단가 산정

공용중인 교량의 재조달원가 산정을 위해 공사비정보광장 시스템을 활용하여 단위면적당 평균공사비를 조사하였다. 공사비정보광장은 건설사업의 효율적인 공사원가관리를 지원하기 위한 시스템으로 유사시설물의 건설 비용 정보를 검색할 수 있다(Lee et al., 2023). 해당 시스템에는 Table 7과 같이 2019년부터 2023년까지 공사 발주된 교량 현황 총 166개소가 입력되어 있으며, 그 중 PSC 형식 교량이 54개소로 가장 높은

Table 7 Status of Collected Construction Cost information of bridges (2019~2023)

| | | Overview |
|----------------------|-----|--------------|
| Sample Survey Period | | 2019~2023 |
| Total | | 166 (100.0%) |
| Superstructure | PSC | 54 (32.5%) |
| | RC | 41 (24.7%) |
| | RA | 37 (22.3%) |
| | ST | 34 (20.5%) |

Source: Construction Cost Information System (PPS)

Table 8 Construction cost of bridges (2019~2023)

| Project delivery year | Super structure | Length (m) | Width (m) | Construction cost | |
|-----------------------|-----------------|------------|-----------|-------------------------------------|-----------------|
| | | | | Per unit area (KRW/m ²) | Total (KRW) |
| 2019 | RA | 50.0 | 19.8 | 1,420,401 | 1,400,870,347 |
| 2020 | RC | 7.0 | 10.0 | 1,642,568 | 114,979,771 |
| | | | | ∴ | |
| 2023 | PSC | 45.3 | 20.9 | 3,288,792 | 3,115,310,500 |
| Average | | | | 3,555,832 | 596,007,947,889 |

Source: Construction Cost Information System (PPS)

Table 9 Construction cost index

| Construction cost index | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2020=100* | 99.5 | 100.0 | 111.8 | 128.6 | 133.5 |
| 2023=100 | 134.2 | 133.5 | 119.5 | 103.8 | 100.0 |

Source: Construction Cost Management Center (KICT, 2024a)

Table 10 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 | 2019 | 134.2 | 1,420,401 | 1,906,131 |
| 2 | 2020 | 133.5 | 1,642,568 | 2,192,810 |
| | | | ∴ | |
| 119 | 2023 | 100.0 | 3,264,550 | 3,264,550 |
| Total | | | 596,007,947,889 | 645,750,274,345 |
| Average | | | 3,555,832 | 3,840,645 |

비율을 차지하는 것으로 조사되었다.

수집된 공사 정보를 활용하여 단위면적당 평균 공사비를 산정한 결과를 Table 8과 같이 정리할 수 있으며, 3,555,832원/m²이다.

단위면적당 건설비를 현재가치로 환산하기 위하여 도로시설 건설공사비지수를 활용하였다. 건설공사비지수는 건설공사에 투입되는 직접공사비를 대상으로 생산자물가지수, 공사 부문 시중노임 자료 등을 이용하여 건설공사 직접공사비의 가격변동을 측정하는 지수이다(KICT, 2024a). Table 9는 도로시설 건설공사비지수이며 2023년 이전 교량 건설비용을 현재가치로 환산하기 위해 공사비지수를 재산정한 값을 제시한 것이다.

수집된 공사 발주 정보(Table 8)에 재산정된 건설공사비지수(Table 9)를 적용하여 현재가치로 환산한 결과 단위면적당 제조달원가는 Table 10과 같이 3,840,645원/m²로 분석되었다.

4.2 위험성을 고려한 성능 기반 자산가치 평가 방법

대상교량의 자산가치 평가를 위해 회계처리지침 상의 자산가치 평가 방법인 SLD 방법, 기존 연구에서 제안했던 PBD 방법과 본 연구에선 제안하는 위험성-성능 기반 자산가치 평가 방법(Hazard-Performance based Depreciation; HPBD)을 비교·분석하였다.

HPBD 방법과 PBD 방법은 와이블 분포를 활용하여 추정된 공용년수에 따른 교량의 신뢰도와 현재 교량 상태등급에 따른 결함도 지수를 적용하여 교량의 자산가치를 감가상각하는 방식은 동일하지만 HPBD 방법은 개별 교량의 물리적 및

환경적 열화 인자들의 위험성을 고려한 신뢰도(RI_{H_w})를 적용하여 교량의 자산가치를 식 (7)과 같이 감가상각 한다. PBD 방법이 전체 교량군의 평균적인 특성만을 고려한다면, HPBD 방법은 개별 교량의 위험 인자를 고려한 신뢰도를 추정하여 보다 합리적인 의사결정을 지원할 수 있다는 장점이 있다.

$$HPBD = RC \times RI_{H_w} \times (1 - DI) \quad (7)$$

결함도지수(DI)는 시설물안전법에 따라 부재의 상태평가를 평가한 후 가중치를 적용하여 교량의 상태를 대표하는 인자를 도출하기 위해 사용되는 기준 값이며 Table 11과 같다.

PBD 방법과 HPBD 방법은 교량의 노후도가 높고(공용년수 증가) 결함도가 높을수록(상태등급 감소) 신뢰도는 감소하여 중대한결함 발생확률이 높아질 것으로 판단되어 신뢰도와 결함도 지수를 동시에 고려하였다. 즉 공용년수가 상이한 교량들이 동일한 안전등급이라고 해도 노후도가 높은 교량이 신규로 건설된 교량보다 안전성이 상대적으로 낮을 것으로 판단되므로 이 점을 가치평가 방법에 반영하였다(Lee et al., 2023).

4.3 자산가치 평가 결과 비교 및 분석

분석 대상교량 8,200여개소를 SLD 방법, PBD 방법, HPBD 방법을 적용하여 자산가치를 평가하고 그 결과를 비교·분석하였다. Table 12는 대상교량 안전등급 현황이며 PBD와 HPBD 방법의 결함도지수 추정에 활용하였다.

Table 13은 자산가치 평가 방법별 개별 교량의 가치를 평가한 예이다. Table 14는 자산가치 평가 방법별로 전체 교량의 가치를 평가한 결과이며, 분석 대상교량의 제조달비용은

Table 11 Criteria for grade and defect-rate

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

Source: MOLIT(2023)

Table 12 Number of bridges by condition rating

| | Total | A | B | C | D | E |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Number | 8,269 | 2,465 | 5,361 | 442 | 1 | 0 |
| Ratio (%) | 100.0 | 29.8% | 64.8% | 5.3% | 0.0% | 0.0% |

Source: BMS (KICT, 2024b)

Table 13 Examples of asset valuation for individual Bridges (Unit: One million KRW)

| Bridge No. | Open year | Service year | Defect-rate index | Hazard Level | Reliability | Replacement Cost (RC) | SLD | | |
|------------|-----------|--------------|-------------------|--------------|-------------|-----------------------|--------------------------------|----------|----------|
| | | | | | | | (Standard service life=20year) | PBD | HPBD |
| 1 | 2003 | 20 | B | Very Low | 0.9692 | 4,003.7 | 0.0 | 3,880.2 | 3,104.2 |
| 2 | 2015 | 8 | B | Low | 0.9987 | 4,535.8 | 2,721.5 | 4,532.0 | 3,624.0 |
| | | | | | ⋮ | | | | |
| 8,268 | 2011 | 12 | B | Low | 0.9937 | 15,936.3 | 6,374.5 | 15,869.8 | 12,668.6 |
| 8,269 | 2005 | 18 | A | Very Low | 0.9795 | 16,042.7 | 1,604.3 | 15,714.4 | 15,714.4 |

Table 14 Result of total asset valuation (Unit: One million KRW)

| | RC | SLD | PBD | HPBD |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Asset valuation | 52,932,529.3 (100.0%) | 16,934,401.9 (32.0%) | 45,664,440.9 (86.3%) | 45,913,633.3 (86.7%) |
| Annual average depreciation cost | | 2,220,147.6 | 448,251.9 | 432,883.2 |

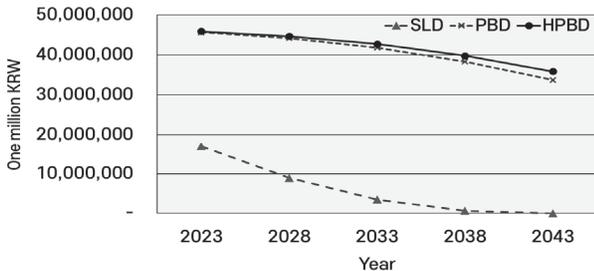


Fig. 7 Comparison of Asset Valuation Methods Results (2023~2043)

2023년 말 기준 약 52.9조로 추정되었다.

SLD 방법으로 평가한 현재 교량의 자산가치는 약 16.9조, PBD방법은 약 45.7조, HPBD방법은 약 45.9조로 평가되었다. 연평균 감가상각액은 SLD 방법 2,220,148백만원, PBD 방법 448,252백만원, HPBD 방법 432,883백만원으로 분석되었다.

방법별로 결과의 차이는 SLD 방법은 회계지침상의 기준내용연수 20년을 기반으로 매년 같은 금액을 감가하는 반면에 HPBD 방법과 PBD 방법은 교량의 신뢰도, 결함도지수 등 현재 교량의 성능을 고려하여 자산가치를 평가하였기 때문에 SLD 방법보다 약 2.7배 높게 분석되었다. PBD 방법은 기존 신뢰도 추정 방법이 전체 교량의 평균적인 특성만을 고려했다면 HPBD 방법은 개별 교량의 열화 특성을 고려할 수 있는 특징이 있다. 분석 대상교량의 위험성은 대부분 매우 낮은 수준(1.2)~보통 수준(1.0)이므로 위험성 가중치로 인해 PBD 방법보다 자산가치 평가 결과가 높게 분석되었다.

PBD 방법과 HPBD 방법을 통해 추정한 현재 자산은 초기 자산 대비 약 86.3%~86.7% 수준으로 Table 12와 같이 양호한 상태를 유지하고 있는 분석 대상교량의 현재 성능을 합리적으로 반영한 것으로 판단된다. 하지만 SLD 방법은 현재 가치가 초기 자산 대비 약 32.0%로 실제 교량 성능에 비해 상대적으로 낮게 평가되었다고 판단된다.

Fig. 7은 향후 20년간 분석 대상교량에 대한 자산가치 평가 결과를 나타내며 현재 안전등급이 2023년 기준으로 유지된다는 전제하에 분석한 결과이다. SLD 방법의 경우 교량의 안전등급이 유지되더라도 분석 대상교량들이 기준내용연수에 도달하거나 초과하여 2043년에는 모든 교량의 자산가치가 0원에 도달하게 된다. 반면 PBD 방법과 HPBD 방법은 안전등급은 유지되나 공용중인 교량의 노후화(열화)에 따른 신뢰도는

저하되므로 자산가치가 감가되는 것을 확인할 수 있다.

HPBD 방법은 PBD 방법에 개별 교량에 내재된 위험성을 반영하여 자산가치를 평가하므로 Table 4와 같은 내진성능이 확보되었는지 여부가 확인되지 못한 교량을 내진성능평가나 내진보강공사를 통해 성능을 확보하는 행위는 해당 교량의 잔존수명을 늘려 자산가치가 증가하는 형태로 자산가치 평가에 반영될 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 교량의 위험성을 고려한 성능 기반 자산가치 평가 방법을 개발하고 적용하기 위해 기존 연구(Lee et al., 2023)에서 추정된 신뢰도 함수에 위험성 가중치를 적용하는 방법을 제안하였으며, 8,200여 개 교량을 대상으로 자산가치를 평가하여 비교하였다.

본 연구에서 제안된 HPBD 방법은 기존 PBD 방법이 개별 교량의 환경 특성을 고려하지 못하는 한계를 해결하기 위하여 교량별 위험요인을 정의하고 위험성을 평가하여 신뢰도 산정에 고려하였다. 위험요인은 수집 가능한 데이터를 고려하여 지진, 중차량교통량, 동해환경, 염해환경 총 4가지를 선정하였다. 위험요인에 따른 개별 교량의 위험성 평가를 통해 위험성 가중치를 산정하고, 교량별 신뢰도 산정 시 가중치를 척도모수에 곱하는 형태로 교량별 위험성을 고려할 수 있도록 하였다. 교량별 위험 특성을 합리적으로 고려할 수 있도록 제안된 방법을 통해 개별 교량의 자산가치를 효과적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

분석 대상 교량의 자산가치 평가를 통해 기존 방법에 대한 한계점을 확인하고 성능 기반 자산가치 평가 방법에 대한 활용성을 검증하였다. 또한, 분석 대상 교량의 위험성 평가 결과, 대부분 교량의 위험성이 낮은 수준으로 평가됨으로 인해 개별 교량의 위험특성을 고려할 수 있는 HPBD 방법의 자산가치 평가 결과가 PBD 방법에 비해 상대적으로 높게 분석되었다.

HPBD 방법은 기존 PBD 방법보다 개별 교량의 위험성을 체계적으로 반영했다는 점에서 보다 합리적이라 판단되며, 향후 제안된 방법을 통해 유지보수 예산 투입 대비 교량 자산 가치의 향상 효과를 정량적으로 분석한다면 교량 유지관리 및 의사결정에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. CAO (2022), Measuring Infrastructure in Japan 2022, Cabinet Office, Japan.
2. Chae, M., Voghell, L., and Choi, J. (2023) Simplified Deterioration Modeling for Highway Sign Support Systems. Eng. Proc. 2023, 36, 44, USA.
3. 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.
4. EX (2020), A Study on Establishment of Maintenance Strategy to Extend the Service Life of Bridge Deck Slab, Korea Expressway Corporation Research Institute (in Korean).
5. KICT (2022), Operation and Service of Bridge Management System, Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).
6. KICT (2024a), Construction Cost Management Center, Available at: <https://cost.kict.re.kr/>(Accessed: August 1, 2024), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).
7. KICT (2024b), Bridge Management System, Available at: <https://nbms.kict.re.kr/>(Accessed: August 1, 2024), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).
8. Lee, Y. J., Park, K. H., and Sun, J. W. (2023), A Study on the Asset Valuation Method Based on the Performance Information of Bridge, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 27(5), 57-66 (in Korean).
9. MOIS (2022), Act on The Preparation for Earthquakes and Volcanic Eruptions, Ministry of the Interior and Safety (in Korean).
10. MOLIT (2021), Special Act on Safety Control for Infrastructure. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
11. MOLIT (2023), Guideline and Commentary of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures-Bridge. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
12. MOLIT (2024), Yearbook of Road Statistics, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
13. MOSF (2016), Accounting Guidelines of Tangible Assets and Social Infrastructure, Ministry of Strategy and Finance (in Korean).
14. PPS (2024), Construction Cost Information System, Available at: <http://pcae.g2b.go.kr/>(Accessed: August 1, 2024), Public Procurement Service (in Korean).
15. Seo, S. K. (2009), Minitab Reliability Analysis, Eretec (in Korean).

Received : 08/22/2024

Revised : 09/23/2024

Accepted : 09/23/2024

요 지 : 사회기반시설의 자산가치 평가는 일반적으로 정액법을 기반으로 상각후대체원가를 적용하고 있으나 시설물의 실제 가치를 정확히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이에 교량의 성능을 합리적으로 고려하여 자산가치를 평가할 수 있는 성능기반 감가상각(PBD) 방법이 제안되었으나 개별 교량들의 환경 특성을 고려하지 못하였다. 본 연구에서는 기존 연구에서 제안된 PBD 방법에 개별 교량의 위험성을 고려할 수 있는 위험성-성능기반 감가상각(HPBD) 방법을 제안하고 적용성 검토를 위하여 8천여 교량을 대상으로 평가를 수행하였다. 교량의 열화 위험요인을 선정하고 개별 교량들의 위험성을 평가하여 위험성 수준에 따른 가중치를 기존 PBD 방법에 적용하였다. 평가결과 PBD 방법과 유사한 현재가치와 상대적으로 높은 미래가치가 도출되었으며, 개별 교량의 위험 특성을 고려한 HPBD 방법이 보다 합리적인 가치평가와 의사결정에 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 자산가치 평가, 교량성능, 위험성, 위험요인, 교량관리시스템 (BMS)
