

교량의 위험도 및 중요도를 고려한 관리수준 결정에 관한 연구

이용준¹, 선종완², 임종권³, 박경훈^{4*}

Determination of the Management Level Considering Risk and Criticality of Bridges

Yong-Jun Lee¹, Jong-Wan Sun², Jong-Kwon Lim³, Kyung-Hoon Park^{4*}

Abstract: An Internet of Things (IoT)-based monitoring system is being constructed with the objective of facilitating rational maintenance decisions and ensuring the safety of domestic bridges that are experiencing continuous aging. In the context of a large number of total managed bridges, it is essential to undertake a rational evaluation of those that require a high level of management in order to select appropriate measurement targets. In order to achieve this objective, a methodology was devised to assess the risk level of the all bridges, taking into account a range of influencing factors, then employed to determine the relative priority of bridges requiring measurement. A total of more than 8,000 bridges were evaluated in comprehensive management levels (CML) 1 to 5 based on risk and criticality, and 1,933 bridges were selected as CML 4 and 5 bridges requiring higher management levels. A statistical analysis of actual bridge deterioration, damage, and damage cases, as well as CML, revealed that the selected bridges were older, more heavily trafficked, and had lower safety ratings on average than other bridges. It is believed that the relative risk and criticality of all bridges were appropriately considered and selected, and that the proposed bridge risk assessment method will prove useful for various maintenance decision-making problems of facilities in the future.

Keywords: Bridge, Risk, Criticality, Risk Matrix, Management Level

1. 서 론

국내 교량 구조물은 하천, 해상, 계곡, 기존 도로 등 가설되는 위치의 특성상 열악한 환경에 놓이게 되는 경우가 많으며, 태풍, 홍수, 지진과 같은 자연재해뿐만 아니라 물동량의 증대와 운송수단의 대형화로 인한 교통량 및 통행하중의 지속적인 증가로 인해 열화·손상이 가속화 되고 있다. 2000년 전후 집중적으로 건설된 교량들로 인해 10년 후에는 공용년수 30년 이상 되는 노후 교량이 17.7%에서 50.3%로 급격하게 증가할 것으로 전망된다(MOLIT, 2023). 이러한 교량의 노후화에 따른 붕괴, 파손 등의 사고를 방지하기 위해 노후도 및 손상도가 심각한 교량을 실시간으로 모니터링하고 이상징후 발생 시 즉시 조치할 수 있는 IoT (Internet of Things) 플랫폼 기반의 모니터링 시스템 구축에 대한 필요성이 제기되고 있다. 현재

교량 관리주체별로 전통적인 계측방식에 첨단기술을 접목하여 실시간 모니터링, 데이터 획득 및 분석을 통해 교량 시설물을 보다 체계적으로 관리하기 위한 구조 건전성 모니터링 (Structural Health Monitoring; SHM) 시스템을 일부 주요 교량에 구축하여 운영하고 있다(Park et al., 2018; Seoul, 2023). 그러나 2022년 말 기준 38천여개소에 이르는 전국 도로교량 (MOLIT, 2023) 전체에 계측시스템을 설치하는 것은 비용효율성 및 효용성 측면에서 현실적으로 곤란하다. 따라서 전체 관리 대상교량 중 노후도, 재난재해, 물리적 특성 등을 고려하여 위험도를 평가할 수 있는 방법을 개발하고, 높은 관리수준이 요구되는 교량을 합리적으로 평가하여 계측대상교량 선정에 활용하고자 한다.

전체 관리 교량의 상대적인 관리수준을 결정하고자 본 연구에서는 우선 기존의 국내외 교량관리 우선순위 선정 방법에 대한 현황 분석을 수행하고, 국내 교량관리시스템(Bridge Management System; BMS)을 비롯한 다양한 교량 관련 정보 시스템의 가용한 데이터를 수집하고 분석하였다. 다음으로 교량에 영향을 미치는 위험인자(risk factor)를 식별하고, 위험도(risk)와 중요도(criticality)를 평가하였다. 최종적으로 종합적인 위험수준을 판단하여 높은 관리수준이 요구되는 교량을 선정하고, 선정된 교량의 적정성을 분석하였다.

¹정회원, 한국토지주택연구원 건설기술연구실 연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

³정회원, 바름브레인 대표

⁴정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원, 교신저자

*Corresponding author: paul@kict.re.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2025년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2025년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 교량관리 의사결정 사례 분석

교량 유지관리, 성능개선, 개량 등 관련 업무에는 교량의 상태에 따른 유지관리 조치 및 요구에 대한 우선순위, 유지관리 조치에 대한 효과 그리고 예산의 추정 및 배분 등 다양한 의사결정 사안이 존재한다. 또한 개별 교량에 대한 구체적인 유지관리 의사결정과 다수의 교량 중 유지관리조치 시행의 우선순위 산정을 위한 의사결정이 있을 수 있다. 후자에 비해 전자는 개별 교량에 대한 상세한 정보와 검토가 필요하며 구체적인 공학적 해석과 분석이 필요하게 된다. 본 연구에서 목적으로 하고 있는 노후-위험 교량의 상시 계측관리를 위한 대상교량의 선정 또한 주요한 의사결정 사안이며, 관리되고 있는 대부분의 교량을 대상으로 하므로 범용적으로 접근 가능한 정보에 기초하여 검토 및 분석되어야 한다. 이와 관련된 국내외 사례를 분석하여 관리수준 결정 방법 및 절차 수립에 활용하였다.

2.1 국외 사례 분석

미국은 I-35W 교량 붕괴 이후 현재의 교량관리 접근방식이 상태평가에 초점이 맞추어져 있고 교량 성능과 관련된 내재적 취약성과 관련된 모든 문제가 암묵적으로 무시되고 있다고 판단하였다. 교량의 평가와 우선순위 결정에 보다 합리적이고 정량적인 접근법이 필요하다는 인식의 제고를 바탕으로 위험도 기반 접근법을 제시하였다(Moon et al., 2009). 제안된 접근법은 교량의 성능한계상태의 고려, 위험도기반, 불확실성의 명시적 고려, 전문가 지식기반 등이 핵심적 요소로 구성되어 있다. 제안된 접근법에서는 위험도기반 평가 방법론과 기본적인 프레임워크를 제시하고 사례연구를 수행하였다. 위험도기반 평가 방법론은 인명손실과 경제·사회적 피해를 유발하는 수용할 수 없는 수준의 파손(unacceptable failure)의 방지를 목표로 하고 있다. 위험도기반 평가 프레임워크는 본질적으로 정성적이고 주관적이지만 실제 교량 점검 실무에 큰 변경을 필요로 하지 않으므로 현재 점검 데이터를 사용하여 대부분의 교량에 적용될 수 있다. 위험수준 도출 결과에 따라 해당 교량에 적절한 프로그램(점검진단 형태 및 시기)의 적용을 제안하고 있다.

전통적으로 사회기반시설의 자산관리와 관련하여 선도적인 행보를 보여 왔던 뉴질랜드 교통청은 도로 교량의 자산관리에 기본이 되는 데이터 수집 및 모니터링에 대한 한계점을 개선하여 새로운 절차를 제시하였으며(NZTA, 2012), 이러한 절차 중 위험도 기반 우선순위 평가 프로세스는 Moon et al. (2009)에서 많은 부분을 차용하고 있다. 국내의 ‘시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(MOLIT, 2021)(이하 시설물안전법)’에서 정하고 있는 세부적이고 구체적인 교량의 등급과

점검진단 주기 및 조사항목 등이 존재하지 않는 뉴질랜드는 발전된 자산관리를 구현하기 위하여 교량별로 등급화된 데이터 수집 및 모니터링을 위한 지침이 요구되었다. 교량에 기대하는 서비스수준(Level of Service; LOS)을 달성하기 위해서 성능 및 열화와 관련된 기본데이터 수집의 필요성과 자산관리를 위한 데이터 수집 프로세스의 개선을 강조하고 있다. 모든 개별 교량 또는 교량이 속한 도로 네트워크에 동일한 수준의 자산관리가 필요한 것은 아니므로 광범위한 네트워크 요구사항을 충족시킬 수 있는 유연한 데이터 수집 및 모니터링 전략을 적용하기 위한 단계별 절차를 제공하고 있다. 보다 신뢰할 수 있는 데이터를 장기 유지관리 계획에 활용할 수 있도록 육안조사(visual inspection), 비파괴 시험(Non-Destructive Evaluation, NDE), 구조 건전성 모니터링(SHM) 등 기존 자산관리에서 사용되는 데이터 수집기법의 유형을 확장하였다. 또한 의사결정을 위하여 교량의 위험도뿐만 아니라 교량 파손으로 인해 도로망의 정상적인 작동 및 기능에 미치는 영향을 추가적으로 고려하고 있다.

2.2 국내 사례 분석

일반적으로 교량의 관리단계에서 재정적 제한으로 인해 개축, 개량 등 특정 유지관리 사업의 우선순위 평가가 필요하다. 국내의 교량 유지관리 우선순위는 ‘시설물안전법’에 근거한 점검진단, 점검진단 결과에 따른 보수보강, 전면적인 대규모의 개량사업 등 다양한 부분에 걸쳐 방법론이 개발되어 적용되고 있다(KECRI, 2013; Sun et al., 2016). Lee et al.(2019)은 ‘시설물안전법’의 적용 대상이 아닌 중소규모 교량의 성능평가 우선순위 결정을 위하여 위험도지수기반 평가방법을 제안하였다. 취약도와 영향도를 기반으로 하는 위험도 지수를 산출하고, 산출된 위험도 지수에 따라 이들 교량들을 성능평가 즉시실시교량, 단기실시교량 및 관찰교량으로 구분하여 유지관리 전략수립에 활용하고자 하였다. 한정된 예산의 효율적 분배를 위한 유지관리 우선순위 선정 기법을 개발하기 위하여 Kim and Lee(2017)는 위험인자를 선별하고 선정된 인자에 대한 평가 기준, 영향도 가중치 등을 도출하고 이를 활용하여 엑셀시트 기반의 위험도기반 우선순위 선정 기초 모델을 제시하였다. 또한 Lee et al.(2022)은 위험도와 중요도, 상대규모를 고려하여 유지관리 우선순위를 정하는 방법을 제안하고 분석 사례를 제시하였다. 하지만 교량의 현재 상태와 성능보다는 상대적으로 변동성이 낮은 설계관련 인자들(설계하중, 내진설계여부, 시설물 중 구분, 차선수 등)과 생애주기동안 변동성이 큰 교통량의 영향으로 인해 교량 유지관리 우선순위의 점수의 변동성이 불명확하여, 특정 열화, 손상, 파손 등에 대한 구체적인 유지보수 조치 행위에 대한 우선순위로 실제 적용하기에는 한계가 있다. 한편 Park et al.(2021)은 중소규모

교량의 유지관리 시나리오 기법 개발을 위해 3종 및 기타 교량인 중소규모 교량을 대상으로 위험도 기반 성능평가 우선 순위 산정에 대한 방법을 제시하였다. 위험도 분석에 필요한 평가항목을 정의하고, 각 평가항목에 따른 평가지표를 선정하였다. 또한 각 평가항목별 가중치를 전문가 설문을 통해 산정한 후 가중합산으로 손상가능성 및 손상 피해 규모를 산정하는 방안을 제안하였다. 제안한 위험도 기반 성능평가 우선 순위 산정 모델을 실제 공용중인 중소규모 교량을 대상으로 평가하였고 위험도 매트릭스를 활용하여 관리수준에 따라 유지관리 우선순위를 산정하였다. 그러나 평가항목이 공용년수, 설계등급, 교량 폭 등 매우 단순하여 교량의 실제적인 우선순위를 평가하는 것에는 한계가 있다.

3. 데이터 수집 및 리스크 식별

3.1 데이터 수집

교량의 열화는 기상조건, 교통하중, 공용년수 등의 상호 작용을 포함한 다양한 요인으로 발생하기 때문에 위험도 평가 시 여러 설명변수를 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 교량의 기본제원, 점검진단, 보수보강 정보 등이 축적되고 있는 교량관리시스템(BMS)의 해당정보를 기본정보로 활용하였다. 또한 위험도 평가를 위해 필요한 교통량, 기상자료, 제설제 사용량 등 추가적인 정보들은 가용한 유관 시스템을 통해 수집하였으며, Table 1과 같이 교통량정보제공시스템(Traffic Monitoring System; TMS), 기상자료개방포털(Weather Data Service System; WDSS), 도로제설관리시스템(Road Snow-removal Management System; RSMS), 홍수위험지도정보시스템(Flood Risk Mapping Information System; FRMIS) 등이 해당된다.

3.2 리스크 식별

3.2.1 위험요소 정의

일반적인 위험도 평가는 특정 위험의 발생 확률과 그 위험

으로 인해 초래될 수 있는 결과의 곱으로 정의할 수 있다. 교량의 위험도 평가에 공통적으로 필요한 위험요소(Risk Element; RE)들은 위험성(Hazard; H), 취약성(Vulnerability; V), 심각성(Consequences; C), 불확실성(Uncertainty; U)이 있으며, 위험도(R)는 식 (1)과 같이 정식화 할 수 있다(Moon et al, 2009).

$$R = H \times V \times C \times U \quad (1)$$

여기서, 위험성(H)은 특정 위험의 발생확률로 정의할 수 있으며, 취약성(V)은 특정 위험 발생 시 교량의 안전성, 내구성 등 위험으로부터 견딜 수 있는 확률로 정의할 수 있다. 심각성(C)은 특정 위험 발생시 해당 교량의 취약성에 따라 초래되는 붕괴, 파손, 손상 등에 대한 피해 정도로 정의할 수 있다. 불확실성(U)은 대상교량의 규모, 설계등급 등에 따른 유지관리 수준의 차이로 인해 위험도 분석을 위해 취득되는 정보의 수준차이를 고려하기 위한 할증 계수로 정의하였다.

3.2.2 성능항목 정의

교량의 구조적 위험과 지형적, 환경적, 기능적 특징에 따라 발생하는 위험에 따른 붕괴나 파손의 원인은 다양하다. 이러한 특징을 고려하여 교량에 실제 적용 가능한 위험인자(Risk Factors; RF)의 선정을 위해 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)(이하 세부지침)(MOLIT, 2022)’을 참고하였다. ‘시설물안전법’ 제 40조에 따라 도로 시설물의 관리주체는 시설물의 성능을 유지하기 위하여 시설물에 대한 성능평가를 실시하여야 한다. 교량 시설물의 성능평가는 ‘세부지침’에 따라 Table 2와 같이 구조적 안전성능뿐만 아니라 내구성능, 사용성능을 종합적으로 반영하여 평가하여야 한다. 본 연구에서는 최초 건설 당시의 기능성을 고려하여 안전성능(Safety, S), 내구성능(Durability, D), 사용성능(Serviceability, Se), 기능성능(Functionality, F)의 4가지 성능항목(Performance Categories; PC)을 선정하였다.

3.2.3 위험요소 및 성능항목별 위험인자 정의

각 위험요소(H, V, C)별 성능항목(S, D, Se, F)에 따라 선정된 위험인자는 Table 3과 같으며, 기존 문헌 고찰, 전문가 인터

Table 1 Bridge related information system and collection data

System	Collection Data (website)
BMS	Properties, Inspection, Repair and Reinforcement, etc. (nbms.kict.re.kr)
TMS	Annual Average Daily Traffic, Annual Average Daily Truck Traffic, etc. (road.re.kr)
WDSS	Temperature, Humidity, Frost-damage Environment, etc. (data.kma.go.kr)
RSMS	Chloride Deicing Material Usage Status (rsms.kict.re.kr)
FRMIS	Flood Risk Zone and Level etc. (floodmap.go.kr)

Table 2 Integrated performance evaluation method by the Guidelines (MOLIT, 2022)

	Integrated Performance Grade		
	Safety	Durability	Serviceability
Grade	A~E	A~E	A~E
Defect-rate range	0~1	0~1	0~1
Weight	0.68	0.21	0.11

Table 3 Selection of risk factors

Performance Categories	Hazard (H)	Vulnerability (V)	Consequence (C)
Safety (S)	- Earthquake - Flood - Collision - Heavy vehicles	- Securing seismic performance - Hydraulic vulnerability - Load for design - Service life - Safety grade	- Annual average daily traffic (AADT) - Recovery cost (area)
Durability (D)	- Freezing and Thawing - Chloride - Deicing chemicals	- Condition grade - Service life	- Recovery cost (area)
Serviceability (Se)	- Heavy vehicles	- Pavement condition	- Annual average daily traffic (AADT)
Functionality (F)	- Road width - Traffic height limit	- Load for design - Level of service (capacity)	- Annual average daily traffic (AADT)

뷰, 설문조사 등을 통해 현재 관리 교량의 위험도를 평가할 수 있는 데이터의 가용성을 고려하여 선정하였다. 성능항목 중 안전성능(S)과 관련된 위험성(H)은 지진, 홍수, 충돌 등 교량의 안전에 직접적인 영향을 끼치는 요인을 고려하여 선정하였다. 이러한 안전성능과 관련된 해당 교량의 취약성(V)을 정량화하기 위하여 내진성능확보여부, 교량 설계하중등급 등을 선정하였다. 심각성(C)은 교량의 붕괴 및 손상 발생 시 사회적, 경제적으로 발생하는 피해정도를 정량화할 수 있는 연평균일교통량과 복구비용의 개략 추정이 가능한 교량 상부구조 면적으로 선정하였다.

내구성능(D)과 관련된 위험성(H)은 동해환경, 염해환경, 제설제 사용량 등 교량의 재료적 내구성능에 영향을 주는 요인을 선정하였다. 취약성(V)은 시설물의 공용년수 및 외부 환

경조건에 따른 영향이 크므로 교량의 상태등급과 공용년수를 요인으로 선정하였고, 심각성(C)은 피해 발생에 따른 복구비용을 고려 요인으로 선정하였다. 사용성능(Se) 및 기능성능(F)과 관련된 위험성(H)은 교량의 설계 당시와 준공 이후 이용자-관리자의 이용상 편의성, 수요, 용량 등에 영향을 줄 수 있는 차선평, 통행제한높이 등을 요인으로 선정하였다. 취약성(V)은 교량을 이용하는 이용자 만족도와 계획 당시의 목적에 부합하는 서비스를 제공할 수 있는 역량과 관계가 있으므로 포장상태등급, 도로용량서비스수준 등을 요인으로 선정하였고, 심각성(C)은 연평균일교통량을 선정하였다.

3.2.4 위험인자별 평가등급 기준

다수의 교량 간에 상대적인 위험 정도를 추정하기 위한 위

Table 4 Criteria for evaluation of risk factors related to safety performance

RE	RF	Grade				
		1	2	3	4	5
H	Earthquake	-	Earthquake zone I	-	Earthquake zone II	-
	Flood	General zone	-	Flood damage hazard zone	-	-
	Collision	No risk of collision	Low risk of collision	Possible risk of collision	-	-
	AADTT	1,500 or less	1,501~3,000	3,001~4,500	4,501~6,000	More than 6,000
V	Securing seismic performance	Securing seismic performance	-	Non-secured seismic performance	-	-
	Hydraulic vulnerability	Bridges not crossing river or sea	-	-	River or sea crossing bridges	-
	Load for design	DB-24	-	DB-24(Performance-enhanced)	-	DB-18 or less
	Service life	15 yrs or less	15~20 yrs	25~30 yrs	25~30 yrs	More than 30 yrs
	Safety grade	A	B	C	D	E or X
C	AADT	5,600 or less	5,601~12,000	12,000~20,000	20,000~27,000	More than 27,000
	Recovery cost (area)	780 or less	780~2,300	2,300~4,300	4,300~7,300	More than 7,300

험도 기반 평가는 실용적 접근이 필요하다. 다양한 위험인자에 대한 고도의 공학적 판단을 요구하기 보다는 현실적으로 취득 가능한 데이터의 통계적 분석과 전문가의 의견 및 기존 규준에 근거하여 상대적 평가를 수행하고자 하였다. 선정된 위험인자의 평가등급 기준은 Table 4 ~ Table 7과 같다. 각 성능항목별 위험인자의 평가등급 기준은 최저 1점에서 최대 5점까지 이산형 척도로 평가할 수 있다.

항목별 위험인자 중 교량의 공용년수, 교통량, 교량면적 등과 같이 정량적 정보는 Fig. 1과 같이 분포 비율을 고려하여 구간을 5단계로 구분하고 1~5점을 부여하였다. 지진, 홍수, 충돌위험 등의 요인처럼 정성적으로 분류가 가능한 정보는 전문가 인터뷰, 세부지침, 관련 정보시스템 등을 근거로 평가등급 기준 범위를 산정하였다. 지진위험은 우리나라의 지진구역 및 지진구역계수를 활용하여 지진 I 구역(2점), 지진 II 구역(4점)으로 평가할 수 있도록 하였다. 홍수/수해위험은 FRMIS를 활용하여 홍수피해예상지역 여부에 따라 평가할 수 있다. 충돌위험은 BMS에서 관리하고 있는 하부 교차정보

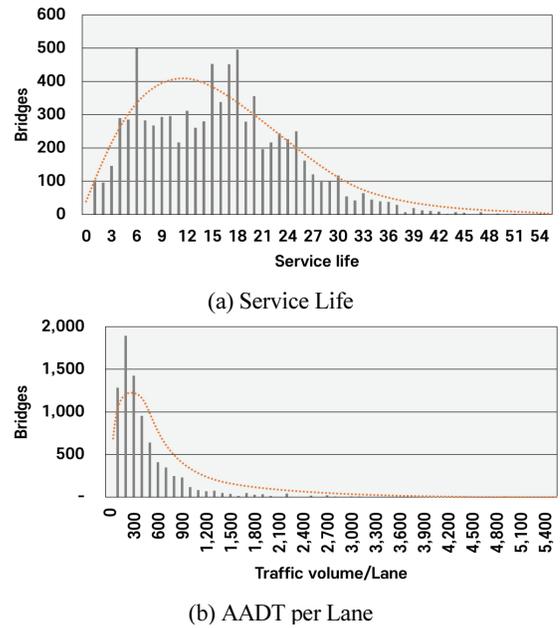


Fig. 1 Bridge distribution status examples by quantitative data

Table 5 Criteria for evaluation of risk factors related to durability performance

RE	RF	Grade				
		1	2	3	4	5
H	Freezing and Thawing	Less than 3	3~50	50 이상	-	-
	Chloride	a	b	c	-	-
V	Deicing chemicals	Less than 0.75	1.5	2.25	3.0	More than 3.0
	Condition grade	A	B	C	D	E
C	Service life	15 yrs or less	15~20 yrs	25~30 yrs	25~30 yrs	More than 30 yrs
	Recovery cost (area)	780 or less	780~2,300	2,300~4,300	4,300~7,300	More than 7,300

Table 6 Criteria for evaluation of risk factors related to serviceability performance

RE	RF	Grade				
		1	2	3	4	5
H	AADTT	1,500 or less	1,501~3,000	3,001~4,500	4,501~6,000	More than 6,000
V	Bridge pavement condition	A	B	C	D	-
C	AADT	5,600 or less	5,601~12,000	12,000 more than		

Table 7 Criteria for evaluation of risk factors related to functionality performance

RE	RF	Grade				
		1	2	3	4	5
H	Road width	3.5 m or more	-	-	-	Less than 3.5 m
	Traffic height limit	4.2 m or more	-	Less than 4.2 m	-	-
V	Load for design	DB-24	-	DB-24 (Performance-enhanced)	-	DB-18 or less
	LoS (capacity)	A	B	C	D	E or less
C	AADT	5,600 or less	5,601~12,000	12,000 More than		

를 활용하여 하부 도로 유무에 따라 평가가 가능하다. 평가기준은 지속적인 사례 분석과 전문가 의견, 가용한 데이터의 신뢰성에 근거하여 보다 합리적인 결과가 도출될 수 있도록 보정 가능할 것으로 판단된다.

3.2.5 위험인자별 가중치 산정

동일한 성능항목의 위험요소(H, V, C) 내 위험인자들 간의 상대적 중요도 산정을 위해 전문가 설문조사를 실시하고 AHP (Analytic Hierarchy Process) 분석을 수행하였다. AHP는 Saaty(1982)에 의해 개발된 분석 방법으로 복잡한 문제를 계층화하여 주요 요인과 세부 요인들로 분해하고 이러한 요인들에 대한 쌍대 비교를 통해 생성된 데이터를 기반으로 상대적 중요도를 산출하는 방식이다. 설문은 전문가 14명을 대상으로 실시하였으며 관련 분야 대학교수 및 연구원 8명, 공공기관 교량 유지관리 담당자 4명, 민간업체 구조전문가 2명으로 구성되었다. 신뢰성 있는 데이터 확보를 위하여 설문지별 CI (Consistency Index) 값을 확인하였다. 일관성이 확보된 데이터라고 판단되는 기준은 “CI<0.1”이며 모든 설문지가 CI 기준을 만족하였다.

위험인자별 가중치 산정 결과는 Table 8과 같다. 성능항목

중 안전성능(S)의 경우 위험성(H)에서는 연평균트럭교통량이 44.2%, 취약성(V)에서는 공용년수가 31.4%, 심각성(C)에서는 연평균교통량이 63.8%로 상대적인 주요 인자로 평가되었다. 내구성능(D)의 경우 위험성(H)에서는 제설제 사용량이 44.6%, 취약성(V)에서는 상태등급이 62.9%로 주요 인자로 선정되었고, 심각성(C)은 복구비용만 고려하였다. 사용성능(Se) 및 기능성능(F)에서는 중차량 교통량과 통행제한높이가 위험성(H)에서 주요 인자로 선정되었고, 포장상태등급과 도로용량 서비스수준이 취약성(V)에서 주요 인자로 선정되었으며 심각성(C)은 연평균일일교통량만 고려하였다.

4. 위험도 및 중요도 평가

4.1 위험도 평가

본 연구의 목적인 교량 관리수준 결정을 위한 위험도 평가는 Fig. 2와 같이 3단계로 이뤄진다. 우선 개별 교량의 성능항목별로 위험요소(RE_i) 내의 위험인자(RF_j)들을 평가하고 평가등급(1~5등급)을 부여한다. 위험요소 평가는 식 (2)와 같이 AHP 분석을 통해 결정된 위험요소별 위험인자의 가중치(w_j)를 평가등급에 곱한 가중곱의 합으로 평가한다.

Table 8 Estimating the weight of risk factors using AHP technique

Performance Categories	Hazard		Vulnerability		Consequences	
	Factor	Weight	Factor	Weight	Factor	Weight
Safety	Earthquake	17.9%	Securing seismic performance	18.2%	AADT	63.8%
	Flood	26.2%	Hydraulic vulnerability	16.7%		
	Collision	11.7%	Load for design	11.8%		
	AADTT	44.2%	Service life	31.4%		
Durability	Freezing and Thawing	29.0%	Condition grade	62.9%	Recovery Cost (Area)	100.0%
	Chloride	26.4%				
	Deicing chemicals	44.6%				
Serviceability	AADTT	100.0%	Pavement condition	100.0%	AADT	100.0%
Functionality	Road Width	42.8%	Load for Design	44.4%	AADT	100.0%
	Traffic Height Limit	57.2%	LoS (Capacity)	55.6%		

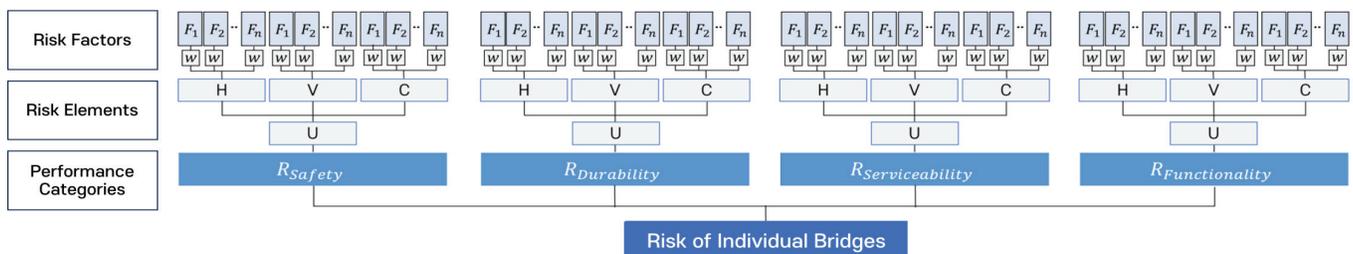


Fig. 2 Risk assessment procedures for individual bridges

$$RE_i = \sum_j (RF_j \times w_j) \quad (2)$$

성능항목(PC_i)은 식 (3)과 같이 각 성능항목별 위험요소인 위험성(RE_H), 취약성(RE_V), 심각성(RE_C)과 함께 불확실성 계수(U_{br})를 고려하여 산정한다. 여기서 U_{br} 은 식 (4)와 같이 모든 불확실성 인자의 곱으로 계산되며, 불확실성 인자로 점검수준(U_{il}), 공용년수(U_{sl})를 고려하였다. 불확실성 계수는 개별 교량의 위험도분석을 위한 정보의 수준차이를 보완하기 위하여 고려되었다. Table 9와 같이 종별 구분에 따른 점검진단 적용수준의 차이, 공용수명 차이에 따른 내적 및 외적 불확실성을 반영할 수 있도록 정의하였다.

$$PC_i = RE_{H_i} \times RE_{V_i} \times RE_{C_i} \times U_{br} \quad (3)$$

$$U_{br} = U_{il} + U_{sl} \quad (4)$$

식 (3)을 통해 안전성능(PC_S), 내구성능(PC_D), 사용성능(PC_U), 기능성능(PC_F)에 대한 평가가 정량화되면 식 (5)와 같이 각 성능항목별 위험도 점수의 제곱평균제곱근(root mean square)을 통해 개별 교량의 위험도(R_{br})를 평가한다.

$$R_{br} = \sqrt{\frac{PC_S^2 \times PC_D^2 \times PC_U^2 \times PC_F^2}{N}} \quad (5)$$

전체 관리 교량 약 8천여 개소를 대상으로 위험도를 평가한 결과는 Fig. 3과 같다. 전체 교량의 약 80%가 위험도 점수(risk score) 20~60점대에 분포되어 있으며, 다른 교량들에 비해 상대적으로 위험도가 높은 상위 5% 교량은 90점 이상에 분포되어 있는 것으로 분석되었다.

교량의 위험도 점수에 영향을 미치는 주요 요인을 파악하기 위해 교량별 위험도 점수와 위험요소별 위험인자에 대해 상관분석을 실시하였다. 상관분석은 변수끼리 서로 상관관계에 있는 두 변량의 밀접한 정도를 분석하는 통계적 분석 방법이다. 여기서 상관계수 값이 -10%~10% 사이이면 무시할 수

Table 9 Uncertainty assessment criteria

Grade	Score	Inspection level	Service life
1	0.5	Special Bridges	Less than 10 yrs
2	1.0	Bridge Class 1	11~20
3	1.5	Bridge Class 2	21~30
4	2.0	Bridge Class 3, etc. & Inspection history (within 5 yrs)	31~40
5	2.5	Bridge/Class 3, etc. & Inspection history (greater than 5yrs)	Greater than 40 yrs

있는 선형관계, 10%~30% 사이이면 약한 양적 선형관계, 30%~70% 사이이면 뚜렷한 양적 선형관계, 70%~100% 사이이면 강한 양적 선형관계로 해석할 수 있다(Park, 2001).

Table 10은 상관분석 결과로 교량의 위험도 점수에 영향을 주는 위험요소 중 위험성(H)은 연평균일트럭교통량(AADTT)과 홍수가 주요 요인으로 선정되었다. 취약성(V)에서는 공용년수, 수해위험지역, 안전등급이 높은 상관성을 보였으며, 피해도를 측정하는 심각성(C)은 교통량과 복구비용 모두 주요 요인으로 분석되었다. ‘시설물안전법’에 따른 교량의 안전등급은 위험도와 매우 밀접한 변수이지만 위험도 평가에서 상관계수가 28.9%로 약한 양적 선형관계로 분석되었다. 이것은 BMS의 전체 관리 대상교량의 약 95%이상이 매우 양호한 상태(A~B등급)이기 때문인 것으로 판단된다.

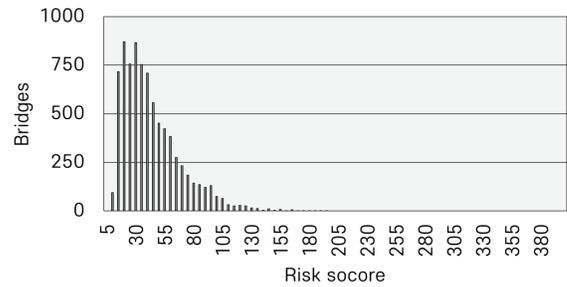


Fig. 3 Results of bridge risk assessment

Table 10 Major risk factors of bridges

RE	Factor	Correlation coefficient
H	Earthquake	6.0%
	Flood	28.1%
	Collision	4.9%
	AADTT	43.5%
	Freezing and Thawing	4.7%
	Chloride	1.1%
	Deicing chemicals	6.9%
	Road width	3.4%
	Traffic Height Limit	-8.1%
	Hydraulic vulnerability	30.2%
V	Load for design	9.9%
	Service life	59.2%
	Safety grade	28.9%
	Bridge pavement condition	-1.1%
C	LoS (capacity)	33.4%
	AADT	53.1%
	Recovery cost (area)	29.0%

4.2 중요도 평가

교량의 위험도 평가에서 고려되는 위험요소(H, V, C)를 통해 도출된 위험도 점수는 다양한 위험인자를 고려한 종합적이며 상대적인 위험확률로 이해할 수 있다. 그러나 위험도만으로 접근했을 때 낮은 위험확률로 인해서 도로네트워크에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 교량이 미고려될 가능성을 배제할 수 없게 된다. 교량의 중요도는 위험인자가 실제로 발생했을 때 초래되는 도로네트워크의 피해정도로 교량 규모, 교통량 등으로 측정할 수 있다. 이에 교량의 중요도를 평가하기 위해 위험요소 중 심각성(C)의 영향을 추가적으로 고려하였다. 교량별 중요도는 안전, 내구, 사용, 기능 성능의 각 성능항목 내 위험요소별 위험인자로 인한 피해를 측정하는 심각성(C_i) 값들 중 최댓값으로 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$C_{br} = \max(C_S, C_D, C_U, C_F) \quad (6)$$

전체 대상교량의 중요도 평가 결과, 중요도 점수는 Fig. 4와 같이 대부분이 1~3점에 분포되어 있으며, 719개소는 4~5점에 분포되어 있어 상대적으로 다른 교량들에 비해 위험 발생 시 네트워크 상에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 교량으로 평가되었다.

4.3 위험도 매트릭스를 활용한 종합평가

뉴질랜드 교통청은 교량의 관리수준을 개별 교량의 위험도

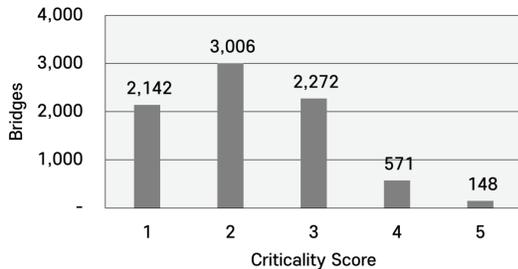


Fig. 4 Results of bridge criticality assessment

Table 11 CML according to risk and criticality level

	Criticality level				
	1	2	3	4	5
Risk level 5 (90~)	5	5	5	5	5
Risk level 4 (70~90)	4	4	4	4	5
(Score range) 3 (45~70)	3	3	3	4	5
2 (25~45)	2	2	3	4	5
1 (~25)	1	2	3	4	5

와 중요도 점수의 조합으로 이루어진 리스크 매트릭스를 활용하여 결정한다(NZTA, 2012). 위험도와 중요도의 수준에 따라 경계를 선형화하여 기본 관리, 중간 관리, 적극적 관리 대상교량으로 구분한다. 관리수준이 높아질수록 기본적인 점검주기가 단축되거나 점검수준이 높아지며 SHM 등을 통해 폭넓은 데이터 수집, 상시모니터링 등 관리 요구 사항이 증대된다. 또한 교량 관리자는 예산 상황과 위험 허용 범위에 따라 관리수준의 경계선을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 뉴질랜드 교통청에서 활용하고 있는 교량 관리수준을 참고하여 국내 약 8천여개소의 교량을 대상으로 도출된 위험도 및 중요도 점수를 복합적으로 고려하여 교량의 관리수준을 결정하는 방안을 제안하였다.

Fig. 3 및 Fig. 4의 위험도 및 중요도 점수에 따라 위험도 레벨(Risk Level; RL)과 중요도 레벨(Criticality Level; CL)을 5단계의 척도로 구분하였다. Fig. 3의 위험도 점수는 등간격의 분포 비율을 고려하여 Table 11과 같이 5레벨로 구분하였다. 교량의 상대적인 관리수준을 정의하는데 목적이 있으므로 각 레벨에 대한 분할 폭은 점수 비중, 교량 개소 등에 따라 다르게 정의될 수 있다. RL과 CL을 종합적으로 고려하기 위하여 종합관리수준(Comprehensive Management Level, CML)을 도입하였으며, RL과 CL 중 높은 값으로 결정하였다.

보다 직관적인 판단이 용이하도록 RL 및 CL에 따른 위험

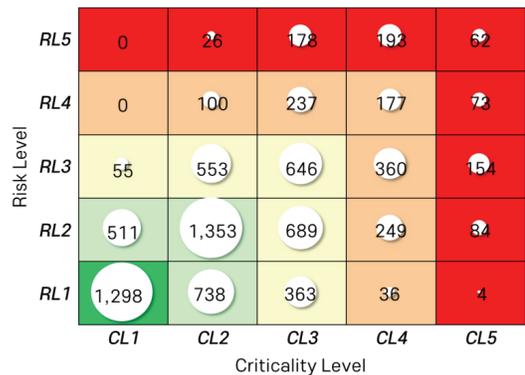


Fig. 5 Risk matrix of risk and criticality assessment

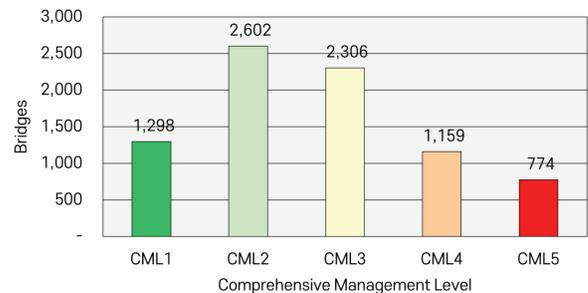


Fig. 6 Bridge status by Comprehensive Management Level

도 평가 결과를 Fig. 5와 같은 위험도 매트릭스 형태로 나타내었다. 위험도 매트릭스는 교량 관리수준을 결정하는데 사용할 수 있는 간단한 시각적 도구로서 CL을 나타내는 X축은 오른쪽으로 갈수록 상대적으로 중요도가 높은 교량이며, RL을 나타내는 Y축은 위쪽으로 갈수록 상대적으로 위험도가 높은 교량을 의미한다. Table 11의 CML 정의에 따라 CML 또한 1~5레벨로 평가되며, 레벨이 높을수록 적극적인 대응이 필요한 상대적으로 높은 관리수준이 요구되는 교량을 의미한다.

위험도 매트릭스를 활용한 전체 대상교량의 위험도 종합평가 결과는 Fig. 6과 같다. 상대적으로 높은 관리수준이 요구되는 CML 4, 5레벨의 교량은 전체 교량 중 각각 14.2%, 9.5%로 도출되었다. 또한 공용년수별 CML 4, 5인 교량의 구성비율은 Fig. 7과 같이 공용년수가 증가할수록 높아지는 것으로 분석되었다. 공용년수 10년 이하 및 11년~20년 이하인 교량 중

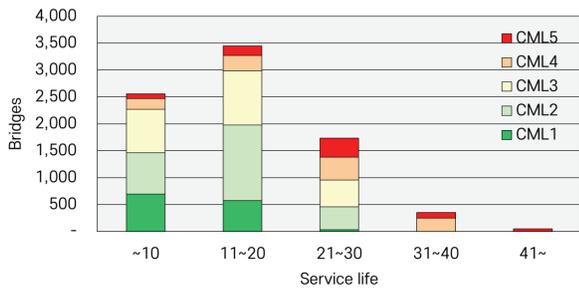


Fig. 7 Bridge ratio of high CML by service life

CML 4, 5레벨이 차지하는 비율은 11.4%, 13.4%로 분석되었으나, 공용년수 20년~30년 이하에서는 44.9%로 급격히 증가하였다. 특히 공용년수가 30년을 초과하는 교량들은 모두 CML 4, 5레벨에 위치하고 있어, 공용년수가 분석 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 12는 상부구조형식별로 CML 4, 5의 높은 관리수준이 필요한 교량 현황을 분석한 결과이다. 현재 전체 대상교량 중 가장 많은 비중을 차지하는 교량형식은 RC라멘교, RC슬래브교, PSC I거더교, 강박스거더교로 전체 교량의 87.7%에 이른다(MOLIT, 2023). 상부구조형식별 교량 개수 대비 높은 관리수준이 필요한 교량이 많은 형식은 RC중공슬래브교가 86.2%로 가장 높았고, RCT거더교, 강플레이트거더교, PSC중공슬래브교, RC슬래브교, 강I거더교 순으로 나타났다. 평균공용년수는 높은 CML 비율이 상위인 교량이 전체 교량에 비해 상당히 높게 나타났으며, 안전등급은 전체 교량 대비 높은 CML 교량이 전반적으로 낮은 수치를 보였다. 위험도분석에 있어 공용년수가 차지하는 비중이 높으며, 안전등급의 차이 또한 전체 대상교량 중 높은 CML 교량을 제외하면 유의미한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 여기서 안전등급은 A~E등급을 5~1점으로 수치화하여 대상교량의 평균값을 나타낸 것이다. 교량의 면적과 교통량은 위험 발생 시 영향을 정량화하기 위하여 도입되었으므로 높은 CML 교량의 평균 면적과 교통량이 해당 형식 전체 교량의 값에 비해 상대적으로 크게 나타나고 있는 것으로 판단된다. 한편 전체 교량 중 차지

Table 12 Results of high comprehensive management level bridges by superstructure type

Superstructure type	Total bridges		High CML bridges of the same type		Avg. Service life (year)		Avg. Safety grade		Avg. Area (m ²)		Avg. AADT	
	No.	%	No.	%	Total	High CML	Total	High CML	Total	High CML	Total	High CML
RC Hollow Slab	29	0.4%	25	86.2%	29.3	30.4	3.7	3.6	1,472.6	1,550.8	3,630.2	3,559.5
RCT Girder	23	0.3%	14	60.9%	30.8	42.0	3.8	3.6	533.6	526.5	2,617.4	3,128.3
Steel Plate Girder	44	0.5%	25	56.8%	20.9	27.7	3.9	3.8	3,008.6	3,778.9	5,531.9	6,684.7
PSC Hollow Slab	13	0.2%	6	46.2%	15.2	23.3	4.0	4.0	5,663.0	4,158.5	5,989.1	10,191.3
RC Slab	954	11.7%	436	45.7%	25.2	30.9	3.8	3.7	703.6	780.5	3,184.1	3,784.6
Steel I Girder	22	0.3%	8	36.4%	22.7	36.3	3.7	3.6	1,524.6	1,833.4	2,868.6	4,617.9
PSC Box Girder	76	0.9%	27	35.5%	15.9	23.9	3.8	3.7	5,939.3	7,652.8	3,533.2	6,269.2
Steel Box Girder	1,821	22.4%	488	26.8%	15.5	18.8	3.9	3.8	3,105.7	4,975.1	5,069.5	7,634.2
PSC I Gider	2,406	29.6%	501	20.8%	15.1	22.9	4.0	3.9	1,666.5	2,365.4	3,779.6	6,445.9
Preflex Girder	359	4.4%	67	18.7%	14.6	16.2	4.1	4.1	900.1	1,234.6	5,085.7	9,136.4
RC Rahmen	1,956	24.0%	292	14.9%	17.4	25.3	4.1	3.9	358.7	385.7	3,894.9	7,375.6
PSC Slab	185	2.3%	16	8.6%	9.2	14.9	4.1	4.3	1,496.1	1,966.8	2,893.0	7,965.7
RC Box Girder	17	0.2%	1	5.9%	7.8	30.0	4.4	4.0	731.0	1,512.0	2,606.6	871.0
ETC	234	2.9%	27	11.5%	8.1	13.5	4.2	3.8	4,502.1	12,411.8	3,404.8	8,152.0
Total	8,139	100.0%	1,933	23.7%	16.7	24.0	4.0	3.8	1,652.5	2,536.7	4,054.8	6,356.1

하는 비율이 높은 RC라멘교는 상대적으로 안전성이 높고 손상 발생률이 낮아 상대적으로 고 CML에 선정된 비율이 낮게 나타났다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 전체 관리 대상교량에 대하여 개별 교량별로 요구되는 유지관리 수준의 평가를 위하여 국내에 적합한 위험도 및 중요도 기반 평가 방법 및 절차를 제안하고 적용성을 검토하였다. 이를 위해 위험성, 취약성, 심각성, 불확실성의 위험요소(RE)와 안전, 내구, 사용, 기능 성능 등 성능항목(PC)을 설정하고, 교량의 기능을 저해하는 위험인자(RF)를 현실적인 정보 수집 및 활용 가능성을 고려하여 결정하고 정량적 평가를 위한 등급 기준을 설정하였다. 또한 RF별 상대적 중요도를 판단하기 위하여 AHP 평가를 통해 가중치를 결정하고, 개별 교량의 최종적인 위험도를 산출하였다. 실제 위험상황 발생에 따른 도로네트워크의 피해를 고려하기 위하여 PC별 RE 중 심각성 평가의 최대값을 중요도로 고려하였다. 최종적으로 교량별 위험도와 중요도를 복합적으로 고려하여 관리 우선순위를 결정하기 위한 지표로 종합관리수준(CML)을 제안하고, 위험도 및 중요도 평가결과를 매트릭스 형태로 구분하여 관리수준을 1~5레벨로 설정하였다. 제안된 위험도 평가 방법 및 절차는 국내의 유지관리 기준과 수준, 가용 정보에 부합하여 교량별 관리수준을 정량적이고 합리적으로 결정하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

계측 우선순위 교량 선정에 제안된 방법 및 절차를 활용하여 적용성을 검토하였다. 전체 관리 대상교량 약 8천여개소를 대상으로 위험도 및 중요도 기반의 CML을 평가하여 높은 관리수준이 필요한 CML 4, 5 교량 1,933개소를 선정하였다. 교량별 위험도 점수와 RF에 대해 상관분석을 통해 높은 상관성을 나타내는 주요 인자를 도출하였다. 실제 교량 열화·손상 및 피해발생 사례, 메커니즘 등을 고려할 때 RF 간의 상대적인 중요성은 합리적으로 도출된 것으로 판단된다. 또한 CML 4, 5에 선정된 교량들에 대한 통계분석 결과, 다른 교량에 비해 평균적으로 공용년수가 높고 안전등급이 낮게 나타났으며, 높은 상관성을 갖는 주요 RF와 중요도의 고려로 인해 상대적으로 교량 규모와 교통량이 높게 나타났다. 따라서 전체 교량 중 상대적 위험도와 중요도가 적절하게 고려되어 높은 관리수준이 요구되는 교량이 선정된 것으로 판단된다.

한편 본 연구에서의 위험도 평가 결과는 해당 교량이 실제 위험하다는 절대적인 기준이 아니며, 상대적인 비교를 통해 교량의 유지보수나 계측 대상 선정 시 우선순위를 정량적으로 판별하는데 활용될 수 있다. 또한 다수의 전체 교량을 대상으로 활용 목적에 부합하는 일차적인 기본 대상 선별을 위한

결과로서, 최종적인 의사결정과 사업의 시행을 위해서는 현장조사, 상세분석 등 추가적인 조사·분석이 필요하다. 향후 활용 목적에 부합되도록 RF의 선정 및 평가기준 설정, 상관분석 및 통계분석 등이 차별화되어 수행되어야 할 것이다. 제안된 교량 위험도 평가 모델은 시설물의 최적 유지관리 의사결정을 위한 자산관리체계 구축 시 다양한 인자들을 고려한 의사결정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 과제 "교량관리시스템 운영"의 일부로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

- Kim, D. J., and Lee, M. J. (2017), Basic Study for Development of Risk Based Bridge Maintenance Priority Decision Model, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Korea Institute of Construction Engineering and Management, 18(2), 108-116 (in Korean).
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI) (2013), Research on prioritization methodology for highway bridge rehabilitation, Korea Expressway Corporation (in Korean).
- Lee, H. H., Shin, B. G., Lee, Y. I., and Kim, Y. M. (2019), Suggestion of Priority Decision Method for Performance Evaluation Based on Risk Index for Small and Medium Sized Bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 23(6), 70-76 (in Korean).
- Lee, Y. J., Park, K. H., and Sun, J. W. (2022), Statistical Analysis of Damages in National Highway Bridges, Proceedings of the 2022 Autumn Conference, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 26(2), 130 (in Korean).
- MOLIT (2021), Special Act on the Safety and Maintenance of Facilities, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- MOLIT (2022), Detailed Guidelines for Implementing Safety and Maintenance of Facilities (Performance Evaluation), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- MOLIT (2023), Yearbook of Road Bridge and Tunnel Statistics, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- Moon, F., Laning, J., Lowdermilk, D., Chase, S., Hooks, J., and Aktan, A. (2009), A Pragmatic Risk-Based Approach to Prioritizing Bridges, *Proceedings of the SPIE-Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure and Homeland Security*, San Diego, CA.
- NZTA (2012), Data collection and monitoring strategies for asset management of New Zealand road bridges, New Zealand Transport Agency.
- Park, H. C., Shin, B. G., Cho, C. Y., Kim, Y. M., and Chang, B. S. (2021), Development of Maintenance Scenario Method for Small and Medium-sized Bridges Using Risk Matrix, *Journal of the*

Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 25(6), 161-168 (in Korean).

11. Park, S. W., Kim, I. H., Lee, D. K., and Jeong, W. S. (2018), Introduction to Integrated Monitoring System of Special Bridges on General National Roads, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, Korean Society of Steel Construction, 30(4), 12-16 (in Korean).
12. Park, Y. (2001), Correlation and Regression Analysis, *J Korean Acad Fam Med*, Korean Academy of Family Medicine, 22(1), 43-51.
13. Saaty, T. I. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York.
14. Seoul (2023), Han River Bridge Online Safety Monitoring System, Available at: <http://hbsafety25.eseoul.go.kr>, Seoul Metropolitan City.
15. Sun, J. W., Lee, D. Y., Lee, M. J., and Park K. H. (2016), Development on Reconstruction Cost Model for Decision Making of Bridge Maintenance, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Korea Academia-Industrial cooperation Society, 17(9), 533-542 (in Korean).

Received : 07/30/2024

Revised : 08/27/2024

Accepted : 09/23/2024

요 지 : 지속적으로 노후화 되고 있는 국내 교량 시설물의 합리적인 유지관리의 의사결정과 안전 확보를 위하여 IoT 기반의 모니터링 시스템이 구축되고 있다. 다수의 전체 관리 교량 중 계획 대상의 선정을 위해서는 높은 관리수준이 요구되는 교량을 합리적으로 평가하여야 한다. 이를 위해 전체 교량을 대상으로 다양한 영향인자를 고려하여 위험도를 평가할 수 있는 방법 및 절차를 개발하고, 계획 대상교량의 상대적 우선순위를 판단하기 위하여 적용하였다. 전체 관리 대상교량 8천여개소를 대상으로 위험도 및 중요도 기반의 종합관리수준을 1~5등급으로 평가하여 높은 관리수준이 필요한 4, 5등급 교량 1,933개소를 선정하였다. 실제 교량 열화 손상 및 피해발생 사례와 종합관리수준의 통계분석을 통해, 선정된 교량은 타 교량에 비해 평균적으로 노후도와 교통량이 높고 안전등급이 낮게 나타났다. 전체 교량 중 상대적인 위험도와 중요도가 적절하게 고려되어 선정된 것으로 판단되며, 제안된 교량 위험도 평가 방법은 향후 시설물의 다양한 유지관리의 의사결정 문제에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 교량, 위험도, 중요도, 리스크 매트릭스, 관리수준
