

공동구 성능평가를 위한 평가항목의 가중치 산정 연구

이용준¹ · 진규남² · 심영종^{3*}

¹비회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구원

²비회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 선임연구위원

³정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원

A study on the weights on the evaluation items for utility tunnel performance evaluation

Yongjun Lee¹ · Kyu-Nam Jin² · Young-Jong Sim^{3*}

¹Researcher, Land & Housing Research Institute, Korea Land & Housing Corp.

²Senior Research Fellow, Land & Housing Research Institute, Korea Land & Housing Corp.

³Research Fellow, Land & Housing Research Institute, Korea Land & Housing Corp.

*Corresponding Author : Young-Jong Sim, yjsim@lh.or.kr

Abstract

The Korean government amended the Facilities Safety Act in 2018 to establish a performance-based maintenance system. This system is designed to comprehensively evaluate the safety, durability, and usage performance of facilities required to maintain their function in use, and to establish corresponding maintenance plans. However, the current maintenance system of utility tunnels is managed by a safety-oriented evaluation method, which has limitations in conducting performance evaluations that consider durability and usage performance. Therefore, in this study, safety, durability, and usage performance items for utility tunnels were selected using the Delphi method, and the weight of each item was calculated using the entropy weighting method. The results of this study are expected to be used in future performance evaluations of utility tunnels to support rational decision making when establishing maintenance plans.

Keywords: Utility tunnel, Maintenance, Performance, Delphi, Entropy method

초 록

국내에서는 최근 빈번한 사고를 유발하는 지하시설물의 안전 확보 및 효율적 유지관리를 위해 공동구를 포함한 지하시설물을 중점관리 대상 시설로 선정하고 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」을 개정하여 성능중심의 유지관리체계를 도입하였다. 성능

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
26(5)477-488(2024)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.5.477>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 1, 2024

Revised August 19, 2024

Accepted August 20, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

중심의 유지관리체계는 사용 중인 시설물의 기능을 유지하기 위하여 요구되는 시설물의 안전·내구·사용성을 종합적으로 평가하고 그에 따라 유지관리계획을 수립하는 것이다. 그러나 현행 공동구 유지관리체계는 안전성 위주의 평가방식으로 관리되고 있어 내구·사용성이 고려된 종합성능평가를 실시하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 델파이 기법을 활용하여 공동구에 대한 안전·내구·사용성 항목을 선정하고 엔트로피 가중치 기법을 통해 각 항목들에 대한 가중치를 산정하였다. 향후 공동구 성능평가 시 본 연구에서 도출된 연구결과를 활용한다면 유지관리계획 수립 시 합리적인 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 공동구, 유지관리, 성능평가, 델파이, 엔트로피 가중치

1. 서론

1.1 연구의 배경

공동구란 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제2조 제9호의 규정에 의한 공동구를 말하며, 전기·가스·수도 등의 공급설비, 통신시설, 하수도시설 등 지하매설물을 공동 수용함으로써 미관의 개선, 도로구조의 보전 및 교통의 원활한 소통을 위하여 지하에 설치하는 시설물을 말한다(MOLIT, 2023a). 국내 공동구는 1969년 여의도 개발 당시에 계획, 건설한 것을 시작으로 주로 신도시 건설지구의 개발과 함께 설치되고 있으며 대규모 토지개발사업과 신도시 개발 등에 따라 지속적으로 증가하고 있다. 2023년 말 기준 공동구의 총 개소는 39개소이며 현재 30년 이상된 노후 공동구는 전체 시설물의 약 1/3수준이지만 10년 후에는 전체의 약 51.2%로 급증할 것으로 예상된다(Facility Management System, 2024). 이러한 공동구 노후화에 따른 시설물의 안전확보와 함께 지속적으로 사용 가능하도록 효율적으로 유지관리계획을 수립할 수 있는 방안 마련에 대한 필요성이 지속적으로 제기되고 있다. 이에 국내에서는 「1차 기반시설관리 기본계획(2020~2025)(MOLIT, 2019)」을 통해 국민생활 안전과 편의에 큰 영향을 미치는 공동구를 포함한 15종 시설물을 중점관리 대상 시설로 선정하고 성능중심의 관리를 통한 장수명화 계획을 수립하였다. 동시에 지하시설물의 안전관리 강화로 인해 준공 후 30년 이상 경과한 지하시설물은 최소 유지관리 및 성능개선기준에 따라 성능개선 또는 교체에 대한 합리적인 계획 수립이 필요하며 한정적인 유지보수 예산을 효율적으로 사용하기 위해서는 유지보수나 성능개선이 필요한 대상 공동구를 선정할 수 있는 평가 기준이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 공동구의 합리적인 성능개선 대상 선정에 활용할 수 있는 종합성능평가 항목과 항목별 평가를 위한 가중치를 산정하고자 한다.

1.2 연구의 방법

공동구의 합리적인 성능개선 대상 선정을 위한 평가항목 및 가중치 산정을 위한 연구의 방법 및 절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 공동구의 성능평가를 위한 항목을 도출하기 위해 국내 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단편, 성능평가편)(MOLIT, 2023b)」(이하, 세부지침)을 기반으로 성능평가 항목을 안전성능, 내구

성능, 사용성능으로 구분하였으며 성능별 세부 평가항목은 기존 문헌과 전문가 인터뷰 등을 통해 도출하고 델파이 기법을 활용하여 최종 세부 평가항목을 선정하였다. 마지막으로 엔트로피 방법을 활용하여 세부 평가항목의 가중치를 산정하여 공동구의 종합성능을 평가할 수 있는 기준을 제시하였다.

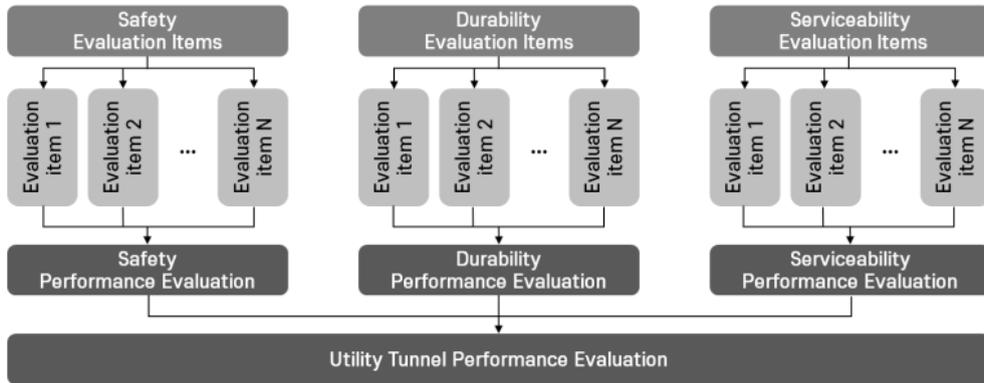


Fig. 1. Research methodology and process

2. 기존 문헌 고찰 및 국내외 시설물 유지관리체계 현황

우리나라보다 먼저 시설물 유지관리에 대한 문제를 경험한 미국이나 일본 등의 선진국의 사례를 살펴보면 시설물 노후화에 적절하게 대응하지 못할 경우 안전문제뿐만 아니라 관리비용의 급격한 증가라는 더 큰 사회적 문제를 야기함을 깨닫게 되었다. 이에 노후화 되어 가고 있는 시설물에 대해 상태와 성능을 정량적으로 평가하고 평가결과에 따른 전략적 투자와 관리방식을 도입함으로써 안전사고를 미연에 방지하고 기존 시설물의 수명연장과 성능개선을 통해 재정투자의 효율성을 제고하고 있다. 미국의 경우 교량 시설물의 경우 점검 및 진단을 통해 NBI (national bridge information) 등급을 0~9까지 10단계로 나누고 있으며 상태등급이 4등급 이하로 나타나면 성능개선 또는 교체를 위한 근거로 사용되고 이를 위한 예산 계획을 수립하고 있다(Chase et al., 2016). NBI 등급은 단순히 시설물의 상태만을 나타낼 뿐 안전성, 사용성, 기능성과 같은 서비스 수준을 나타내지는 못한다. 이에 미국 연방도로청(Federal Highway Administration, FHWA)에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 SR (sufficiency rating) 지표를 개발하였다. SR 지표는 교량 시설물이 최상의 서비스 수준일 때를 100%, 최악의 서비스 수준일 때 0%로 나타내며 구조적인 상태 및 안전성이 최대 55%의 비율을 차지하며 사용성 및 기능성의 노후화를 평가하는 항목이 최대 30%의 비율을 차지한다(Chase et al., 2016). 또한 공공 사용을 위한 필수성 평가 항목이 최대 15%를 차지하며 구조형식, 안전성에 따른 감소계수로 최대 13%를 차지한다(Jeong et al., 2021). 감소계수는 우회로 길이, 교량 난간 및 구조물 형식에 따라 결정된다(Chase et al., 2016). 미국에서는 대규모 교량의 유지관리, 성능개선 및 개축을 계획할 때는 SR을 바탕으로 평가하게 된다. SR이 50점 미만인 구조적으로 결함이 있는 교량은 개축에 대한 계획을 수립하고 50점보다 높고 80점 미만인 구조적으로 결함이 있는 교량은 보수보강 및 성능개선에

대한 계획을 수립하고 있다(Chase et al., 2016).

국내에서도 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(MOLIT, 2021)」(이하, 시설물안전법) 제40조에 근거하여 시설물에 대한 안전성, 내구성, 사용성을 종합평가하는 성능평가를 의무화하고 있다. 시설물 성능개선 기준은 「지속가능한 기반시설 관리 기본법(MOLIT, 2022)」(이하, 기반시설관리법) 제13조 및 「성능개선 공통기준」에 따라 시설물의 성능을 평가하고 검토대상 및 성능개선 유형을 선정한 후 경제성, 기술성 등의 평가를 통해 사업의 적합성을 판단한다. 시설물의 성능평가는 객관적인 현재 상태와 미래 성능 변화를 파악 예측하고 이를 통해 보수 개량 등의 최적 시기 결정 등 합리적 유지관리 전략을 마련하는데 활용할 수 있다. 그러나 공동구의 경우 세부지침(안전점검·진단편)에 따라 공동구 구조물 본체에 대한 안전성능은 평가하고 있으나 수용시설물의 내구성능이나 사용성능의 특성을 평가할 수 있는 항목과 기준이 없어 이에 대한 방안 마련이 필요한 실정이다. 이에 Byun et al. (2022)은 공동구 시설물에 대한 종합성능평가 기준을 개발하기 위해 델파이 기법을 활용하여 평가항목을 도출하였고 AHP (analytic hierarchy process) 기법을 통해 평가항목들의 가중치를 산정하였다. 그러나 공동구 내 수용시설물의 성능까지 고려할 수 있는 평가항목은 고려하지 않은 한계점이 있다. 이에 본 연구에서는 기존 연구의 한계점을 해결하기 위해 공동구 본체뿐만 아니라 수용시설물도 고려한 성능평가 기준을 제안하고자 한다.

3. 공동구 성능평가 항목 선정

3.1 공동구 성능평가 실시 범위 및 예비 성능평가 항목 선정

본 연구에서는 공동구 성능평가 실시 범위에 대한 세부적인 대상 시설은 세부지침(안전점검·진단편)에 따라 Table 1과 같이 선정하였다. 공동구는 공동구 본체, 기타시설물, 공중이 이용하는 부위로 분류되어 있다. 공동구 본체는 콘크리트 구조물로 벽체, 슬래브, 바닥 등이 포함되며 기타시설물은 수용시설의 부속시설, 부대설비, 주변 환경이 포함된다. 공중이 이용하는 부위는 추락방지시설, 도로포장, 도로부 신축이음부, 환기구 등의 덮개가 포함된다.

Table 1. Details of target facilities

Classification	Object facility
Main facilities	• Main utility tunnel (wall structure, slab, floor, entrance, branch sphere, vent)
Other facilities	• Supplementary facilities (joint, support, condition of rack), Subsidiary equipment, Surrounding environment
Public use area	• Fall prevention facilities, Road pavement, Road joints, Vent cover

국내 시설물의 성능평가는 시설물안전법에 따라 안전성능, 내구성능, 사용성능을 고려하고 있다. 공동구 성능평가 항목선정을 위해 기존문헌(Byun et al., 2022), 공동구 세부지침(안전점검·진단 편)(MOLIT, 2023b), 터널

시설물 세부지침(안전점검·진단 편, 성능평가 편)(MOLIT, 2023b), 상수도관 세부지침(안전점검·진단 편, 성능평가 편)(MOLIT, 2023b) 등을 분석하였으며 Table 2와 같이 3개의 성능항목과 41개의 세부 평가항목을 선정하였다. 선정된 성능항목별 세부 평가항목의 적절성과 타당성 검증을 위해 시설물 유지관리 전문가들을 대상으로 델파이 기법을 통해 최종 세부평가 항목을 선정하였다.

Table 2. Evaluation items by performance

Performance	Subcategory
Safety	Crack, Leakage, Breakage & Damage, Layer separation & Exfoliation, Spalling, Efflorescence, Material segregation, Rebar exposure, Floor condition (subsidence, crack, etc.), Pipeline pressure (internal, external), Valve leakage, Safety factor, Drainage condition, Ground displacement, Seismic design, Road pavement condition
Durability	Depth of carbonation, Chloride circumstance, Quality of cover concrete, Accommodation facility condition (pipeline), Accommodation facility aging (pipeline), Freezing-thawing environment, Condensation
Serviceability	Inspection ease (width, height, etc.), Inspection safety (stepladder condition, fall prevention facilities, etc.), Maintenance ease (work space, bring in equipment, etc.), Accommodation facility (number, utilization), Supplementary facilities (joint, support, condition of rack), Inner environment (humidity, temperature, etc.), Vent cover condition, Potential of an inflow of rain, Intensity of inner brightness, Emergency evacuation time, Fire extinguishing equipment (installation, function), Subsidiary equipment (installation, function), Existence of supplementary facilities (installation, function), Operation of Smart management system

3.2 델파이 기법을 활용한 성능평가 항목 선정

델파이 기법은 하나의 주제에 대해 해당 분야의 전문가들이 의견을 제시하고 이를 다른 전문가들과 환류하는 과정을 반복하여 전문가 패널의 의견을 종합하고 정리하는 조사 연구기법으로 설문지의 횡수가 거듭될수록 예측 혹은 응답 결과가 서로 접근하게 되므로 참가자들이 시간과 공간의 제약을 받으며 직접 모여 논쟁을 하지 않고서도 패널의 합의를 유도해낼 수 있는 조사방법이다(Linstone and Turoff, 1975; Byun et al., 2022). Hong and Seo (2013)에서는 델파이 기법을 크게 4단계로 구분하였다. 1단계에서는 선정하고자 하는 평가항목에 대해 참여자의 대표성, 전문성, 참여자 수 등을 고려하여 전문가 패널을 선정한다. 2단계는 선정하고자 하는 평가항목에 대해 개방형 및 폐쇄형 질문을 하여 전문가들의 의견을 수집한다. 3단계에서는 1차 설문을 분석 및 정리하여 2차 설문지를 개발한 후 전문가들의 의견을 다시 조사한다. 4단계에서는 일련의 조사 과정에서 얻어진 내용들을 최종 정리하고 결과를 해석함으로써 최종 평가항목을 선정한다. 델파이 기법 적용시 안정도(변이계수, coefficient of variance)를 통해 설문 라운딩 횟수를 판단할 수 있는데 일반적으로 변이계수가 0.5 이하인 경우에는 높은 수준의 합의가 이루어진 것으로 판단해 추가 설문이 필요하지 않다. 0.5~0.8인 경우는 비교적 안정적이라 판단하고 0.8 이상인 경우는 추가적인 설문조사가 필요한 것으로 판단한다(Kang, 2008; Choi and Seo, 2011). 그리고 개별문항에 대한 내용 타당도를 검토하기 위해 내용타당도 비율(content validity ratio, CVR)을 바탕으로 분석한다. CVR은

Lawshe (1975)가 제안하였으며 참여 전문가 수에 따라 만족해야하는 최소값이 있으며 Table 3과 같다. 그 최소값 이상이 되었을 때 문항에 대한 내용타당도가 있는 것으로 판단할 수 있으며 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

Table 3. Minimum CVR value according to the number of panels

Number of panels	10	11	12	13	14	15	20
Minimum CVR value	0.62	0.59	0.56	0.54	0.51	0.49	0.42

$$CVR = n_e - \frac{N}{2} / \frac{N}{2} \quad (1)$$

델파이 기법의 타당도는 전문가의 의견수렴과 합의 정도를 분석함으로써 제시할 수 있다. 수렴도는 의견이 한 점에서 모두 수렴하였을 때 0의 값을 가지며 의견이 편차 클 경우 그 값이 커진다. 합의도는 Q_1 과 Q_3 가 일치하여 완전 합의했을 때 1의 값을 가지며 의견의 편차가 클 경우 수치가 감소한다. 즉 수렴도는 0에 가까울수록 합의도는 1에 가까울수록 문항이 타당함을 의미하는 것으로 식 (2)와 같으며 수렴도는 0.5 이하일 때, 합의도는 0.75 이상일 때 전문가 패널들의 의견이 합의점을 찾은 것으로 판단한다(Kang, 2008). 여기서 Mdn 은 중앙값이며 Q_1 과 Q_3 는 각각 제1사분위와 제3사분위 계수로서 전체 25%, 75%의 값을 의미한다.

$$\text{수렴도} = (Q_3 - Q_1)/2, \text{ 합의도} = 1 - (Q_3 - Q_1/Mdn) \quad (2)$$

델파이 기법의 신뢰도 계수는 일반화 가능성 계수로 추정할 수 있는데 이는 Cronbach α 계수와 동일하며 식 (3)과 같이 산정할 수 있으며 0.6 이상인 경우 신뢰도를 인정할 수 있다(Hong and Seo, 2013). 여기서 Ep^2 는 신뢰도 계수, $\sigma^2(p)$ 는 해당 점수 분산, $\sigma^2(\delta)$ 는 해당 점수 상대오차분산이다.

$$Ep^2 = \sigma^2(p) / [\sigma^2(p) + \sigma^2(\delta)] \quad (3)$$

본 연구의 델파이 기법을 통한 세부 평가항목 선정을 위해 전문가 12명을 대상으로 설문조사를 수행하였으며 패널 구성은 해당 분야의 연구기관 8명, 공동구 관리자 2명, 산업체 2명으로 구성하였다. 델파이 조사 결과는 Table 4와 같으며 내용 타당도 비율, 수렴도, 합의도, 안정도, 신뢰도를 산출하였다. 모든 항목에 대하여 수렴도는 0~0.50 사이이며 합의도도 0.75~1.00 사이로 나타나 수렴도와 합의도 모두 개별 문항의 타당성을 확인하였다. 개별 문항에 대한 내용타당도는 설문 대상자 수가 12명일 경우 CVR 값이 0.56 이상일 때 항목에 대한 타당도가 적합한 것으로 판단할 수 있으므로 0.56 미만인 항목들은 제외하였다.

Table 4. Results of Delphi-survey

Performance	Evaluation items	CVR	Convergence	Agreement	Stability	Reliability
Safety	Crack	0.83	0.13	0.95	0.13	0.92
	Leakage	1.00	0.00	1	0.08	
	Breakage & Damage	1.00	0.50	0.8	0.10	
	Layer separation & Exfoliation	0.83	0.50	0.75	0.14	
	Spalling	0.83	0.50	0.75	0.14	
	Efflorescence	-0.17	0.50	0.67	0.21	
	Material segregation	0.83	0.50	0.75	0.14	
	Rebar exposure	1.00	0.50	0.8	0.10	
	Floor condition	0.83	0.50	0.8	0.14	
	Pipeline pressure	0.33	0.50	0.75	0.22	
	Valve leakage	0.50	0.25	0.88	0.22	
	Safety factor	0.83	0.50	0.8	0.14	
	Drainage condition	0.33	1.00	0.5	0.21	
	Ground displacement	0.67	0.50	0.78	0.17	
	Seismic design	0.67	0.50	0.78	0.17	
Road pavement condition	-0.50	0.13	0.92	0.34		
Durability	Depth of carbonation	0.83	0.50	0.8	0.14	
	Chloride circumstance	0.67	0.50	0.75	0.17	
	Quality of cover concrete	0.67	0.50	0.75	0.17	
	Accommodation facility condition (pipeline)	0.67	0.50	0.75	0.17	
	Accommodation facility aging (pipeline)	0.67	0.50	0.75	0.31	
	Freezing-thawing environment	0.00	0.63	0.64	0.34	
	Condensation	0.67	0.50	0.78	0.22	
Serviceability	Inspection ease	0.67	0.50	0.75	0.22	
	Inspection safety	0.67	0.50	0.78	0.17	
	Maintenance ease	0.33	1.00	0.5	0.28	
	Number of Accommodation facility	-0.50	0.25	0.83	0.38	
	Accommodation facility operating rate	-0.17	0.50	0.67	0.26	
	Supplementary facilities condition	0.33	0.63	0.69	0.23	
	Inner environment	0.83	0.13	0.94	0.13	
	Vent cover condition	0.83	0.13	0.94	0.13	
	Potential of an inflow of rain	0.67	0.50	0.8	0.22	
	Intensity of inner brightness	0.50	0.63	0.69	0.19	
	Emergency evacuation time	0.33	1.00	0.5	0.24	
	Existence of fire extinguishing equipment	1.00	0.13	0.95	0.09	
	Functionality of fire extinguishing equipment	0.50	0.63	0.72	0.29	
	Existence of subsidiary equipment	0.83	0.50	0.78	0.14	
	Functionality of subsidiary equipment	0.67	0.50	0.75	0.27	
Existence of supplementary facilities	0.33	1.00	0.5	0.21		
Functionality of supplementary facilities	0.00	0.50	0.71	0.20		
Operation of Smart management system	0.50	0.63	0.75	0.24		

안전성능에서는 백태(-0.17), 관로시설 내외압(0.33), 벨브누수(0.50), 배수상태(0.33), 도로포장상태(-0.50) 항목이 제외되었으며 내구성능에서는 동해환경(0.0) 항목이 제외되었다. 사용성능에서는 보수보강용이성(0.33), 수용시설물 개수(-0.50), 가동율(-0.17), 수용시설물 부속시설상태(0.33), 내부 조명(0.50), 비상대피시간(0.33), 소화시설 기능(0.50), 부대시설 설치유무(0.33), 부대시설 기능(0.0), 스마트유지관리시스템 운영(0.50) 항목이 제외되었다. 델파이 조사의 신뢰도를 측정하는 Cronbach α 계수는 0.92로 높은 신뢰도를 보여주었다. 마지막으로 모든 항목의 안정도(변이계수)가 0.5 이하로 나타나 추가 설문은 진행하지 않았다. 따라서 최종적으로 선정된 세부 평가항목은 Table 5와 같이 안전성능 11개, 내구성능항목 6개, 사용성능 7개로 도출되었다. 사용성능 평가 항목 중 부대설비의 유무와 기능성을 하나의 항목으로 축소하는 것이 합리적일 것이라는 전문가 의견에 따라 부대설비로 통합하였다.

Table 5. Evaluation items by performance

Performance	Evaluation items
Safety	Crack, Leakage, Breakage & Damage, Layer separation & Exfoliation, Spalling, Material segregation, Rebar exposure, Floor condition, Safety factor, Ground displacement, Seismic design
Durability	Depth of carbonation, Chloride circumstance, Quality of cover concrete, Accommodation facility condition (pipeline), Accommodation facility aging (pipeline), Condensation
Serviceability	Inspection ease, Inspection safety, Inner environment, Vent cover condition, Potential of an inflow of rain, Existence of fire extinguishing equipment, Existence of subsidiary equipment, Functionality of subsidiary equipment

4. 공동구 성능평가 항목 가중치 산정

4.1 엔트로피 가중치 산정 방법

다양한 항목을 활용하여 중요도나 취약도를 평가하기 위해서는 엔트로피 가중치, AHP (analytic hierachy process) 등의 방법이 활용된다. 이 방법들은 주관적 가중치 부여 방법과 객관적 가중치 부여 방법으로 분류할 수 있다. 주관적 가중치 방법에는 주로 델파이법, AHP 등이 있으며 객관적 가중치 방법에는 주로 엔트로피 가중치 방법, 주성분 분석법, 변동계수법 등이 있다. 그 중 엔트로피 가중치 산정 방법은 수학적으로 가중치를 산정하기 때문에 객관적으로 가중치를 산정할 수 있다는 장점이 있다(Sun et al., 2022). 이에 본 연구에서는 엔트로피 가중치 산정 방법을 활용하여 성능평가 항목들의 가중치를 산정하고자 한다. 엔트로피란 정보 속성의 다양성으로 결정이 되며 지표 값의 응집도가 클수록 엔트로피 가중치는 크게 산정된다. 엔트로피를 활용하여 가중치를 산정하기 위한 절차는 다음과 같다.

지표의 수를 m , 전문가 수를 n 이라고 가정하면 원래 평가 행렬 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 을 구할 수 있으며, 여기서 r_{ij} 는 평가항목 i 에 대한 전문가 j 의 평가 값을 나타내며 식 (4)를 사용하여 정규화하여 정규화 행렬 $R' = (r'_{ij})_n$ 을

산정할 수 있다.

$$\gamma'_{ij} = \frac{\max_j(\gamma_{ij}) - \gamma_{ij}}{\max_j(\gamma_{ij}) - \min_j(\gamma_{ij})}, (i = 1, 2 \dots n, j = 1, 2 \dots m) \quad (4)$$

데이터를 정규화한 후 식 (5)와 같이 세부지표별 엔트로피 값(H_j)를 산정한다.

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, (i = 1, 2 \dots n, j = 1, 2 \dots m) \quad (5)$$

여기서, $f_{ij} = r'_{ij} / \sum_{i=1}^n r'_{ij}$ 로 산정할 수 있으며 평가항목 r'_i 의 j 번째 전문가 평가 값이 전체 r'_i 값 중에서 차지하는 비율이다. $k = \frac{1}{\ln n}$ 로 산정할 수 있으며 엔트로피 값을 표준화하여 비교 가능하게 만들기 위한 것으로 각 성능항목의 불확실성을 동일한 기준에서 평가할 수 있어 가중치를 계산할 때 일관성과 정확성을 높일 수 있다.

산정된 엔트로피 값을 활용하여 지표 속성 값의 다양성($1 - H_j$)을 산정한 후 식 (6)과 식 (7)과 같이 평가항목 가중치(w_j)와 성능별 평가항목의 상대적 가중치(η_j)를 산정할 수 있다.

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m (H_j)}, (i = 1, 2 \dots n, j = 1, 2 \dots m) \quad (6)$$

$$\eta_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^s w_j} \quad (7)$$

마지막으로 성능항목별 평가항목을 합하면 성능항목 가중치(w_i)를 식 (8)과 같이 산정할 수 있다.

$$w_i = \sum_{j=1}^s w_j, (i = 1, 2 \dots n, j = 1, 2 \dots s) \quad (8)$$

4.2 엔트로피를 활용한 성능평가 항목별 가중치 산정

공동구 성능평가를 위한 선정된 세부 평가항목 24개 지표에 대해 가중치 산정을 위하여 델파이 설문조사에 참여했던 12명의 전문가를 대상으로 설문을 실시하였다. 성능별 가중치 산정 결과는 Table 6과 같이 안전성능(0.66)이 가장 높았으며 사용성능(0.20), 내구성능(0.14) 순으로 나타났다. 세부 평가항목별 가중치 결과는 안전성능의 경우 지반변위(0.15), 균열(0.14), 재료분리(0.12) 순으로 가중치가 높았으며 내구성능의 경우 염해환경(0.22), 결로현상(0.22), 탄산화 깊이(0.15)와 수용시설물 관로 상태(0.15) 순으로 가중치가 높았다. 사용성능의 경우 점검 안전성(0.27), 소방시설(0.19), 맨홀의 덮개 상태(0.13), 점검용이성(0.12) 순으로 나타났다.

Table 6. Results of entropy weight analysis

Performance	Weight	Evaluation items	Weights (w_j)	Relative weights (η_j)
Safety	0.66	Crack	0.09	0.14
		Leakage	0.06	0.09
		Breakage & Damage	0.05	0.08
		Layer separation & Exfoliation	0.06	0.09
		Spalling	0.03	0.05
		Material segregation	0.08	0.12
		Rebar exposure	0.05	0.08
		Floor condition	0.04	0.06
		Safety factor	0.06	0.09
		Ground displacement	0.10	0.15
Seismic design	0.04	0.06		
Durability	0.14	Depth of carbonation	0.02	0.15
		Chloride circumstance	0.03	0.22
		Quality of cover concrete	0.02	0.12
		Accommodation facility condition (pipeline)	0.02	0.15
		Accommodation facility aging (pipeline)	0.02	0.13
		Condensation	0.03	0.22
Serviceability	0.20	Inspection ease	0.02	0.12
		Inspection safety	0.05	0.27
		Inner environment	0.02	0.09
		Vent cover condition	0.03	0.13
		Potential of an inflow of rain	0.02	0.09
		fire extinguishing equipment	0.04	0.19
		subsidiary equipment	0.02	0.12

5. 결론

본 연구에서는 노후화 되고 있는 공동구 시설물에 대한 합리적인 성능개선 대상 선정을 위해 성능평가 항목 및 가중치를 산정하였다.

1. 기존문헌(Byun et al., 2022)과 세부지침(안전점검·진단 편, 성능평가 편)을 검토하여 3개의 성능항목과 24개 세부 평가항목을 선정하였다. 선정된 항목은 공동구가 존재함에 있어 수용시설물을 안전하게 보호할 수 있도록 공동구 본체의 안전에 대한 평가를 수행할 수 있는 항목으로 적절하게 선정되었다. 또한 기존 연구에서 고려되지 않았던 수용시설물의 상태, 노후도와 같은 내구성능과 점점 안전성 및 용이성과 같은 사용자의 편의성도 평가가 가능하도록 하였다.
2. 성능평가 세부 항목별 가중치는 엔트로피 가중치 산정 방법을 통해 산정하였다. 산정된 세부 항목별 가중치는 공동구의 안전성능, 내구성능, 사용성능을 고려한 종합성능을 정량적으로 평가하여 성능개선 대상의 우선순위 선정에 활용할 수 있다.
3. 향후 본 연구에서 제안하는 공동구 성능평가 기준을 통해 성능개선 대상을 선정하고 그 결과를 분석하여 성능평가 기준을 지속적으로 개선한다면 관리자들이 공동구 성능개선 대상 선정 시 보다 합리적인 의사결정에 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 국가연구개발사업(RS-2023-00245334)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

저자 기여도

이용준은 설문조사, 데이터 분석, 원고 작성을 하였으며, 진규남은 원고 검토하였고, 심영종은 연구 개념 및 설계를 하였다.

References

1. Byun, Y.S., Sung, J.H., Cho, G.C. (2022), "Developments of performance-based evaluation criteria of utility tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 24, No. 6, pp. 715-724.
2. Chase, S.B., Adu-Gyamfi, Y., Aktan, A.E., Minaie, E. (2016), Synthesis of national and international methodologies used for bridge health indices, Report No. FHWA-HRT-15-081, Federal Highway Admi-

- nistration, Washington, D.C., pp. 1-44.
3. Choi, H.J., Seo, C.J. (2011), "Study on R&D manpower requirements for the field of pharmaceutical - an application of Delphi method", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 12, No. 3, pp. 1270-1277.
 4. Facility Management System Home page, <http://www.fms.or.kr> (March 1, 2024).
 5. Hong, S.S., Seo, J.H. (2013), "Development of the technology valuation analysis indicators using the Delphi method in the offset program", *Journal of Korea Technology Innovation Society*, Vol. 16, No. 1, pp. 252-278.
 6. Jeong, Y.S., Min, G.H., Lee, I.K., Yoon, I.R., Kim, W.S. (2021), "Comparative study of bridge maintenance: United States, United Kingdom, Japan, and Korea", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 25, No. 5, pp. 114-126.
 7. Kang, Y.J. (2008), *Understanding and application of Delphi techniques*, Research Report, Employment Development Institute, pp. 1-17.
 8. Lawshe, C.H. (1975), "A quantitative approach to content validity", *Personnel Psychology*, Vol. 28, No. 4, pp. 563-575.
 9. Linstone, H.A., Turoff, M. (1975), *The Delphi Method: Techniques and Applications*, Addison Wesley, Boston, pp. 589-614.
 10. MOLIT (2019), *The mater plan for infrastructure maintenance (2020-2025)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, p. 44.
 11. MOLIT (2021), *Special act on safety control for infrastructure*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
 12. MOLIT (2022), *Framework act on sustainable infrastructure management*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
 13. MOLIT (2023a), *National land planning and utilization act*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
 14. MOLIT (2023b), *Guideline and commentary of safety inspection and in-depth safety inspection*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 1-37.
 15. Sun, S., Xu, C., Wang, A., Yang, Y., Su, M. (2022), "Safety evaluation of urban underground utility tunnel with the grey clustering method based on the whole life cycle theory", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 2532-2544.