Research Paper

성능중심의 공동구 평가 기준 개발

변요셉[1] · 성주현[2*] · 조계춘[3]

[1]정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원
[2]비회원, 국토안전관리원 기업성장응답센터 센터장
[3]정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

Developments of performance-based evaluation criteria of utility tunnel

Yo-Seph Byun[1] · Joo-Hyun Seong[2*] · Gey-Chun Cho[3]

[1]Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering Research, KICT
[2]Director, Corporate Partnership Center, KALIS
[3]Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

***Corresponding Author :** Joo-Hyun Seong, bluehill@kalis.or.kr

Abstract

With the enforcement of the infrastructure management act, the importance of utility tunnels that jointly accommodate life-lines such as electricity, communication, water supply, and heating facilities has increased. The currently applied utility tunnel maintenance system is managed in an accident-preventive safety-based evaluation method. However, this evaluation method has limitations in effective maintenance. In this study, performance evaluation items were derived through the Delphi method to suggest a criterion for quantitatively evaluating the performance of utility tunnels, and the weights for each item were calculated through the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. In the future, it is judged that a more reasonable performance evaluation standard of utility tunnel can be prepared if modifications and supplements are made through field application.

Keywords: Utility tunnel, Maintenance, Performance, Delphi, AHP

초 록

최근 기반시설관리법('20.10) 시행으로 전기, 통신, 상수도, 난방 시설과 같은 필수적인 라이프라인(Life-Line)을 공동으로 수용하는 공동구의 중요성이 높아진 실정이다. 현행 공동구 유지관리 체계는 사고예방적인 안전성 위주의 평가방식으로 관리되고 있어 효율적인 유지관리를 실시하는데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 공동구 시설물에 대한 성능을 정량적으로 평가하기 위한 기준을 제안하기 위해 델파이 기법을 통해 성능평가 항목이 도출되었고, 계층화 분석법(AHP)기법을 통해 각 항목들에 대한 가중치가 산정되었다. 향후, 현장적용을 통해 수정 및 보완을 한다면 보다 합리적인 공동구 성능평가

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
24(6)715-724(2022)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.6.715

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received November 9, 2022
Revised November 22, 2022
Accepted November 24, 2022

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://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 ⓒ 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

기준이 마련될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 공동구, 유지관리, 성능, 델파이, 계층화분석법

1. 서 론

최근 기반시설관리법이 시행('20.10)되면서 지하시설물 통합관리로 인한 공동구의 중요성이 높아진 실정이다. 공동구는 전기, 통신, 상수도, 난방 시설과 같은 필수적인 Life-Line을 지하에 공동 수용하는 기반시설물로서 대규모 토지개발사업과 신도시 개발 등에 따라 지속적으로 증가하고 있으나 공동구와 같은 지하시설물 특성상 개보수가 쉽지 않기 때문에 성능중심의 관리를 통한 효율적인 장수명화가 필요하다.

성능중심의 사회기반시설 유지관리체계란 지금까지 시설물의 안전성 위주의 평가에서 나아가 내구성·사용성 등을 종합적으로 평가하는 유지관리 개념으로 확장된 것으로, 이를 통해 시설물의 성능을 체계적으로 평가하고 최적의 유지관리계획을 수립하는 것을 말한다. 이에 따라 최근 사회기반시설에 대해 안전성, 내구성, 사용성 등의 성능을 종합적으로 평가할 수 있는 성능평가에 관한 연구가 진행되었고, 교량, 터널 등과 같은 시설물의 경우 성능평가기준이 이미 마련되었으며, 최근 기반시설관리법이 시행('20.10)되면서 특히 공동구의 중요성이 높아져 공동구의 성능평가기준의 마련이 필요한 실정이다(Ministry of Construction and Transportation & Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, 2021).

이에 본 연구에서의 공동구 시설물에 대한 성능평가 기준을 개발하여 제안하였으며 절차는 다음과 같다. 먼저, 현행 시설물의 안전 및 유지관리 세부지침(Ministry of Construction and Transportation, 2022)의 안전점검·진단 편과 성능평가 편을 검토하였으며, 기존 성능평가의 틀을 유지하여 안전성능, 내구성능, 사용성능으로 구분하여 세부 기준을 개발하는 것으로 국내 실정에 적합하고, 객관적이며 합리적인 평가기준을 제시하고자 하였다. 이를 위해 성능평가의 틀은 종합성능 평가를 위해서 내구성능과 사용성능은 최저등급을 결과로 활용하는 것으로 고려하였고, 안전성능의 경우, 상태안전성능의 평가결과와 구조안전성능의 평가결과 중 최저등급으로 산정하는 것으로 고려하였다. 이때 공동구 성능평가를 위해 고려해야 할 평가항목을 델파이 기법을 활용하여 도출하였고, 각 성능과 상태안전성능의 평가항목들의 가중치는 AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법을 활용하여 산정하였다.

2. 연구방법

공동구의 성능평가 실시 범위에 대한 세부적인 대상시설은 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단 편) 공동구 시설물에 따라 Table 1과 같이 선정하였다. 공동구 수용시설의 부속시설은 공동구내 수용시설을 설치 및 점용하기 위해 공동구 본체에 설치된 구조부재(이음부, 지지대, 받침대)를 대상으로 선정하였다.

Table 1. Details of target facilities

Classification	Object facility
Main facilities	Main utility tunnel (wall structure, slab, floor, entrance, branch sphere, vent)
Etc.	Supplementary facilities (joint, support, condition of rack)
	Subsidiary equipment
	Surrounding environment

공동구 성능평가 항목선정을 위해 안전성능, 내구성능을 평가할 수 있는 항목을 도출하고자 델파이 기법을 활용하였다. 델파이 기법은 하나의 주제에 대해 해당 분야의 전문가들이 의견을 제시하고 이를 다른 전문가들과 환류하는 과정을 반복하여 전문가 패널의 의견을 종합하고 정리하는 조사 연구기법으로 설문의 횟수가 거듭될수록 예측 혹은 응답결과가 서로 접근하게 되므로 참가자들이 시간과 공간의 제약을 받으며 직접 모여 논쟁을 하지 않고서도 패널의 합의를 유도해낼 수 있는 조사방법이다(Linstone and Turoff, 1975). 델파이 기법을 활용하기 위해 가장 중요한 사항은 전문가 패널을 구성하는 것으로서 그 수에 대한 명확한 규정은 없으나 결과의 신뢰성을 최대화시키기 위해서는 패널의 위원 수가 최소한 10명 이상의 필요조건을 충족시켜야 하고(Ewing, 1991), 10～15명의 소집단 패널만으로도 유용한 결과를 얻을 수 있다(Ziglio, 1996). 설문의 안정성 평가는 각 자료의 평균과 표준편차를 동시에 고려한 변동계수(Coefficient of Variation, COV)를 사용하는데 0과 1사이의 값을 가지게 되고 그 수치가 작을수록 자료들의 평균 주위에 보다 가깝게 분포되어 있다고 볼 수 있다.

델파이 설문에 앞서 각 성능별 평가항목(안)을 도출하기 위하여 현행 공동구 세부지침, 터널 시설물 세부지침·성능평가 등을 분석하여 Table 2와 같이 3개의 대분류 영역과 35개 세부 평가항목을 선정하였고, 이를 예비 조사 평가 항목으로 사용하여 설문 응답자의 심리적 부담과 혼란을 최소화하였다.

Table 2. Preliminary items

Performance		Subcategory
Safety	Visual condition	Crack, Leakage, Breakage & Damage, Spalling, Layer separation & Exfoliation, Efflorescence, Material segregation, Rebar exposure, Rear side cavity, Drainage condition, Ground condition
	Structural	Factor of safety (normal/earthquake), Displacement, Stress
Durability	Reinforced concrete	Quality of cover concrete, Chloride content, Depth of carbonation, Chloride circumstance, Freezing damage circumstance
Serviceability		Supplementary facilities (joint, support, condition of rack), Condensation, Stepladder condition, Condition of equipment hatch, Fire extinguishing equipment, Flame retardant of cable, Drainage pump, Potential of an inflow of rain, Manhole condition, Condition of cable rack, Existence of supplementary facilities, Functionality of supplementary facilities, Intensity of brightness, Intensity of illumination, Vent cover condition, Emergency evacuation time

또한 이를 바탕으로 2회에 걸친 델파이 조사를 실시하여 성능평가를 위한 항목의 적절성과 타당성에 대한 의견을 수렴하였다. 본 연구에서는 델파이 기법 적용을 위해 전문가 패널 구성은 해당 분야의 연구기관, 학계, 산업체 등에 종사하고 있는 12명의 전문가를 대상으로 하였다(Table 3).

Table 3. Field of the panels

Field	Research institute	Academia	Industry
Personnel organization	5	4	3

1차 델파이 조사에서는 예비조사에서 도출된 성능별 항목에 대한 필요성을 평가하기 위한 단계로서 예비조사에서 선정한 항목들 중 포함되거나 제거될 필요가 있는 항목들에 대하여 전문가들의 폭넓은 의견을 수렴하는 단계이다. 1차 델파이 조사의 질문 형태는 개방형 질문과 구조화된 폐쇄형 질문을 함께 구성하여 보다 적극적인 의견수렴을 수행하였고, 2차 델파이 조사에서는 1차 델파이 조사에서 얻어진 결과 및 자문회의를 통해 유사한 항목을 통합하거나 추가 및 제거하여 수정 및 보완하였으며, 질문 형태는 폐쇄형 질문으로 구성하였다. 그리고 개별 문항에 대한 내용 타당도를 검토하기 위해 내용타당도 비율(Content Validity Ratio, CVR)값으로 산출하였는데, Lawshe (1975)는 델파이 설문 대상자 수가 12명일 경우 내용 타당도 기준을 0.56 이상일 때 항목에 대한 내용 타당도가 적합한 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 전문가 패널의 수가 12명이므로 0.56 이상으로 설정하였다. 내용 타당도 비율은 식 (1)에 의해 산출된다.

$$CVR = \frac{n_e - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \tag{1}$$

여기서, n_e는 '중요하다'고 응답한 전문가의 수, N은 전체 델파이 설문을 위한 전문가 패널의 인원수를 의미한다. 안정도는 패널 응답의 일치성이 높은 경우 안정도가 확보된 것을 의미하는데 변동계수로 평가하였으며, 합의도는 사분편차와 중앙값을 이용하여 응답자 사이의 합의가 얼마만큼 이루어졌는가를 검증하는 방법(일반적으로 1 이하이면 합의가 이루어진 것으로 판단)으로 평가하였다. 또한 델파이 설문을 통하여 도출된 최종 성능평가항목을 대상으로 공동구 성능평가 항목에 대한 가중치 산정을 위한 중요도를 산출하기 위해서 다중의사결정기법으로 사용하고 있는 AHP 기법을 활용하였다. AHP 기법은 적용이 용이하고 계층적 평가구조에 따라 척도산정, 가중치 산정절차가 이론적으로 높이 평가되고 있어 각 분야의 집단의사결정 지원시스템으로 광범위하게 활용되고 있다. AHP 기법은 의사결정 문제를 계층화한 후 상위 계층에 있는 평가 요소의 관점에서 하위 계층에 있는 요소들의 상대적 중요도를 쌍대비교에 의해 측정한다(Saaty, 1977). 이러한 방식을 통해 AHP는 궁극적으로 최하위 계층에 있는 대안들의 가중치 또는 우선순위를 구할 수 있도록 한다. AHP는 정량적인 요소 뿐만 아니라 정성적인

요소도 동시에 평가할 수 있으며, 평가자로 하여금 쌍대비교를 통해서 한 번에 둘 씩 비교하게 함으로써 평가를 수월하게 해주고, 평가자의 의견에 관한 일관성을 검증할 수 있는 방법이 있어서 평가결과의 신뢰성을 높일 수 있다. AHP기법을 적용하기 위해 전문가 패널 구성 시, 합리적 중요도를 산정하고자 현업 실무에서 점검 및 진단을 실시하고 있는 12명의 전문가 집단에 설문조사를 실시하였다. 계층 내 비교항목의 쌍대비교를 통해 항목 간의 상대 중요도를 수치화하기 위해 9점 척도를 이용하였다. 12명의 전문가 집단으로부터의 설문조사를 회수했으며 통상적으로 설문결과의 일관성을 판단할 수 있는 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)이 20% 이내인 설문결과를 분석하였고 집계된 설문을 토대로 결과 분석하였다. 본 논문에서는 AHP 기법을 적용하기 위해 성능 별 계층도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Hierarchy model of AHP

3. 결과 및 분석

3.1 성능평가항목 선정

1차 델파이 조사에서는 패널 12명 중 12명의 설문지가 회수되었으며 내용 타당도 비율(CVR), 수렴도 합의도를 산출하였으며 그 결과는 Table 4에서 보는 것 같다. 상태안전성능항목에서는 배면공동유무(CVR = -0.111), 배수상태(CVR = 0.333), 지반상태(CVR = -0.333), 구조안전성능항목에서는 변위(CVR = 0.500), 응력(CVR = 0.333), 내구성능항목에서는 동해환경(CVR = 0.200), 사용성능항목에서는 우수 유입 가능성(CVR = 0.167), 공동구 내 조도(CVR = 0.200), 공동구 내 휘도(CVR = 0.200), 자재반입구 상태(CVR = 0.333), 비상대피 시간(CVR = 0.333), 환기구 덮개상태(CVR = 0.500), 맨홀상태(CVR = 0.500) 등이 제외되었고, 2차 델파이 조사에서는 Table 5에서와 같이 상태안전성능항목에서는 백태(CVR = 0.500) 등이 제외되었다.

1차 및 2차 델파이 조사를 통해 공동구 성능평가 항목은 최종적으로 Table 6과 같이 도출되었다. 사용성능항목은 자문의견 및 연구진 의견에 근거하여 부대설비의 유무와 부대설비의 기능성을 하나의 항목인 부대설비로 통합하였으며, 케이블 난연화와 배수펌프는 방재시설에 포함시켰다. 최종적으로 상태안전성능항목 7개, 구조안전성능 1개, 내구성능 4개, 사용성능 4개 항목으로 도출되었다.

Table 4. Results of 1st Delphi-survey

Performance	Evaluation items		Convergence	Agreement	CVR
Visual condition safety	Crack		0.5	0.867	1.000
	Leakage		0.625	0.821	1.000
	Breakage & damage		0.625	0.821	0.833
	Spalling		1	0.714	0.667
	Layer separation & Exfoliation		0.5	0.875	0.833
	Efflorescence		1	0.714	0.714
	Material segregation		1.125	0.719	0.667
	Rebar exposure		0.875	0.750	1.000
	Rear side cavity		0.5	0.800	-0.111
	Drainage condition		1.5	0.5	0.333
	Ground condition		1.25	0.5	-0.333
Structural safety	Factor of safety	Normal	0.125	0.964	1.000
		Earthquake	0.375	0.906	1.000
	Displacement		0.75	0.786	0.500
	Stress		1	0.667	0.333
Durability	Quality of cover concrete		1	0.750	0.714
	Chloride content		1	0.714	0.714
	Depth of carbonation		1.25	0.643	0.714
	Chloride circumstance		0.75	0.800	0.833
	Freezing damage circumstance		1.375	0.542	0.200
Serviceability	Supplementary facilities		1	0.714	0.833
	Stepladder condition		1.125	0.719	0.667
	Condensation		0.5	0.857	0.778
	Vent cover condition		1.125	0.654	0.500
	Fire extinguishing equipment		0.625	0.821	0.667
	Flame retardant of cable		1	0.714	0.667
	Fire extinguishing equipment		0.5	0.857	0.667
	Potential of an inflow of rain		1.625	0.500	0.167
	Manhole condition		0.625	0.808	0.500
	Condition of cable rack		0.625	0.792	0.667
	Existence of supplementary facilities		0.625	0.833	0.667
	Functionality of supplementary facilities		1	0.733	0.667
	Intensity of illumination		1.375	0.542	0.200
	Intensity of brightness		1	0.692	0.200
	Condition of equipment hatch		1.125	0.625	0.333
	Emergency evacuation time		1.5	0.571	0.333

Table 5. Results of 2nd Delphi-survey

Performance	Evaluation items		Convergence	Agreement	CVR
Visual condition safety	Crack		1	0.733	1.000
	Leakage		1	0.733	1.000
	Breakage & damage		0.5	0.875	0.818
	Spalling		0.5	0.846	0.800
	Layer separation & Exfoliation		1	0.714	0.667
	Efflorescence		0.75	0.769	0.500
	Material segregation		0.875	0.750	0.800
	Rebar exposure		0.875	0.767	0.800
Structural safety	Factor of safety	Normal	0.625	0.844	0.833
		Earthquake	0.625	0.821	0.833
Durability	Quality of cover concrete		0.625	0.821	0.833
	Chloride content		1.625	0.500	0.333
	Depth of carbonation		0.5	0.867	1.000
	Chloride circumstance		0.5	0.857	0.833
Serviceability	Supplementary facilities		1	0.714	0.714
	Stepladder condition		1.25	0.643	0.714
	Condensation		0.5	0.875	0.600
	Fire extinguishing equipment		1	0.692	0.667
	Flame retardant of cable		0.5	0.857	0.778
	Fire extinguishing equipment		0.5	0.875	1.000
	Condition of cable rack		1	0.714	0.778
	Existence of supplementary facilities		1	0.692	0.833
	Functionality of supplementary facilities		0.625	0.821	0.667

Table 6. Evaluation items by performance

Performance		Evaluation items
Safety	Visual condition	Crack, Leakage, Breakage & Damage, Spalling, Layer separation & Exfoliation, Material segregation, Rebar exposure
	Structural	Factor of safety (normal/earthquake)
Durability	Reinforced concrete	Quality of cover concrete, Chloride content, Depth of carbonation, Chloride circumstance
Serviceability		Supplementary facilities, Stepladder condition, Condensation, Fire extinguishing equipment, Flame retardant of cable, Fire extinguishing equipment, Condition of cable rack, Existence of supplementary facilities, Functionality of supplementary facilities

3.2 성능평가항목 가중치 선정

성능 별 중요도 산정은 전문가 설문 결과를 바탕으로 AHP 계층분석을 수행하여 Table 7과 같이 안전성능의 중요도가 0.60, 내구성능과 사용성능이 0.20의 중요도를 보여 안전성능이 성능 중에서 우선순위가 가장 높은 항목으로 나타났으며, 내구성과 사용성은 동일한 순위로 나타났다.

Table 7. Results of AHP analysis

Performance	Weight	Ranking
Safety	0.60	1
Durability	0.20	2
Serviceability	0.20	2

상태안전성능, 구조안전성능, 내구성능, 사용성능 중에서 결함지수 산정을 위해 가중치가 필요한 항목인 상태안전성능평가 항목에 대해 AHP 분석을 통해 중요도를 도출하였다. 상태안전 성능의 항목별 중요도는 Table 8과 같이 균열의 중요도가 0.281로 상대적으로 가장 높은 중요도를 보였고, 누수(0.246) 파손 및 손상(0.140), 철근노출(0.140), 층분리 및 박락(0.088), 재료분리(0.053), 박리(0.052) 순으로 나타났다.

Table 8. Results of AHP analysis (evaluation items)

Evaluation items	Weight	Ranking
Crack	0.281	1
Leakage	0.246	2
Breakage & Damage	0.140	3
Spalling	0.052	7
Layer separation & Exfoliation	0.088	5
Material segregation	0.053	6
Rebar exposure	0.140	3

4. 공동구 상태안전성능평가 기준 제안

공동구 상태안전성능평가 기준을 제안하기 위해 델파이 기법을 적용하여 도출한 성능평가항목과 AHP 분석을 통해 도출한 성능평가항목별 가중치로 활용하여 평가점수를 산정한 결과 Table 9와 같이 제안하였다. 공동구의 상태안전성능 평가를 위한 결함점수는 평가기준에 따른 평가점수를 합산하여 산정하며, 산정된 결함점수를 가중치의 합계로 나누어 산정하도록 하였다. 평가기준은 5단계로 세분하였고, 평가항목별 상태안전성능 평가기준은 공동구의 안전성 평가기준과 차이를 두기 위하여 소문자 a, b, c, d, e로 표기하는 것으로 하였다.

Table 9. The evaluation items score of proposed utility tunnel

Evaluation items	a	b	c	d	e	Weight (w)
	0 ≦ f < 0.15	0.15 ≦ f < 0.30	0.30 ≦ f < 0.55	0.55 ≦ f < 0.75	0.75 ≦ f	
Crack	0	4	7	11	16	16
Leakage	0	3	6	9	14	14
Breakage & Damage	0	2	4	6	8	8
Spalling	0	1	2	3		3
Layer separation & Exfoliation	0	1	2	3	5	5
Material segregation	0	1	2	3		3
Rebar exposure	0	2	4	6	8	8

5. 결 론

본 연구에서는 공동구 성능평가 기준을 마련하기 위해 델파이 기법을 통해 성능평가항목을 도출하고 AHP 기법을 통해 각 성능평가항목 별 중요도를 산정한 결론은 다음과 같다.

1. 현행 시설물의 안전 및 유지관리 세부지침의 안전점검·진단 편과 성능평가 편을 검토하여 3개의 대분류 영역과 35개 세부 평가항목을 선정하였고, 해당 분야의 연구기관, 학계, 산업체 등에 종사하고 있는 12명의 전문가를 대상으로 2회에 걸친 델파이 조사를 실시하여 성능평가를 위한 항목의 적절성과 타당성에 대한 의견을 수렴하여 상태안전성능항목 7개, 구조안전성능 1개, 내구성능 4개, 사용성능 4개 항목으로 도출되었다.
2. 성능평가항목별 중요도는 AHP 기법을 적용하여 중요도를 산정하였고, 이를 평가점수를 산정하는데 활용하여 공동구의 성능을 정량적으로 평가하기 위한 기준을 제안하였다.
3. 향후, 현장적용을 통해 수정 및 보완을 한다면 보다 합리적인 성능중심의 공동구 성능평가 기준을 마련할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 통해 공동구의 성능중심 유지관리 체계 수립시에 합리적인 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 사회복합재난대응기술개발사업(과제번호: 20018374)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

저자 기여도

변요셉은 연구 방법론 및 데이터 분석, 원고 작성을 하였고, 성주현은 연구 개념 및 설계를 하였고, 조계춘은 원고 검토를 하였다.

References

1. Ewing, D.M. (1991), “Future competencies needed in the preparation of secretaries in the state of Illinois using the Delphi technique”, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, pp. 40-48.
2. Lawshe, C.H. (1975), “A quantitative approach to content validity”, Personnel Psychology, Vol. 28, No. 4, pp. 563-575.
3. Linstone, H.A., Turoff, M. (1975), The Delphi Method: Techniques and Applications, Addison Wesley, Boston, pp. 589-614.
4. Ministry of Construction and Transportation & Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (2021), Guideline of the safety control and maintenance of establishments (performance), p. 2.
5. Ministry of Construction and Transportation (2022), Guideline of the safety control and maintenance of establishments, pp. 1-38.
6. Saaty, T.L. (1977), “A scaling method for priorities in hierarchical structures”, Journal of Mathematical Psychology, Vol. 15, No. 3, pp. 234-281.
7. Ziglio, E. (1996), The Delphi method and its contribution to decision-making, M. Adler & E. Ziglio (eds.), Gazing into the Oracle: The Delphi Method and Its Application to Social Policy and Public Health, Jessica Kingsley Publishers, London, pp. 3-33.