

# 공용중인 터널의 성능중심 평가기법 개발

안재욱<sup>1</sup> · 김홍균<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국시설안전공단 경영혁신실 책임연구원

## Developments of performance-based assessment technique for existing tunnels

Jai-Wook An<sup>1</sup>, Hong-Kyoon Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Research Institute for Infrastructure Performance, Researcher

<sup>2</sup>Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, management & innovation section, Senior Researcher

**ABSTRACT:** The purpose of current tunnel maintenance system in South Korea is safety-based maintenance system for accident prevention, So it is difficult to conduct a strategic maintenance. The development of a new maintenance system can lead to effective investment of limited financial and it's effort is still in progress. In this study, to develop a performance-based assessment method, indexes for assessment are derived taking into account the safety, durability and serviceability. The indexes for performance-based assessment were selected by a literature analysis and a delphi survey. Then the importance among indexes were calculated by the AHP analysis.

**Keywords:** Tunnel, Performance-based assessment, Delphi survey, AHP

**초 록:** 기존의 터널 유지관리 체계는 결함 및 손상부위의 보수 또는 설계기준을 충족하기 위한 보강 등 사고예방적인 안전성 중심의 유지관리방식으로 관리되고 있어 효율적이고 전략적인 유지관리를 실시하는데 한계를 보이고 있다. 현재 국가연구를 통해 터널의 성능저하를 예측, 평가하여 한정된 재정을 효율적으로 투자할 수 있도록 성능중심의 유지관리체계로의 전환을 시도하고 있다. 본 연구에서는 터널시설물을 중심으로 기존의 안전중심의 유지관리 체계에서 구조적 안전은 물론이며, 서비스수준 및 내구성능 등의 성능저하를 고려한 터널시설물의 성능중심 평가체계의 개발을 위하여 성능평가를 위한 평가지표를 도출하고자 한다. 성능중심 평가기법 개발을 위한 평가지표는 문헌자료 분석 및 델파이 설문을 통하여 선정하였으며, 평가지표간의 중요도는 AHP 분석을 통해 산정되었다. 본 연구결과는 터널시설물의 성능중심 유지관리 체계에 적용되어 터널의 유지관리 시 합리적인 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어:** 터널, 성능평가, 델파이 설문, AHP 분석

## 1. 서론

1970년대부터 시작된 건설 붐으로 인하여 사회기반시설(SOC)의 노후화는 진전되고 있는 실정이며, 이에 따라 유지관리에 사용되는 비용도 세계적으로 증가하고 있는 실정이다. 이와 같이 사회기반시설(SOC)의 유지관리에 대한 사회적관심이 증가됨에 따

라 유지관리 비용을 효율적으로 활용하기 위하여 구조적인 안전성 확보와 동시에 내구성능 및 서비스 수준의 평가를 실시하고자 한다. 이를 통해 시설물의 성능중심 유지관리체계로 전환하여 시설물의 성능저하를 사전에 예측하고 적절한 시기와 장소에 예산을 투자할 수 있는 성능중심의 평가체계 마련이 필요한 시점이다.

최근 들어 국가 경제성장을 위해서는 사회기반시설을 위한 지속적인 투자가 이루어져야 한다는 발표가 이어지고 있으며, 미국과 캐나다, 호주를 비롯한 여러 국가에서 사회기반시설물의 성능을 평가하기 위한

\*Corresponding author: Hong-Kyoon Kim  
E-mail: bossvirus@kistec.or.kr

Received September 22, 2016; Revised October 26, 2016;  
Accepted November 16, 2016

연구가 지속적으로 수행되고 있다.

미국의 경우에는 ASCE (Averican Society of Civil Engineers)에서 인프라 평가보고서(Report Card)를 매년 발간하고 해당 보고서를 통하여 SOC 시설물의 유지관리를 위한 국가차원의 관심과 투자를 지속적으로 추진해오고 있다.

Kang (2013) 등은 인프라 평가보고서(Report Card)를 발간하는 국가들을 대상으로 각 국가의 인프라 평가 체계의 비교·분석을 실시하여 국내로의 도입방향을 제시하였으며, 해당 보고서에 따르면 각국마다의 목적 및 사용환경 등에 따라 성능을 평가하는 평가지표가 상이한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 우리나라의 실정에 적합한 성능평가지표를 도출하는 것이 바람직할 것이다.

본 연구는 터널시설물을 중심으로 성능평가를 위한 성능항목을 결정하고 각 항목별 성능지표를 도출하기 위하여 터널분야의 전문가들을 대상으로 델파이분석을 수행하였으며, 도출된 각 성능지표를 대상으로 AHP분석을 실시하여 각 성능지표별 중요도를 도출하였다.

## 2. 연구방법

터널의 성능항목별 평가지표를 도출하기 위하여 델파이 기법을 활용하였다. 델파이 기법은 동일한 패널을 대상으로 반복적인 설문을 실시하고 각 패널로부터 도출된 결과를 공유함으로써 설문의 횟수가 반복됨에 따라 분산된 의견의 합의점을 도출하는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 터널분야 전문가로 이루어진 패널의 합의를 도출하고자 총 3차례의 델파이 설문을 수행하였다. 델파이 기법을 활용하기 위해 기존의 선행연구 및 문헌조사를 통해 예비평가지표를 도출하였으며, 전문가의 다양한 의견을 수렴하고자 개방형과 폐쇄형이 혼합된 형태의 1차 델파이 조사를 수행하였다.

2, 3차 델파이 조사에서는 폐쇄형 질문을 통해 각

성능지표간의 중요도에 대한 전문가 집단의 의견을 분석하여 최종 성능평가지표를 도출하였다. 본 연구에서 수행한 델파이 조사의 절차는 Table 1과 같다.

델파이 설문을 위하여 전문성, 성실성 등을 고려하여 전문가 패널을 구성하였다. 델파이 기법에서 전문가 집단인 패널의 규모에 대한 명확한 규정은 없으나, 델파이 연구의 신뢰도와 델파이 패널의 크기 간에는 함수관계가 성립한다. 델파이 분석을 위한 패널의 수가 13명 이상일 때에는 전후 질문지 간의 과정 신뢰도(process reliability)는 전혀 문제가 되지 않으며, 평균 0.80 이상의 높은 상관관계를 보인다(Na, 1999).

델파이 분석의 신뢰성을 최대화시키기 위해서는 패널의 수가 최소한 10명 이상이어야 하며(Ewing, 1992), 10~15명의 패널만으로도 유용한 결과를 얻을 수 있다(Ziglio, 1996).

본 연구에서는 연구기관, 학계, 산업체 등에 종사하고 있는 터널분야 전문가를 대상으로 총 14명의 전문가 패널을 구성하였다. 전문가는 연구기관 10명, 학계 2명, 산업체 2명이며, 델파이 조사에서는 전문가의

Table 1. Delphi Survey Process

Order	Contents
Pretest	·Literature survey about a tunnel evaluation method and related research ·Categorization and classification of the evaluation item
Panel Selection	·Composition of experts panel (Academia, Industry, Research Institute)
Primary Survey	·Consists of the open and closed questions
Primary Analysis	·Obtain the preliminary evaluation indexes by assessment of CVR (Content Validity Ratio) and open survey
Secondary Survey	·Reevaluation of the primary research index ·Add the performance evaluation indexes
Secondary Analysis	·Calculation of Median, quartile (IQR) and frequency analysis
Third Survey	·Reevaluation of the Secondary research index
Third Analysis	·Review for CVR and agreement ·Obtain of final performance evaluation indexes for AHP analysis

**Table 2.** Personnel organization for delphi research

Field	Research Institute	Academia	Industry
Personnel organization	10	2	2

**Table 3.** Career of the panel

Career	10~15 years	Over 15 years
Personnel organization	4	10

자질이 매우 주요한 요소(Kwon, 2008)이므로 패널의 경력을 고려하여 관련분야 경력 10년에서 15년 사이의 전문가가 4명, 관련분야 경력 15년 이상 전문가 10명으로 Table 2, 3과 같이 구성하였다.

1차 델파이 설문지는 개방형과 폐쇄형이 혼합된 형태로 작성하였다. 개방형 문항의 경우 평가지표에 대한 전문가들의 추가의견을 수렴하고자 하였으며, 폐쇄형 문항의 경우 문헌자료 검토에서 도출된 평가지표가 성능평가를 위한 지표에 부합하는지 평가하도록 구성하였다. 1차 델파이 설문에 의한 전문가 의견은 2차, 3차 설문지 작성 시 폐쇄형으로 구성하여 설문을 수행하였다.

폐쇄형 설문에 대한 전문가 의견을 반영하여 1차 성능평가지표를 선정하고 2차 델파이 조사 시 반영하기 위해 내용타당도를 검증하였다.

내용타당도(Content Validity)는 내용타당도 비율(Content Validity Ratio : CVR)을 사용하여 검증한다. CVR 값은 패널의 수에 따라 최소값을 제시하고 있으며, 최소값 이상이 되었을 때 전문가들의 의견에 대한 내용타당도가 있는 것으로 판단한다. 내용타당도는 다음 식 (1)에 의해 산정된다(Lawshe, 1975).

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

여기서,  $n_e$ 는 타당하다고 응답한 패널의 수이며  $N$ 은

**Table 4.** Minimum CVR by respondents

Respondents	CVR	Respondents	CVR
10	0.62	20	0.42
11	0.59	25	0.37
12	0.56	30	0.33
13	0.54	35	0.31
14	0.51	40	0.29
15	0.49	-	-

연구에 참여한 전체 델파이 패널의 수를 의미한다. 성능평가에 타당한 평가지표라고 응답한 패널의 수가 100%일 때 CVR 값은 1.0, 50%일 때 CVR 값은 0, 50%보다 적을 때는 음수로 표현된다.

즉, 타당하다고 응답한 패널의 수가 50~100%일 때 CVR 값은 0~1.0에 위치하게 되며 이러한 CVR 값은 Schipper가 제시한 데이터에 의해 패널의 수에 따라 Table 4와 같이 최소값을 결정할 수 있다(Lawshe, 1975).

2차 델파이분석에 대하여 평균, 표준편차, 중앙값(중앙치), 최빈값(최빈치) 및 CVR 값을 산정하고 항목의 타당성과 패널들의 의견 수렴여부를 평가하기 위하여 합의도(Agreement)를 평가하였다.

합의도는 4분편차와 중앙값을 이용하여  $Q_3$ 과  $Q_1$  사이의 값을 도식화함으로써 응답자들 사이의 합의가 얼마만큼 이루어 졌는가를 검증하는 방법으로 합의도가 0.7인 경우 4분범위와 중앙값의 비가 0.3이란 것으로 중간 50%의 응답자의 간격이 중앙값을 중심으로  $0.3 \times$ 중앙값 범위에 존재하는 것을 의미한다.

만약에 A의 합의도가 0.9이면 중간 50%의 응답자가  $0.1 \times$ 중앙값 범위에 존재하게 되는 것을 의미하므로 0.7보다 0.9가 조사자의 응답이 합의된 것으로 판단할 수 있다. 합의도는 다음 식 (2)에 의해 산정된다(Kim, 2015).

$$1 - \frac{Q_3 - Q_1}{M_d} \quad (2)$$

여기서, Q3은 3/4분위수, Q1은 1/4분위수, Md는 중앙값이다. 사분위수(IQR)은 중위수를 중심으로 패널 응답의 분산을 나타내는 척도 식 (3)에 의하여 산정되며, 일반적으로 1.0 이하면 합의가 이루어진 것으로 여겨진다(Upton, 1996).

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (3)$$

3차 델파이설문은 2차 설문결과에 대한 통계분석 결과 즉, 패널의 집단의 방향(Group trends)에 대한 피드백을 포함하였다. 평가지표별 중요도를 재평가하기 위하여 다른 패널의 의견을 참고할 수 있도록 2차 설문결과에 대한 중앙값 및 사분범위를 표시하였다. 그리고 자문의견이 다수의 의견과 다른 경우에는 그 의견을 제시할 것을 요청하였다. 그 결과를 취합하여 최종적인 성능평가지표를 도출하였다.

델파이 설문을 통하여 도출된 성능평가지표는 터널의 형식 및 특성에 알맞게 분류되었으며, 각 성능평가지표별 중요도를 선정하기 위하여 상태안전성 평가지표를 중심으로 AHP (Analytic Hierarchy Process) 설문을 실시하였다.

터널을 구성하고 있는 가장 중요한 부재는 라이닝이며 시공방법에 따라서 시공되는 라이닝에 차이가 있다. 터널의 용도와 시공방법 및 라이닝의 재질에 따라서 터널을 분류하면 Fig. 1과 같다.

AHP 분석의 특징은 복잡한 문제를 계층화 하고, 계층구조를 구성하고 있는 요소간의 쌍대비교를 통하여 중요도를 도출하는데 있다.

관련문헌을 살펴보면, Sung (2013) 등은 쉐드 TBM

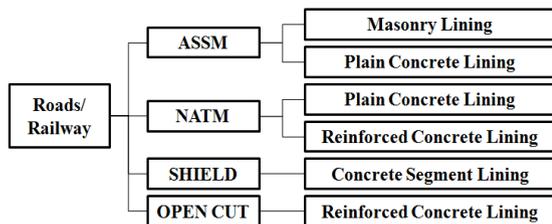


Fig. 1. Classification of the tunnel by material

터널의 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼을 개발하기 위하여 기존 국내 외 터널의 유지관리 체계를 분석하고 AHP 분석을 활용하여 쉐드 TBM 터널의 평가항목별 평가점수를 제시하였다.

또한, Kimura et al. (2012)는 공용중인 철도터널을 대상으로 성능중심 평가방법을 제안하였으며, 제안된 평가방법은 터널과 관련된 성능을 총 7개(사용자 안전성, 사용성, 구조적 안전성, 내구성, 관리의 용이성, 유지관리성, 주변영향)의 카테고리로 분류하였으며, 각 성능의 평가요소의 가중치를 결정하기 위하여 AHP 기법을 활용하였다. AHP 분석의 특징은 복잡한 문제를 계층화 하고, 계층구조를 구성하고 있는 요소간의 쌍대비교(paired comparison)를 통하여 중요도를 도출하는데 있다. 일반적으로 AHP는 Fig. 2와 같은 단계로 구성된다.

국내의 터널분야 전문가 15명을 대상으로 AHP 설문을 실시하였으며, 대상 전문가의 연령대는 50대 8명, 40대 6명, 30대 1명으로 터널분야 경력 15년 이상의 전문가로 구성하였다. AHP 설문 대상 전문가 구성은 Table 5, 6, 7과 같다.

안전성의 등급은 상태안전성의 평가결과와 구조안

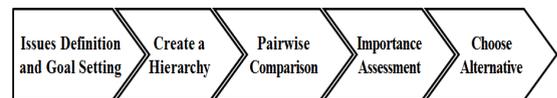


Fig. 2. Procedures of AHP analysis

Table 5. Ages of the panels

Ages	Fifty's	Forty's	Thirty's
Personnel organization	8	6	1

Table 6. Career of the panels

Career	15~20 years	Over 20 years
Personnel organization	10	5

Table 7. Field of the panels

Field	Research Institute	Industry	Academia
Personnel organization	12	2	1

전성 평가결과의 비교를 통해 최저의 성능등급을 최종적으로 안전성등급으로 선정하게 된다. 구조안전성은 안전을 또는 허용응력, 변위 등의 해석적 결과에 따라 등급이 결정됨으로 AHP를 통한 가중치 산정은 상태안전성 평가지표에만 적용하는 것으로 하였다.

### 3. 성능평가지표

터널의 성능별 예비 평가항목을 도출하기 위하여 국내·외 터널 평가지침, 가이드라인 및 기준과 연구사례 등을 조사하고 분석하였다.

국내의 경우 「안전점검 및 정밀안전진단 세부지침」을 통해 터널의 안전성을 평가하고 있으며, 건설교통부(2001)에 따르면 일본의 「도로 및 철도터널기준」, 미국의 「콘크리트 구조물 유지관리기준」, 오스트리아의 「세그먼트 손상 분류 및 관리기준」 등 여러 국가에서 다양한 평가지표를 통해 터널을 평가하고 있다.

선행적으로 실시한 국내·외 문헌자료 분석결과 총 47개의 예비 성능평가지표가 도출되었다. 성능항목은 안전성, 내구성, 서비스성능으로 분류되며 이 중 안전성 평가지표는 25개로 가장 많은 항목이 도출되었고 내구성능과 서비스성능 평가지표는 11개로 각각 분석되었다.

본 연구에서는 14명의 패널이 설문에 응답하였으며, 그에 따른 내용타당도(CVR 값)는 0.51 이상을 기준으로 하였다. 앞서 설명한 대로 1차 델파이설문에서는 문헌분석을 통해 도출된 47개의 예비평가항목들에 대한 폐쇄형 설문과 개방형 설문을 혼합하여 구성하였으며, 설문을 실시한 결과 Table 8과 같이 총 38개 지표가 내용타당도를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 개방형 설문결과에서는 Table 9와 같이 19개의 추가적인 평가항목이 도출되어 2차 델파이 설문에서는 총 57개의 예비평가항목을 대상으로 폐쇄형 설문을 수행하였다.

1차 델파이설문을 통하여 선별된 57가지의 예비평가지표를 대상으로 2차 델파이 분석을 수행한 결과

Table 8. Results of 1<sup>st</sup> delphi-survey

Performance	Primary Category	Subcategory	CVR
Safety	Tunnel Inside	(1) Crack	1.00
		(2) Deterioration of a Sealing	1.00
		(3) Leakage	1.00
		(4) Icicle	0.71
		(5) Exfoliation	1.00
		(6) Spalling	1.00
		(7) Efflorescence	1.00
		(8) Rebar Exposure	1.00
		(9) Breakage	1.00
		(10) Rear Side Cavity	0.86
		(11) Inner Section Reduction	0.86
	Tunnel Outside	(12) Weathering	0.43
		(13) Uniaxial Compressive Strength	0.14
		(14) R. Q. D.	0.14
		(15) Weathering Degeneration	0.14
		(16) Fragmental Zone of Fault	0.71
		(17) Drainage Condition	1.00
		(18) Sediment Condition	1.00
		(19) Pipe Utility Conduit Condition	1.00
Safety	Structural Safety	Normal	(1) Factor of Safety 0.86
		Earthquake	(2) Displacement 1.00
			(3) Stress 1.00
	(4) Factor of Safety 0.86		
	Earthquake	(5) Displacement 1.00	
		(6) Stress 1.00	
Durability	Concrete Lining	(1) Strength 0.86	
		(2) Carbonation 0.86	
		(3) Chloride Content 0.86	
	Timber	(4) Strength 0.29	
	Ground	(5) Weathering 0.43	
		(6) Rock Strength 0.29	
	Circumstance	(7) Salt Stress Circumstance 0.86	
		(8) Carbonation Circumstance 0.86	
		(9) Freezing Damage Circumstance 0.86	
		(10) Quality of Water 0.29	
		(11) Carbon Dioxide Concent 0.57	
Service ability	(1) Construction Gauge 0.86		
	(2) Subsidiary Facilities Condition 1.00		
	(3) Damage Prevention Facilities Condition 0.86		
	(4) Maintainability 0.71		
	(5) Vibration & Noise Condition 1.00		
	(6) Trafficability 0.71		
	(7) Detour 0.86		
	(8) Linearity 0.43		
	(9) Illumination 0.86		
	(10) Quality of Air 1.00		
	(11) Degree of the ringing in Ears 0.71		

**Table 9.** Additional index by open questions

Performance	Additional Index
Safety	(1) Invert Condition
	(2) Swelling of Roadbed
	(3) Pavement Condition
	(4) Sub-ballast
	(5) Railway
	(6) Track
	(7) RMR
	(8) Geological Characteristics
	(9) Drainage Canal Condition
Durability	(1) Reinforced Coating
	(2) Lining Thickness
	(3) Timbering Standard
	(4) Tunnel Potal Slope
Serviceability	(1) Trafficability
	(2) Road Surface Condition
	(3) Pavement
	(4) Car-Clearance
	(5) Water Treatment
	(6) Luminance

42개 항목에서 내용타당도를 만족하였으며, 합의도의 경우 37개의 항목에서 패널의 의견이 합의되었다.

각 평가지표의 중요도를 재평가하기 위하여 다른 패널들의 의견을 참고할 수 있도록 2차 설문결과에 대한 중앙값 및 사분범위를 표시하고, 자문의견이 다수의 의견과 다른 경우에는 그 의견을 제시할 것을 요청하였다.

그 결과 내용타당도를 만족하는 평가지표는 44개 항목으로 2차 평가결과보다 2개의 항목이 증가하였다. 합의도의 경우에도 44가지 평가지표가 합의되어 2차 평가결과보다 7개의 항목이 증가하였다. 3차례의 평가결과는 Table 10과 같다.

터널의 성능평가지표를 선정하기 위하여 총 3차례의 델파이 설문을 실시한 결과 안전성 평가지표 17개, 내구성 평가지표 9개, 서비스성능 평가지표 12개가 선정되었다. 선정된 성능평가지표는 연구기관 3인, 안전진단 실무자 4인, 산업계 2인의 전문가 합동회의

**Table 10.** Results of 3<sup>rd</sup> delphi-survey

Performance	Performance Assessment		CVR	Aggrement (lessthan1)	
	Primary Category	Subcategory			
Safety	Tunnel Inside	Crack	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Deterioration of a Sealing	<b>0.71</b>	<b>1.00</b>	
		Leakage	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Icicle	<b>0.71</b>	<b>1.00</b>	
		Exfoliation	<b>0.71</b>	1.75	
		Spalling	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Efflorescence	0.43	1.75	
		Rebar Exposure	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Breakage	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Rear Side Cavity	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Invert Condition	0.43	1.50	
		Swelling of Roadbed	<b>0.86</b>	<b>1.00</b>	
		Pavement	0.14	<b>1.00</b>	
		Sub-ballast	0.14	<b>1.00</b>	
		Railway	0.43	1.50	
		Track	0.43	1.50	
		Inner Section Reduction	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Tunnel Outside	RMR	<b>0.71</b>	<b>1.00</b>
	Geological Characteristics		<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
	Fragmental Zone of Fault		<b>1.00</b>	<b>0.75</b>	
	Drainage Condition		<b>1.00</b>	1.75	
	Sediment Condition		<b>0.86</b>	<b>1.00</b>	
	Drainage Canal Condition		-0.29	<b>1.00</b>	
	Pipe Utility Conduit Condition	<b>0.57</b>	<b>1.00</b>		
	Structural Safety	Normal	Factor of Safety	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>
			Displacement	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>
			Stress	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>
		Earthquake	Factor of Safety	<b>1.00</b>	1.75
			Displacement	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>
			Stress	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>
Durability	Concrete Lining	Strength	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Carbonation	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Chloride Content	0.43	1.75	
		Cover Thickness	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Lining Thickness	<b>1.00</b>	2.00	
	Timber	Timbering Standard	<b>0.71</b>	<b>1.00</b>	
		Ground	Tunnel Potal Slope	<b>1.00</b>	2.00
	Circumstance	Salt Stress Circumstance	<b>0.86</b>	<b>1.00</b>	
		Carbonation Circumstance	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Freezing Damage Circumstance	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	
		Carbon Dioxide Concent	0.14	<b>1.00</b>	

**Table 10.** Results of 3<sup>rd</sup> delphi-survey (Continue)

Performance Assessment			CVR	Aggrement (lessthan1)
Performance	Primary Category	Subcategory		
Service ability	Construction Gauge		0.57	1.00
	Subsidiary Facilities Condition		0.14	1.00
	Damage Prevention Facilities Condition		1.00	1.00
	Maintainability		0.71	1.00
	Vibration & Noise Condition		0.57	0.75
	Detour		0.14	2.00
	Trafficability		0.57	1.00
	Road Surface Condition		0.57	1.00
	Pavement Condition		0.57	1.00
	Car-Clearance		0.86	1.75
	Water Treatment		0.00	1.00
	Illumination		0.71	1.00
	Luminance		0.86	1.00
	Quality of Air		0.86	1.00
	Degree of the ringing in Ears		0.71	1.00

를 거쳐 일부 중복성이 존재하는 지표와 현실적으로 조사가 불가능한 지표 등 수정 및 보완하는 과정을 거쳐 최종적인 성능평가지표를 선정하였다. 최종적으로 선정된 성능평가지표는 Table 11과 같다.

#### 4. 평가지표 가중치 선정

터널분야 전문가 총 15명을 대상으로 상태안전성 평가지표의 중요도를 분석하기 위하여 AHP 설문을 실시하고 그 결과를 Table 12, 13과 같이 정리하였다. 그 결과, 도로 및 철도터널의 상태안전성 평가지표 모두에서 내공단면 축소여부의 평가가 가장 중요한 지표로 선정되었다.

중요도가 높은 평가지표는 내공단면 축소여부, 균열, 누수, 지반상태, 배면공동유무 등으로 나타났으며, 상대적으로 중요도가 낮은 평가지표는 공동구상태, 박리, 재료분리 등 이었다. 평가지표별 중요도는 터널의 종류 및 시공방법에 따라 차이가 나는 것을 확인할

**Table 11.** Results of 3<sup>rd</sup> delphi-survey

Performance Assessment			
Performance	Primary Category	Subcategory	
Safety	Tunnel Inside	Crack	
		Deterioration of a Sealing	
		Leakage	
		Exfoliation	
		Spalling	
		Rebar Exposure	
		Breakage	
		Segregation	
		Rear Side Cavity	
		Inner Section Reduction	
	Tunnel Outside	Ground Condition	
		Drainage Condition	
		Pipe Utility Conduit Condition	
	Structural Safety	Normal	Factor of Safety
			Displacement
Stress			
Earthquake		Factor of Safety	
		Displacement	
		Stress	
Durability	Plain Concrete Lining	Strength	
		Freezing Damage Circumstance	
	Reinforced Concrete Lining	Strength	
		Salt Stress Circumstance	
		Carbonation	
		Chloride Content	
		Freezing Damage Circumstance	
Serviceability	Road Tunnel	Road Surface Condition	
		Illumination	
		Damage Prevention Facilities Condition	
		Emergency evacuation time	
		Mechanical and Electrical Equipment	
		Drainage Condition	
		Trafficability	
	Railway Tunnel	Vibration & Noise Condition	
		Luminance	
		Damage Prevention Facilities Condition	
		Emergency evacuation time	
		Mechanical and Electrical Equipment	
		Drainage Condition	
Trafficability			

**Table 12.** Results of AHP analysis (road tunnel)

Assessment Index	ASSM (Plain)		NATM (Plain)		NATM (Reinforced)		SHIELD (Reinforced)		OPEN CUT	
	Importance/Ranking									
Crack	0.1201	2	0.1222	2	0.1022	2	0.1131	2	0.1332	2
Leakage	0.1075	3	0.1115	3	0.0923	4	0.1000	3	0.1062	3
Breakage	0.0828	6	0.0797	6	0.0718	7	0.0861	4	0.0809	5
Exfoliation	0.0347	11	0.0333	10	0.0308	12	0.0357	11	0.0361	11
Spalling	0.0560	9	0.0499	9	0.0525	9	0.0570	9	0.0553	8
Segregation	0.0405	10	0.0315	12	0.0310	11	0.0343	12	0.0360	12
Rebar Exposure	-	-	-	-	0.0855	6	0.0832	6	0.0951	4
Drainage Condition	0.0755	7	0.0755	7	0.0665	8	0.0640	8	0.0673	7
Pipe Utility Conduit Condition	0.0313	12	0.0320	11	0.0272	13	0.0282	13	0.0315	13
Ground Condition	0.1065	4	0.0898	5	0.0897	5	0.0853	5	0.0719	6
Inner Section Reduction	0.1888	1	0.2125	1	0.2013	1	0.1921	1	0.1837	1
Rear Side Cavity	0.0948	5	0.1049	4	0.1000	3	0.0723	7	0.0553	9
Special Conditions	0.0615	8	0.0572	8	0.0492	10	0.0487	10	0.0475	10

**Table 13.** Results of AHP analysis (railway tunnel)

Assessment Index	ASSM (Masonry)		ASSM (Plain)		NATM (Plain)		NATM (Reinforced)		SHIELD (Reinforced)		OPEN CUT	
	Importance/Ranking											
Crack	0.1278	2	0.1281	2	0.1212	2	0.1065	2	0.1157	2	0.1262	2
Leakage	0.0752	6	0.1068	3	0.1037	4	0.0975	3	0.1081	3	0.1063	3
Breakage	0.1071	3	0.0819	6	0.0770	6	0.0711	7	0.0739	6	0.0710	6
Exfoliation	0.0788	5	0.0421	11	0.0390	10	0.0342	12	0.0355	11	0.0385	12
Spalling	0.0368	11	0.0631	9	0.0527	9	0.0481	10	0.0529	10	0.0540	9
Segregation	0.0489	10	0.0429	10	0.0378	11	0.0349	11	0.0348	12	0.0387	11
Rebar Exposure	-	-	-	-	-	-	0.0867	5	0.0865	4	0.0924	4
Drainage Condition	0.0677	8	0.0643	8	0.0692	7	0.0657	8	0.0666	8	0.0739	5
Pipe Utility Conduit Condition	0.0312	12	0.0315	12	0.0355	12	0.0303	13	0.0314	13	0.0298	13
Ground Condition	0.0910	4	0.0853	5	0.0875	5	0.0833	6	0.0796	5	0.0687	7
Inner Section Reduction	0.2005	1	0.1970	1	0.2071	1	0.1964	1	0.1884	1	0.1927	1
Rear Side Cavity	0.0707	7	0.0885	4	0.1048	3	0.0882	4	0.0720	7	0.0558	8
Special Conditions	0.0643	9	0.0685	7	0.0645	8	0.0571	9	0.0546	9	0.0520	10

수 있었다. NATM 터널의 평가지표에서 배면공동 유무는 상대적으로 중요한 평가지표로 선정되었으나 SHIELD 터널에서는 중요도가 비교적 작게 나타났다.

이러한 결과는 터널의 NATM 터널에서 배면공동에 의한 기인하는 변상의 발생가능성이 높기 때문이

라고 판단된다. AHP 분석을 통해 획득한 중요도는 평가지표의 가중치로 활용하여 평가지표마다의 평가 점수 산정에 활용할 예정이다.

평가지표별 평가점수를 부여한다면, 터널의 성능 등급을 정량적으로 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 터널의 성능중심 평가체계를 마련하기 위한 평가지표를 도출하고, 각 평가지표간의 중요도를 산정하였다. 이를 위하여 관련 문헌과 선행연구들을 분석한 결과 총 47개의 예비평가지표를 도출하였다. 성능중심의 평가를 위한 최종지표를 도출하기 위하여 연구기관, 학계, 산업계에 종사하는 전문가 14명을 대상으로 3차례의 델파이 설문을 실시하고, 최종합의를 도출한 결과 안전성평가지표 20개, 내구성평가지표 7개, 서비스성능평가지표 14개로 총 44개의 최종평가지표를 도출하였다.

도출된 성능평가지표별 각각의 중요도 평가를 위해 AHP 분석을 실시하였으며, 각 중요도는 평가지표별 평가점수를 산정하는데 활용하여 터널의 성능을 정량적으로 평가하는데 활용할 수 있을 것이라고 판단된다.

본 연구에서 도출된 성능평가지표와 지표별 중요도는 터널시설물의 성능중심 유지관리 체계 수립 시 합리적인 의사결정을 지원할 수 있도록 활용될 수 있으며, 향후 시범적용을 통해 수정·보완한다면 보다 합리적인 성능중심 평가체계를 마련할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 “시설물 유형별 한국형 성능중심 종합 성능평가 기술개발사업(과제번호 16SCIP-C079148-03-000000)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. American Society of Civil Engineers (2013), “2013 Report card for america’s infrastructure”, American Society of Civil Engineers, pp. 113-128.
2. Kang, S.H., Lee, Y.H. (2013), “Understanding the

- infrastructure assessment system in developed countries and introduction plan”, Construction & Economy Research Institute of Korea, p. 49.
3. Na, S.I. (1999), “A study on the contents of general agricultural education for elementary, Middle and High School Students in the Information Society”, Daegu National University of Education.
4. Ewing, D.M. (1992), “Future Competencies needed in the preparation of secretaries in the state of illinois using the delphi technique”, Ph. D. Dissertatio, University of Iowa.
5. Ziglio (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.
6. Kwon, T. I. (2008), “Study on drawing priority of the influence factors of tourist resort remodeling business: Delphi Technic & Analytic Hierarchy Process”, Sejong University.
7. Lawshe (1975), “A quatitative approach to content validity. Personnel Psychology”, Content Validity, pp. 563-575.
8. Kim, B.W. (2015), “Delphi analysis method”, Kims information.
9. Upton, Graham (1996), “Understanding statistics”, Oxford Press. p. 55.
10. Sung, J.H. (2013), “A special tunnel excavation (shield tunnel) performance criteria and maintenance manual development”, Korea Infrastructure Safety and Health.
11. Sadao Kimura, Takashi Kitani, Atsushi Koizumi (2012), “Development of performance-based tunnel evaluation”, Journal of Transportation Technologies, pp. 119-128.
12. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), “Guideline of Safety and in-depth safety inspection”.
13. Ministry of Construction and Transportation (2001), “Establishment of standards for evaluating the condition of facilities (Tunnels)”.