

## 델파이 기법을 활용한 터널 붕괴 위험도 분석을 위한 영향인자 도출에 관한 연구

김정흠<sup>1</sup> · 김창용<sup>1</sup> · 이승수<sup>3</sup> · 이준환<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원  
<sup>2</sup>연세대학교 건설환경공학과  
<sup>3</sup>한양대학교 건설환경공학과

### A Study on Influence Factors for Tunnel Collapse Risk Analysis using Delphi Method

Jeong Heum Kim<sup>1</sup>, Chang Yong Kim<sup>1</sup>, Seung Soo Lee<sup>3</sup>, and Jun Hwan Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology  
<sup>2</sup>Civil and Environmental Engineering, Yonsei University  
<sup>3</sup>Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

Received 9 June 2017; received in revised form 15 June 2017; accepted 19 June 2017

본 연구는 델파이 기법을 활용하여 최적화 단면 설계 도출 및 시공중 터널 붕괴위험도 평가를 위해 필요한 평가영향인자를 정립하는 것을 목표로 하였다. 평가영향인자 정립은 문헌조사, 선행연구 및 전문가 집단의 브레인스토밍과정을 통하여 총 5개의 상위분류체계를 구축하였다. 21명의 전문가 패널을 구성하여 총 1, 2, 3차의 델파이 조사 과정을 통해 전문가 판단과정에서의 오류 및 편향을 방지하여 신뢰성을 향상시켰다. 델파이 1차 조사에서는 개방형 설문조사를 통해서 각 전문가 패널의 의견을 수렴하여 총 22개의 평가영향인자 후보군을 도출하였다. 델파이 2차 조사에서는 수집된 총 22개의 평가영향인자 후보군을 대상으로 리커트 7점 척도를 기반으로 중요도 설문을 수행하였으며 타당성 검증에 대해 CVR (Content Validity Ratio) 분석을 수행하여 부적합한 후보군을 제외하였다. 마지막으로 3차 조사에서는 2차 조사에서 도출된 결과를 가지고 재조사를 수행하였으며, 최종적으로 전문가 답변에 대한 CVR 및 COV (Coefficient of Variation) 분석을 수행하여 총 14개의 평가영향인자를 도출하였다.

**주요어:** 터널, 델파이 조사기법, 영향인자, 터널붕괴위험도, CVR, COV

This research aims to define influence factors to perform an optimized section design and evaluate tunnel collapse risk during construction using Delphi technique. A total of five upper classification systems were constructed through literature review, previous research analysis, and brainstorming of expert group for establishing influence factors. The 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, and 3<sup>rd</sup> Delphi survey process was proceeded by panel group which is consisted 21 experts to prevent errors and bias in the expert judgement process. In Delphi 1<sup>st</sup> survey, a total of 22 influence factors candidates were derived through open-ended questionnaire. In Delphi 2<sup>nd</sup> survey, questionnaire was proceeded based on 7-point Likert scale method. In order to verify the validity, CVR (Content Validity Ratio) analysis was performed to exclude inappropriate candidates. In the 3<sup>rd</sup> survey, verification of influence factors was proceeded once more with the result of 2<sup>nd</sup> survey, and lastly, a total of 14 influence factors was derived by CVR and COV (Content Validity Ratio) analysis for response of experts.

**Key words:** Tunnel, Delphi technique, Influence factor, Tunnel collapse risk, CVR (Content Validity Ratio), COV (Coefficient of Variation)

\*Corresponding author: junlee@yonsei.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

### 연구의 배경 및 목적

국내 전국의 터널(도로터널 기준)은 1997년 말 이후 10년간 건설된 터널의 수가 전체 98년간 건설된 터널의 82.7% (880개/총1064개)를 차지하고 있다. 이는 1997년 말 184개를 기준으로 578% 증가한 것이며, 연평균 19.2%의 급격한 증가율(2007년 기준)을 보이고 있다(Shin et al., 2013). 이에 따라 터널건설에 따른 각종 건설 재해의 위험성 또한 증가하고 있다. 특히 터널 건설 중 터널 막장 및 후방부 붕괴 및 붕락은 매년 약 20개소 이상 발생하고 있으며, 한 개소당 복구비는 평균 50억원 정도로 연간 총 1,000억원 이상의 손실액이 발생하고 있다(KICT, 2009).

하지만, 연 평균 중·대형급을 기준으로 시공 중 붕괴사고 발생 건수가 약 20여건(KICT, 2009) 이상으로 추정되는 등, 끊임없이 터널붕괴가 발생되고 있다. 터널 붕괴는 붕괴 현장 복구 및 공기지연에 따른 막대한 국가 예산 손실을 유발하고, 간접적인 사회적 불안정 요인을 초래한다. 그럼에도 불구하고, 1980대 초에 도입된 NATM 터널의 기본개념에서도 가장 중요하게 강조된 막장관찰 작업조차도, 현재의 국내 터널설계기준이나 터널시방서에서 독립적 전문항목으로 언급되지 않는 등 과소평가되는 경향이며, 현장에서 의무적으로 수행되고 있는 막장관찰 작업도 계측전문가가 계측기 매설 및 측정 작업과 병행하여 수행하는 등 비전문가들에 의해 수행되고 있는 실정이다. 이러한 형식적인 막장관찰 작업 수행과 더불어, 수행된 막장관찰 결과조차도 적시적이고 효과적으로 시공관리에 반영되고 있는 경우는 드문 실정이다(Shin et al., 2013).

따라서 시공 중 터널의 붕괴위험도를 사전에 예측하여 붕괴사고를 최소화하기 위한 연구가 국내외에서 진행되어 왔다. 국내의 경우 Yoo et al. (2008)은 저심도 터널 굴착시 예상되는 암반거동을 정량적으로 파악하기 위해 계층분석의 의사결정 방법(Alytic hierarchy process, AHP)과 암반공학 시스템(Rock Engineering Systems, RES) 방법을 적용하여 암반거동 지수를 산정하였다. Shin et al. (2009)은 터널의 시공 중 붕괴위험도에 대한 영향인자를 기하특성, 지질조건, 불연속면, 지하수위, 굴착조건 및 지보/보강으로 구분되는 총 17개로 구분하고, 인공신경망기반 비선형의 가중치 산정 모델을 개발하였다. 국외의 연구사례는 대부분 국내에 비해 터널 붕괴영향인자에 대한 역학적 메커니즘의 규명 및 이를 고려한 선진화된 관리체계를 제시하는데 목적을 두고 있다. 특히, 붕괴위험도 평가모델을 환경적 요소와 함께 현장 및 시공요건을 고려한 이론적 해석기법을 제시하고 있으며, 이에 대응할 수 있는 보다 구체적인 터널 설계방법을 제시하고 있다. 노르웨이에서는 자국의 수많은 지반정보를 DB화하고 분석하여 Q-System이라는 지반분류법을 개발

하였고, 이에 근거하여 다양한 지반조건과 현지응력 조건에 따른 9가지의 지보패턴을 제시하였다(Barton, 1978). Martin et al. (1999, 2003)은 지반응력 및 일축압축강도간의 관계로부터 취성 파괴영역 및 터널의 불안정 영역을 제시할 수 있는 방법을 개발하고, 파괴모드를 응력으로 유도되는 소성 파괴, 중력에 의해 지배되는 블록파괴, 응력으로 유도되는 취성 파괴로 구분하였으며 그 위치를 예측할 수 있는 방법론을 제시하였다. Goricki et al. (2004)은 설계단계에서 암반종류와 여건을 고려한 암반 거동을 예측하여 굴착방법 및 지보방법을 결정하는 연구를 수행하였다. Li et al. (2013)은 터널의 시공 중 붕괴원인을 규명하기 위하여 주변 덮개암의 풍화정도, 지하수위 및 절리상태 등을 계측할 수 있는 방법론을 제시하였다. 이와 같이 대부분의 연구가 터널붕괴위험도와 관련된 역학적 메커니즘의 규명 및 위험도 분석모델 개발 및 시스템 구축에 관련된 내용이다. 하지만 이러한 위험도 분석결과는 평가영향인자의 설정 내용과 평가항목별 가중치 및 등급화 방법에 따라 결과 값의 신뢰도가 결정되게 된다.

본 연구에서는 시공 중 터널붕괴위험도의 신뢰적인 평가를 보장할 수 있도록 21인의 전문가 패널을 구성하여 델파이 조사기법을 제3차에 걸쳐 수행하였으며, 분석과정에서 조사내용의 타당성과 일치성을 분석하기 위하여 CVR (Content Validity Ration) 및 COV (Coefficient of Variation)를 활용하였다.

### 연구의 절차 및 범위

본 연구는 터널 붕괴위험과 관련된 영향인자를 신뢰적으로 정립하기 위하여 문헌조사 및 선행연구 자료의 분석을 통하여 평가영향인자의 범주를 나열하고 델파이 기법을 통해 체계화되고 표준화된 평가영향인자를 정립하는 것을 목표로 하였다. 델파이 기법이란 통제된 피드백이 제공되는 수차례의 설문조사를 통하여 어떠한 문제에 대하여 전문가 집단의 합의를 이루는데 유용한 의사결정 수단이다. 즉, 집단의 의견을 개별적 차원이 아닌 전체적 차원에서 특정 문제에 대한 동의가 부족하거나 지식이 불완전 하다고 생각될 때 효율적으로 대응하도록 하는 것이라 할 수 있다(Dalkey, 1969; Delbecq, Van de Ven, and Gustafson, 1975; Rowe and Wright, 2001).

델파이 기법을 통한 시공 중 터널붕괴위험도에 고려되어야 하는 평가영향인자를 도출하기 위하여 Fig. 1과 같은 순서를 통해 연구를 진행하였다.

전문가의 선정 후, 델파이 기법을 이용한 터널 붕괴위험도 평가영향인자 도출을 위하여 기존의 선행연구, 문헌조사 및 전문가 집단의 브레인스토밍 과정을 통하여 5가지 상위체계를 구조화 하였다. 제1차 델파이 조사는 개방형 설문으로 진행하였다. 분류된 평가영향인자의 상위분류체계를 바

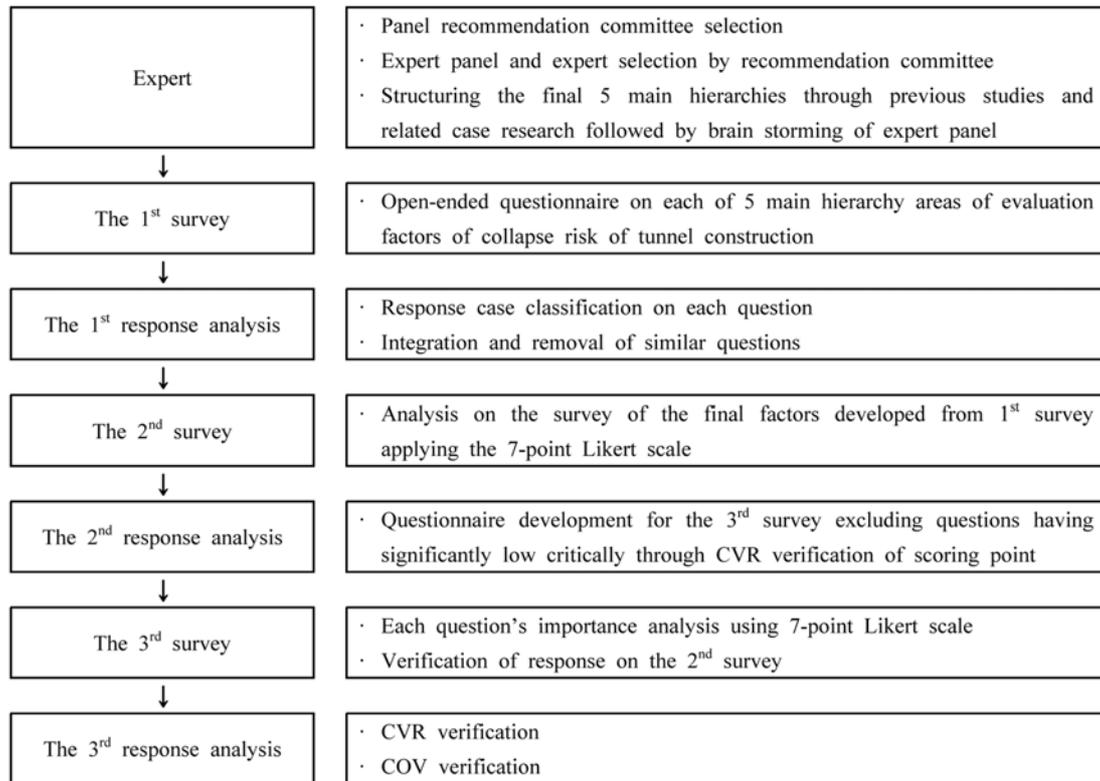


Fig. 1. Research scope and procedure.

당으로 각 체계에 고려될 수 있는 구체화된 하위분류요소를 자유스럽게 나열하도록 하였다. 조사된 모든 항목을 각 상위체계에 종속되도록 구조화 하였으며 중복된 항목은 제거하였다. 2차 설문조사는 제1차 델파이 설문을 통해 도출된 견해를 정리하여 각 항목에 대한 전문가들의 의견을 재평가하도록 요청하였다. 보통 제2차 설문지에서는 항목에 대한 우선순위나 중요도를 평가하며, 중요도는 리커트 7점 척도를 사용하여 조사하였다. 응답결과는 평균과 표준편차 등을 이용하여 조사대상 전문가의 합의수준을 확인하였으며, 중요도를 평가하는 방법으로 CVR을 활용하여 내용 타당성이 확보되지 않은 평가영향인자는 제외하였다. 그리고 기타 의견란에 항목 이외의 의견이나 부가 설명 등을 기술 할 수 있도록 하여 질적 분석 자료로 사용하였다. 제3차 설문조사는 2차 분석결과를 토대로 재조사를 실시하여 응답결과의 내용 타당성 및 일치성에 대한 평가를 수행하기 위해 CVR 및 COV를 분석하여 최종적인 평가영향인자 분류결과를 도출하였다.

본 연구의 결과는 갈수록 증가하는 노후터널의 관리 및 붕괴사고 방지를 위한 터널 붕괴위험도 분석 모델의 개발에 신뢰적인 영향인자의 분류체계를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

## 델파이 기법을 활용한 평가영향인자 도출

### 전문가 패널구성 및 평가영향인자 상위분류체계 도출

델파이 기법은 전문가적 직관을 객관화된 수치로 나타내는 방법이기 때문에 조사에 참여하는 전문가의 자질은 매우 중요한 요소이다(Kim, 1996). 조사대상자는 해당 연구 분야에 종사하는 전문가를 선택하여 구성하는 것이 가장 적절한 접근이다. 그리고 참여자의 대표성, 적절성, 전문적 지식능력, 성실성, 참가자의 수 등을 신중히 고려하여야 한다(Kim, 1996). 전문가 참여의 수는 많을수록 결과의 신뢰도가 커지는 것으로 보고되고 있으나(Dalkey, 1969), 일반적으로 1015명의 소집단의 전문가만으로도 유용한 결과를 얻을 수 있다고 조사되고 있다(Ziglid, 1996; Anderson, 1997). 본 연구에서는 Table 1의 내용과 같은 경력을 지닌 교수, 설계 및 시공회사 직원, 연구원 등 다양한 분야 총 21인의 전문가 패널을 구성하였으며, 3차에 걸친 델파이 조사·분석 과정에 모두 참여하여 분석의 신뢰성을 고려하였다.

델파이 조사를 시작하기 전에 전문가 패널 회의를 개최하여 브레인스토밍 과정을 통하여 터널붕괴위험도 평가영향인자의 후보군 도출 및 체계화의 기준이 되는 5개의 상위분류체계를 정의하였다. 정의된 상위분류체계는 지반의 물성 및 형상, 터널 기하학적 조건, 지하수 조건, 굴착 조건, 지

**Table 1.** Career history of experts who participated in the Delphi survey.

Division		Targeted number of persons for sampling	Number of participated panels		
			1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
Academic level	Bachelor	1	1	1	1
	Master	12	12	12	12
	Doctor	8	8	8	8
	Total	21	21	21	21
Career years in related area	10 years ~ 15 years	0	0	0	0
	15 years ~ 20 years	12	12	12	12
	20 years or longer	9	9	9	9
	Total	21	21	21	21

**Table 2.** The first Delphi survey result.

Main concept	Sub concept
Geotechnical properties and shape	Joint face conditions
	Rock mass strength
	Adjustment for joint orientations
	Underground stress conditions
	Joint face spacing
	Ground grade (RQD/N)
Tunnel geometry conditions	Sectional shape
	Excavation sectional area
	Depth ratio
	Clearance to tunnel
	Neighboring land use status
Groundwater conditions	Groundwater inflow
	Groundwater level
	Groundwater leak location
	Groundwater source
Excavation conditions	Excavation method
	Excavation efficiency
	Advance
	Bi-directional excavation status
Support and reinforcement conditions	Support pattern level
	Auxiliary method
	Support and reinforcement time

보 및 보강 조건으로 분류되었다.

#### 제1차 델파이 조사 및 분석결과

제1차 델파이 조사는 개방형 설문으로 진행하였다. 분류된 평가영향인자의 상위분류체계를 바탕으로 각 체계에 고려될 수 있는 구체화된 하위분류요소를 자유롭게 나열하도록 하였다. 조사된 모든 항목을 각 상위체계에 종속되도록 구조화 하였으며, 중복된 항목은 제거하였다. 조사 결과 5개의 상위분류체계에 종속된 하위분류의 영향인자는 총 181개가 조사되었다. 이 가운데 의미가 중복되는 인자를 제

거하여 최종적으로 22개의 결과를 도출하였으며, 내용은 Table 2와 같다.

지반의 물성 및 형상에 있어서는 절리면 상태, 암반강도, 절리방향에 대한 보정, 지중응력조건, 절리면 간격, 지반등급(RQD/N) 등 6개의 평가영향인자들이 도출되었다. 주로 설계 및 시공 시 막장면 평가에 중요시 되고 붕괴와 직접적으로 관련된 인자들을 내포하고 있는 것으로 조사 되었다. 터널 기하학적 조건에서는 단면 형상, 굴착 단면적, 심도비, 터널과의 이격거리, 인접 토지사용 상태 등 총 5개의 평가영향인자들이 분류되었으며, 주로 터널의 기하학적 특

성에 따른 구조적 안정성 및 주변 환경과의 영향과 관련된 인자들을 내포하고 있는 것으로 조사 되었다. 지하수 조건에서는 지하수 유입량, 지하수위, 지하수 유출 위치, 지하수 유입원 등 4개의 평가 인자들이 도출되었으며, 주로 터널의 막장에 작용하는 수압으로 인해 붕괴위험도에 악영향을 끼칠 수 있는 요인들로 조사 되었다. 굴착 조건에서는 굴착공법, 굴착효율, 굴진장, 양방향 굴착여부 등 4개의 평가인자들이 도출되었으며, 시공의 방법 및 특성에 따라 영향을 줄 수 있는 인자들이 분류된 것으로 조사 되었다. 지보 및 보강 조건에서는 지보패턴수준, 보조공법, 지보 및 보강시행시기 등 3개의 평가영향인자들이 도출되었으며, 주로 터널의 안정성확보 및 주변 환경의 보전(지표면 침하방지, 기설 시설물 보호)을 위해 본래 지반조건의 개선을 유도하도록 적용되는 인자들이 분류되었다.

**제2차 델파이 조사 및 분석결과**

제2차 델파이 조사에서는 1차 조사에서 수집된 총 22개의 평가영향인자에 대하여 전문가를 대상으로 7점 리커트 척도를 적용하여 각 인자별 중요도에 대한 설문을 진행하였다. 각 평가요소에 대한 타당성 검증차원에서 수행하였으며, 또한 3차 델파이 조사에서 사용될 평가요소들을 도출하기

위하여 수행하였다. 1차 조사에서 도출된 각 평가영향인자에 대한 적용 타당성 검증은 CVR (Lawshe, 1975)을 분석하여 검증하였다. CVR은 조사결과의 유의미함을 평가하는 방법으로서 중요하다고 인식하는 패널들이 많으면 많을수록 그 문항의 유효비율 정도 또는 유효 범위가 증가한다는 가정을 기초로 한다. 즉 어떤 문항이든 중요하다고 응답한 패널 수가 50% 이상일 때 그 문항은 타당도를 어느 정도 가지고 있다고 볼 수 있는데, 중요하다고 응답한 패널 수가

**Table 3.** Minimum value of CVR according to number of pannel.

Number of pannel	Minimum value of CVR
5	0.99
7	0.99
10	0.62
13	0.54
15	0.49
20	0.42
25	0.37
30	0.33
35	0.31
40	0.29

**Table 4.** The second Delphi survey results.

Main concept	Sub concept	Average	Variance	Standard deviation	CVR (>0.41)	Result
Geotechnical properties and shape	Joint face conditions	6.33	0.33	0.58	1.00	O
	Rock mass strength	5.57	1.16	1.08	0.71	O
	Ground grade (RQD/N)	5.57	1.56	1.25	0.62	O
	Joint face spacing	5.33	1.63	1.28	0.62	O
	Adjustment for joint orientations	5.33	1.73	1.32	0.62	O
	Underground stress	4.90	1.19	1.09	0.33	X
Tunnel geometry conditions	Excavation sectional area	5.62	0.75	0.86	0.81	O
	Sectional shape	5.00	1.60	1.32	0.33	X
	Depth ratio	5.24	0.89	0.94	0.43	O
	Adjacent clearance to the tunnel	4.90	1.29	1.14	0.33	X
	Neighboring land use status	3.62	1.75	1.32	-0.52	X
Groundwater conditions	Groundwater inflow	6.38	0.75	0.86	0.90	O
	Groundwater level	5.38	0.75	0.86	0.71	O
	Groundwater leak position	5.24	1.09	1.04	0.33	X
	Groundwater source	4.95	1.25	1.12	0.33	X
Excavation conditions	Divided excavation method	6.05	0.85	0.92	0.81	O
	Advance	5.95	0.75	0.86	0.90	O
	Bi-directional excavation status	4.76	0.79	0.89	0.14	X
	Excavation efficiency	4.43	0.86	0.93	-0.05	X
Support and reinforcement conditions	Support and reinforcement time	6.29	0.41	0.64	1.00	O
	Support pattern level	6.19	0.86	0.93	0.81	O
	Auxiliary method	5.95	0.95	0.97	0.90	O

50%보다 적으면 음수 값이 되고, 50%일 때는 0, 50%보다 크고 100% 미만이면 0과 1사이 값, 100%일 때 1의 값을 가진다. CVR은 식 (1)을 통해 산정 할 수 있다.

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

여기서,  $n_e$  : 중요하다고 응답한 패널 수;  $N$  : 전체 패널 수를 의미한다. 또한 Lawshe (1975)는 응답한 패널수에 따라 내용 타당도를 확보할 수 있는 최소 CVR값을 제시하였으며, Table 3의 내용과 같다.

1차 델파이 조사 분석결과 도출된 총 22개의 평가영향인자 후보군을 대상으로 리커트 7점 척도에 근거하여 조사를 수행하였으며 분석결과는 Table 4와 같다. 8개의 평가영향인자 후보가 CVR 분석 값이 0.41 미만으로서 부적합한 것으로 분석되었다. CVR값이 0.41 미만일 경우 타당성이 결여되었다고 판단한 이유는 Table 3을 참조하여 조사대상자의 수가 21인일 경우의 값을 회귀분석을 통해 도출한 것이다. 인접 토지사용 상태, 굴착효율에 대해서는 내용타당도 비율이 음수로 분석되어 시공 중 터널붕괴분석을 위한 평가영향인자로서 가치가 낮은 것으로 평가되었다. 따라서 제2차 델파이 조사결과는 최종적으로 분석에 사용된 총22개의 평가요소들 중 8개를 제외한 14개의 평가영향인자가 결정되었다.

**제3차 델파이 조사 및 최종 평가영향인자 도출**

제3차 델파이 조사는 2차 델파이 조사결과 도출된 총 14개의 평가영향인자를 대상으로 리커트 7점 척도를 활용한 폐쇄형 설문으로 진행하였으며 1, 2차 조사에 참여하였던

전문가들의 최종적인 의견의 일치 및 합의를 도출하기 위한 목적이다. 제3차 델파이 조사결과를 평가하기 위하여 CVR 분석을 통해 인자별 타당성 검증을 재수행 하고, 전문가 답변의 일치성을 측정하기 위하여 COV를 산정하였다. 델파이 조사는 근본적으로 전문가들의 의견의 일치점을 도출하는데 있다. 따라서 조사과정에서 의견의 일치점이 도출되지 않고 전문가 간 의견의 변동성이 크거나 중요도가 낮게 분석된 항목은 제거하거나 재조사할 필요가 있다. 일반적으로 응답결과의 변동성에 대한 평가는 변동계수를 산정하여 분석할 수 있다. 변동계수의 값이 0.5 이하일 경우 안정도가 높아 추가 설문이 필요 없으나, 0.8 이상일 경우에는 추가적 설문이 필요한 것으로 판단한다(Rho, 2006).

3차 델파이 분석결과 2차 조사결과에서 도출된 총 14개의 평가영향인자들에 대한 CVR값이 모두 0.41이상으로 분석되어 타당성이 확보된 것으로 나타났으며, 절리면 상태, 지하수 유출량, 지보 및 보강 시행시기, 지보패턴수준은 CVR이 1.0으로 분석되어 모든 전문가가 가장 중요하게 고려해야 할 인자로 평가하였다. 14개의 평가영향인자의 변동계수는 0.5 이하로 분석되어 추가적인 설문이 필요하지 않으며, 응답의 일치성 또한 높아 설문의 안정도가 확보되었다고 할 수 있다.

따라서 제3차 델파이 조사결과에 있어서 분석에 사용된 총 14개의 평가영향인자들은 본 연구의 델파이 최종라운드라 할 수 있는 최종 평가영향인자로 도출되었다. 이와 관련하여 구체적인 분석결과는 Table 5와 같이 정리 할 수 있다.

Table 6은 총 3차에 걸친 델파이 조사결과를 토대로 최종적으로 도출된 터널 붕괴위험도 평가영향인자에 대한 내용이다. 총 3라운드에 걸친 델파이 조사를 수행하는 동안 1차

**Table 5.** The third Delphi survey results.

Main concept	Sub concept	Average	Variance	Standard deviation	COV	CVR (>0.41)	Result
Geotechnical properties and shape	Joint face conditions	6.48	0.66	0.81	0.13	1.00	Suitable
	Rock mass strength	5.62	0.75	0.86	0.15	0.81	Suitable
	Ground grade (RQD/N)	5.52	0.86	0.93	0.17	0.71	Suitable
	Joint face spacing	5.57	0.86	0.93	0.17	0.62	Suitable
	Adjustment for joint orientations	5.38	1.15	1.07	0.20	0.71	Suitable
Tunnel geometry conditions	Excavation sectional area	5.57	1.26	1.12	0.20	0.90	Suitable
	Depth ratio	4.95	1.75	1.32	0.27	0.43	Suitable
Groundwater conditions	Groundwater inflow	6.52	0.46	0.68	0.10	1.00	Suitable
	Groundwater level	5.10	1.09	1.04	0.20	0.43	Suitable
Excavation conditions	Divided excavation method	5.86	0.63	0.79	0.14	0.90	Suitable
	Advance	5.95	1.15	1.07	0.18	0.71	Suitable
Support and reinforcement conditions	Support and reinforcement time	6.29	0.61	0.78	0.12	1.00	Suitable
	Support pattern level	6.29	0.51	0.72	0.11	1.00	Suitable
	Auxiliary method	5.86	0.93	0.96	0.16	0.81	Suitable

**Table 6.** Tunnel collapse risk evaluation influence factors deduced through Delphi survey.

Main concept	Sub concept
Geotechnical properties and shape	Joint face conditions
	Rock mass strength
	Ground grade (RQD/N)
	Joint face spacing
	Adjustment for joint orientations
Tunnel geometry conditions	Excavation sectional area
	Depth ratio
Groundwater conditions	Groundwater inflow
	Groundwater level
Excavation conditions	Divided excavation method
	Advance
Support and reinforcement conditions	Support and reinforcement time
	Support pattern level
	Auxiliary method

델파이 조사 때 추출된 22개의 평가영향인자 중에서 8개의 평가영향인자를 제거하고 최종적으로 14개의 평가영향인자들을 도출하였다. 이들 평가영향인자들은 다양한 분야의 터널 전문가를 대상으로 의견의 일치와 합의에 대한 결과로서 터널 붕괴위험도 평가영향인자로서 매우 가치가 있다고 판단된다.

### 결론

터널 붕괴위험도에 영향을 미치는 인자를 결정하기 위해 문헌조사 및 선행연구를 통한 전문가 집단의 브레인스토밍 과정을 거쳐 평가영향인자의 상위분류체계를 도출하였고, 총 3차의 델파이 조사를 수행하여 평가영향인자를 정립하였다. 1차 델파이 조사 결과 상위분류체계에 종속되는 하위 분류의 영향인자 총 181개가 조사되었으며, 이 중 의미가 중복되는 인자를 제거하여 22개의 결과를 도출하였다. 2차 델파이 조사에서는 1차조사에서 수집된 22개의 평가영향인자에 대하여 전문가를 대상으로 리커트 7점 척도를 적용하여 각 인자별 중요도에 대한 설문을 수행하여 CVR 검증을 통하여 14개의 평가영향인자를 도출하였다. 3차 델파이조사에서는 2차 델파이 조사결과 도출된 14개의 평가영향인자를 대상으로 리커트 7점 척도를 적용하여 인자의 타당성 및 전문가들의 최종적인 의견의 일치 및 합의를 도출하기 위해 CVR 및 COV 평가를 수행하여 최종 14개의 평가영향인자를 정립하였다.

본 연구의 진행 결과 터널붕괴위험도 평가영향인자 선정 시 고려사항들의 절대평가 결과는 얻었지만 보다 객관적이고 정성적 항목들의 정량적 평가를 위해서는 항목들의 쌍대 비교를 통해 중요도를 반영한 상대평가결과를 도출해야 할

것이다. 향후 이들 평가영향인자들은 다양한 분야의 터널 전문가를 대상으로 의견의 일치와 합의에 대한 결과로서 터널 붕괴위험도 지수개발을 위한 사전조사, 분석단계에서 요구되는 평가영향인자로서 매우 가치가 있다고 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업(과제번호: 15SCIP-C069312-03) “터널시공 중 디지털 맵핑을 통한 온라인 암판정 기술 및 운영모델 개발” 과제의 지원을 받아 연구되었습니다.

### References

Anderson, D., 1997, Strand of System : The Philosophy of Charles Peirce, West Lafayette, Purdue University Press, 204p.

Barton, N. R., 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sic. and Geomech. Abstr., 15, 319-368.

Dalkey, N. C., 1969, The Delphi method : An experimental study of group opinion, Rand Corporation Memorandum, 79p.

Delbecq, A. L., Van de Ven, A. H., and Gustafson, D. H., 1975, Group Techniques for Program Planning: A guide to nominal and Delphi Processes, Glenview, IL : Scott, Foresman, 174p.

Goricki, A., Schubert, W., and Riedmueller G., 2004, New

- developments for the design and construction of tunnels in complex rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 720-725.
- Kim, B. S., 1996, *The Educational Method*, Hakjisa, 498p.
- Kim, H. S., 1996, Forecasting methodologies and utilization of science and technology research, STEPI, 148p.
- Lawshe, C. H., 1975, A quantitative approach to content validity, *Personnel Psychology*, 28(4), 563-575.
- Li, S., Shi, S., Li, L., Zhou, Z., Sun, C., Wang, Q., and Liu, H., 2013, The Cause of Shallow Tunnel Collapse and Simulation Analysis of Consolidation for a Collapsed Tunnel, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(7), 2488-2493.
- Martin, C. D., Kaiser, P. K., and McCreath, D. R., 1999, Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels, *Canadian Geotechnical Journal*, 36(1), 136-151.
- Martin, C. D., Kaiser, P. K., and Christiansson, R., 2003, Stress, instability and design of underground excavation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 1027-1047.
- Rho, S. Y., 2006, Delphi Technique: Professional insight to predict the future, *Korea Research Institute for Human Settlements*, No. 299, 53-62.
- Rowe, G., and Wright, G., 2001, Expert opinions in forecasting : The role of the Delphi technique, in J. Armstrong (Ed.) *Principles of Forecasting*, Boston: Kluwer Academic, 125-144.
- Ziglio, E., 1996, The Delphi method and its contribution to decision-making. In M. Adler and E. Ziglio (Eds). *Gazing into the oracle : the Delphi method and its application to social policy and public health*, 3-33. London: Jessica Kingsley Publishers.
- Shin, H. S., Kwon, Y. Ch., Jung, Y. S., Bae, G. J., and Kim, Y. G., 2009, Methodology for quantitative hazard evaluation for tunnel collapses based on case histories in Korea, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 46(5), 1072-1087.
- Shin, H. S., Lee, S. S., Kim, K. Y. and Bae, G. J., 2013, Quantitative evaluation of collapse hazard levels of tunnel faces by interlinked consideration of face mapping, design and construction data : focused on adaptive weight, *Tunnelling and Underground Space Association*, 15(5), 505-522.
- KICT, 2009, Development of Technologies for Minimizing and Preventing the Disaster on Tunnel Construction (VI), Final Technical Report, KICT 2009-071, Korea Institute of Construction Technology (KICT), 867p.
- Yoo, Y. I., Kim, M. K., Song, J. J., 2008, Methodology to Quantify Rock Behavior in Shallow Rock Tunnels by Analytic Hierarchy Process and Rock Engineering Systems, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel and Underground Space*, 18(6), 465-479.

#### 김정흠

한국건설기술연구원 지반연구소  
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283  
Tel: 031-910-0776  
E-mail: vins@yonsei.ac.kr

#### 김창용

한국건설기술연구원 미래융합연구소  
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283  
Tel: 031-910-0047  
E-mail: cykim@kict.re.kr

#### 이승수

한양대학교 건설환경공학과  
04763 서울특별시 성동구 왕십리로 222  
Tel: 02-2220-4482  
E-mail: rokhonor99@hanmail.net

#### 이준환

연세대학교 건설환경공학과  
03722 서울특별시 서대문구 연세로 50  
Tel: 02-2123-5796  
E-mail: junlee@yonsei.ac.kr