

TBM 터널 굴착 안정성에 영향을 미치는 위험요소 도출 및 중요도 결정

성주현¹ · 윤준웅^{2*}

¹정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 책임연구원

²비회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 선임연구원

Identification and importance analysis of hazards affecting the stability of TBM tunnelling works

Seong, Joo-Hyun¹ · Youn, Jun-Ung^{2*}

¹Principal Researcher, Research Institute for Infrastructure Performance, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

²Senior Researcher, Research Institute for Infrastructure Performance, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

*Corresponding Author : Youn, Jun-Ung, juyoun@kistec.or.kr

Abstract

There is a growing need to apply TBM tunnelling method for the construction of underground facilities such as subways and utility tunnels in urban areas. Due to the variability and uncertainty of the ground, tunnelling in urban areas has various safety hazards which could cause damage to people and properties and it is very costly to recover from accidents. Therefore, it is very important to identify hazards from the planning and design phase and to establish risk mitigation measures. In this study, a total of 31 hazards affecting the stability of TBM tunnelling works in urban areas were listed from both the technical literature and correspondence with experts in tunnelling area. The importance and priorities of the hazards were analyzed by conducting Delphi technique, which is a decision-making method by consensus among experts. Finally, 12 hazards that satisfy the content validity criteria were settled and could be used as major control factors for accident prevention during TBM tunnelling works.

Keywords: Hazards, Risk management, TBM tunnelling, Delphi survey, Priorities

초 록

도심지에서 지하철, 공동구 등의 지하시설물 건설을 위해 TBM 터널 공법 적용의 필요성이 증가하고 있다. 터널공사는 지반의 변동성 및 불확실성으로 인하여 건설 중 다양한 사고 발생 위험요소를 내재하고 있고, 사고발생 시 인명 피해 유발 및 복구에 큰 비용이 소요되므로 계획 및 설계단계에서 공사의 위험요소를 도출하고 저감대책을 수립하는

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
19(6)973-983(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.6.973>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 16, 2017

Revised November 6, 2017

Accepted November 13, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

리스크 관리가 매우 중요하다. 본 연구에서는 문헌 연구 및 전문가 의견 조사를 통하여 도심지 TBM 터널 공사 안정성에 영향을 미치는 총 31개의 위험요소를 도출하였고, 전문가 합의에 의한 의사결정 방법인 델파이 기법을 통해 위험요소별 중요도를 평가하였다. 최종적으로 내용타당도 기준을 만족하는 12개의 위험요소가 결정되었으며, TBM 터널공사 중 사고 예방을 위한 중점 관리요소로 활용 가능할 것이다.

주요어: 위험요소, 리스크 관리, TBM 터널 굴착, 델파이 기법, 우선 요소

1. 서론

사회 인프라 확충과 토지의 효율적인 이용을 위하여 터널 건설 및 수요가 증가하고 있으며, 관련 기술 또한 발전하고 있으나 터널건설 중 붕괴사고를 포함한 안전사고는 크게 줄어들고 있지 않다. 국내 건설 사고사례 데이터베이스를 운영중인 건설안전정보시스템(COSMIS)에 의하면 2001년부터 2016년까지 보고된 국내 도로터널, 철도터널 공사 사고가 63건으로 전체 토목공사 사고 268건 중 24%를 차지하며, 사망자수 및 피해금액 기준으로 전체 토목공사 대비 각각 17%, 40%를 차지하고 있다. 이와 같이 터널 공사는 지반의 변동성 및 불확실성의 고유한 특성 때문에 사고 발생 위험요소를 내재하고 있으며, 사고 발생 시 인명피해 유발 및 복구에 큰 비용이 소요되는 대형 재해 발생 우려가 높다. 특히 지하철, 도로, 공동구 등의 확보를 위해 도심지에 건설되는 터널의 경우 터널 붕괴, 지반 침하 등 예기치 않은 사고 발생 시 인접한 지상 구조물 및 각종 지하매설물에 손상을 야기하고 대규모 인명 피해를 유발할 수 있으므로 사고 저감을 위한 리스크 관리가 매우 중요하다.

터널 공사 및 지하공간 개발에 대한 리스크 관리기법에 대한 연구는 꾸준히 이루어져 왔다. 국제터널협회(ITA) WG2에서는 터널공사 및 지하공간 개발 프로젝트에서의 리스크 관리를 위한 가이드라인을 제시하였고(Eskesen et al., 2004), Kim and Kim (2008)은 터널공사에 영향을 미치는 위험요소를 안정성 측면과 환경성 측면으로 구분하여 위험도를 평가하였으며, Seo et al. (2010)은 도심지 대규모 지하공사의 리스크 분석 체계를 개발하였다. 또한, 영국, 미국, 캐나다, 싱가포르 등에서는 설계단계에서부터 위험요소(Hazards)를 도출하여 위험성(Risk)을 평가하고 관리하는 제도가 운영되고 있으며, 국내에도 2016년에 건설기술 진흥법에 따라 설계의 안전성 검토 제도가 도입되었다(MOLIT, 2017).

이와 같은 다양한 형태의 리스크 관리기법을 실제 건설공사에 적용하기 위해서는 우선 해당 공사의 다양한 위험요소를 도출하여 위험요소별 발생 빈도와 심각성으로 결정되는 위험성을 평가하고 저감대책을 수립하는 과정이 필요하다. 곧 잠재적 위험요소의 인지 및 평가가 리스크 관리기법 적용을 위한 첫 번째 단계이며 리스크 저감을 위한 핵심적인 요소이다. 다양한 건설공사 종류별로 공종별 위험요소 및 저감대책의 예제를 제시하고 있는 건설안전정보시스템(COSMIS)에는 터널공사의 경우 개착식 및 NATM 터널에 대하여 공종별 위험요소와 저감대책 목록이 제시되어 있으나, TBM 터널 공사와 관련된 위험요소는 포함되어 있지 않다. TBM 터널공사의 경우 NATM 터널공사 대비 상대적으로 사고 발생사례가 많지 않고 피해 정도가 크지 않은 것으로 알려져 있으나, 예기치 못한

문제 및 사고 발생으로 인해 TBM 장비의 운용이 불가할 경우 대책 공법의 적용이 용이하지 않아 장기간 작업 중단이 불가피하고 상부 구조물에도 피해를 야기할 수 있으므로 이를 예방하기 위하여 TBM 터널공사에 대한 위험 요소의 발굴 및 관리가 필요하다.

도심지에 지하철, 공동구 등을 설치하기 위한 터널 건설의 수요가 증가하고 있으며 도심지의 경우 교통 조건, 지반 조건, 다양한 인접 시설물 및 소음, 진동에 대한 민원 등으로 인해 TBM 터널공법 적용의 필요성이 증가하고 있다. 본 논문에서는 도심지에서 TBM 터널 공사 수행 시 주요한 위험요소를 도출하고 중요도를 평가하였다. 문헌 연구 및 관련 자료조사를 통하여 위험요소를 정의하고 도출하였으며, 전문가들의 의견에 기반한 의사결정기법인 델파이 기법을 이용해서 위험요소별 중요도를 평가함으로써 TBM 터널공사의 사고 저감을 위해 우선적으로 관리해야 할 요소를 도출하였다.

2. 위험요소 도출

2.1 위험요소 범위

터널 공사 중 예기치 못한 사고 및 문제 발생 시 건설 대상구조물인 터널뿐만 아니라 인접한 지상, 지중에까지 인명 피해, 물적 피해, 환경 피해, 경제적 손실 및 프로젝트 준공 지연 등의 다양한 영향을 미치게 되며, 관리 및 저감하고자 하는 영향의 범위에 따라 다양한 위험요소가 고려되어야 한다. 국내 설계의 안전성 검토 업무 매뉴얼의 경우 위험요소를 건설현장의 공사목적물 및 주변 건축물 등의 안전과 작업자들의 안전을 저해하는 발생 가능한 유해위험으로 정의하고 있다(MOLIT, 2017). 본 논문에서는 이와 부합하도록 건설안전측면의 위험요소에 초점을 맞추었으며, 건설 중인 터널, 인접한 지상 및 지하매설 구조물, 작업자의 안전과 관련하여 물적, 인적 피해를 유발하는 요소를 도출하였다. 곧, 터널 붕괴사고 발생 등으로 인한 공기 지연 문제는 포함하고 인허가 지연으로 인한 공기 지연 등 사회적 요인의 위험요소는 고려하지 않았다.

Kim and Kim (2008)은 터널 공사 중 주요 위험요소로 안정성 위험요소, 환경성 위험요소로 구분하여 제시하였으며 안정성 위험요소로는 지반상태, 지반침하, 지하수 유입, 지진영향을 선정하였다. Sousa (2010)은 터널 공사 중 사고 발생의 주요 원인을 내적인 요인과 외적인 요인으로 구분하여 정리하였다(Fig. 1). 내적 요인에는 터널 계획 및 설계 중의 오류뿐만 아니라, 시공 및 관리 오류가 포함되며, 외적 요인에는 지반 조건, 지하수 조건, 예측하지 못한 인공지장물, 지진, 화재 등이 포함된다. 지진 및 화재의 경우 발생 시 터널 붕괴와 같은 대형 재해를 야기할 수 있지만 터널 공사 중 발생 확률이 작으므로 주로 터널 공용 중 피해를 유발하는 원인으로 분류하였다. 이와 같이 터널 시공 중 사고는 지반 및 지하수 조건에 따른 지반의 거동뿐만 아니라 인적 오류(human errors)와 지진이나 지하수위 변동과 같은 외부 환경적 요인에도 영향을 받게 되며, 본 논문에서는 위험요소로 인적 오류와 관련된 항목은 제외하였다.

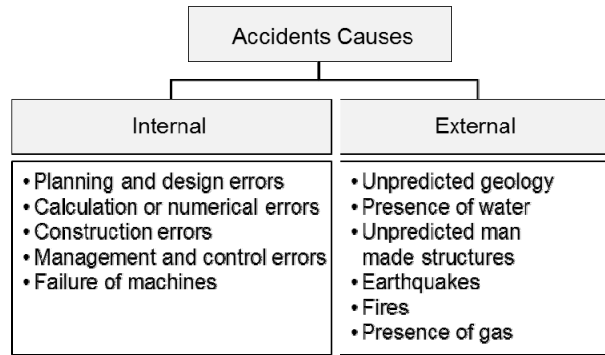


Fig. 1. Main causes for tunnel accidents during construction (Sousa, 2010)

2.2 위험요소 도출 결과

2.1절에서 정의한 위험요소 범위에 따라 관련 문헌 및 선행연구들을 분석하고 전문가 설문 조사를 수행하여 도심지에서 TBM 터널 공사수행 시 주요한 위험요소를 도출하였다(Maidl et al., 2013; Safe Work Australia, 2013; Zou, 2017; among others). 지하수 저하 발생, 지표면 침하 및 변형 발생과 같이 위험요소별 상호 연관관계를 가지는 경우가 있으나 독립적으로 발생이 가능하거나 제 3의 요인에 영향을 받을 수 있는 경우 별도의 항목으로 분류하였으며 Table 1에 나타낸 바와 같이 총 31개의 위험요소가 도출되었고, 위험요소를 주요요인에 따라 분류하면 Table 1과 같다.

터널 굴착 노선 중 특정 구간에서의 위험요소로는 TBM 장비 발전작업구 및 도달작업구의 불안정성[1], 급곡 선부 굴진 구간[9]이 도출되었다. 터널 본선 굴착 중 지반조건 관련 위험요소로는 터널 막장면에서의 불안정성 [2], 썰기형태의 암탈락 우려 구간[4], 커터의 마모, 손상 및 이에 따른 굴진률 저하와 잦은 커터 교환이 우려되는 고강도 및 고마모성 암 구간[5], 굴진률 하락 및 선형 오차를 유발할 수 있는 복합지반 막장면 및 핵석 출현 구간 [6], 연약대구간[7], 지표면 침하 및 변형 발생[11], TBM 장비 고장/끼임 발생[15]이 도출되었고, 지하수 관련 위험요소로 과도한 용출수 발생 및 고수압 조건[3], 지하수 저하 발생[10]이 도출되었다.

인접 시설물의 유무에 영향을 받는 위험요소로 터널 굴진단면이 적정히 폐공 처리되지 않은 시추공과 교차시 시추공을 통해 막장 이수압이 분출하여 피해를 발생 시키는 미확인 기존 시추공과 굴진단면의 교차 구간, [8]인접 구조물/지하매설물 등 손상 발생[12]이 추출되었다. 그리고 TBM 굴착 및 라이닝 설치 공종과 관련된 위험요소로 커터교환[13], 세그먼트라이닝 크랙 및 손상 발생[14], 세그먼트라이닝 설치, 뒤채움 주입, 지반보강[16]이 도출 되었다.

이외에 대형 화재 및 지진 발생[17, 18], 비인가자의 제한지역 출입[19], 대형 TBM 장비의 운송, 하강 및 조립 [20]이 위험요소로 도출되었으며, TBM 장비 운용시 다양한 전력공급설비, 환기설비, 공기압축설비, 급수 및 배수설비, 기타 특수설비 등이 동반되어 이에 따른 작업자의 안전, 보건문제를 야기할 수 있는 전기[21], 유독가스 및 먼지[22, 23, 24], 유해화학물질[25], 고열[26], 소음[27], 고압시스템[28]이 위험요소로 도출되었다.

마지막으로 TBM 장비 종류별 상이한 위험요소로 개방형TBM (Open TBM)의 경우 장비 추진시 반력을 얻기 위한 그리퍼 접촉구간의 파쇄 발생[29], 쉴드TBM (Shield TBM)의 경우 고압의 압축공기[30], 이수식 쉴드TBM의 경우 높은 이수압력[31]이 위험요소로 도출되었다.

Table 1. Evaluation Items for the Delphi survey

No.	Items	Round of the Delphi survey		
		1st	2nd	3rd
1	Instability in TBM launch / break-through locations	○	○	○
2	General Instability of tunnel face	○	○	○
3	Tunnelling in high water pressure and excessive water ingress	○	○	○
4	Tunnelling in blocky rock	○	○	○
5	Tunnelling in strong and abrasive rock	○	○	○
6	Tunnelling in mixed face conditions and encounter of corestones	○	○	○
7	Tunnelling in weak zone	○	○	○
8	Tunnelling through unpredicted previous borehole locations	-	○	○
9	Tunnelling with tight turning radius	○	○	○
10	Groundwater drawdown	-	○	○
11	General settlement and ground movement	○	○	○
12	Damage of adjacent building and utility	○	○	○
13	Cutter-head interventions	○	○	○
14	Crack and damage of segment lining	○	○	○
15	TBM failure / gets stuck	○	○	○
16	Ground support installation including access, ring build, void filling	○	○	○

Items not considered in the second and third Delphi survey: [17] Fires, [18] Earthquakes, [19] Access restrictions, [20] TBM Delivery/Lowering/Assembly, [21] Electricity, [22] Irrespirable atmosphere including toxic fumes, [23] Gas accumulation, [24] Dust, [25] Chemical exposure, [26] Heat exposure, [27] Noise exposure, [28] Pressurised hydraulic systems, [29] Crush areas around grippers (Open TBM), [30] Working with compressed air (Shield TBM), [31] Working with high pressure slurry (Slurry Shield TBM)

3. 위험요소 중요도 결정

3.1 위험요소 중요도 결정 범위 및 방법

도심지 TBM 터널 공사 시 도출된 위험요소별 중요도를 결정함으로써 사고 저감을 위한 우선 관리 요소를 결정하고자 하였다. 위험요소별 중요도는 실제 사고 발생사례 및 원인 조사결과로부터 분석하는 것이 가장 합리적인 방법이나 TBM 터널의 경우 공사 중 사고에 대해 보고된 자료가 적고 원인 분석을 포함한 자료는 보다 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 TBM 터널공사의 사고저감을 위한 우선관리요소 도출 및 결정을 위하여 델파이 기법을 이용하였다.

델파이 기법은 집단 의사결정 기법 중의 하나로, 특정한 주제에 대해 해당분야 전문가들이 의견을 제시하고 조정하는 과정을 반복하여, 최종 합의점을 집단적 판단으로 정리하는 일련의 절차로 정의되며, 절차의 반응과 통제된 피드백, 응답자의 익명, 그리고 통계적 집단 반응의 절차를 특징으로 한다(Lee, 2001). 곧, 전문가들이 한자리에 모여서 토론 형태로 논의할 경우 다수의 주장에 밀려 소수가 의견을 제시하지 않거나 쉽게 포기할 수 있는 문제를 해소할 수 있으며, 토목 및 지반공학 분야에서는 An and Kim (2016)이 터널의 성능중심 평가기법 개발에 활용하였고, Seong and Jung (2017)은 도심지 개착식 굴착공사 붕괴사고 저감을 위한 우선 관리 요소 결정을 위하여 활용하였다.

본 연구에서 적용한 델파이 기법 수행 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다. 델파이 기법은 설문에 참여한 전문가들의 주관적 의견에 따라 결과가 도출되는 의사기법으로 델파이 분석에 참여하는 전문가 패널의 선정 및 구성이 중요하다. 델파이 분석에 참여하는 패널의 수에 관한 명확한 규정은 없으나 패널의 수가 증가함에 따라 응답 결과의 신뢰성이 향상되는 것으로 알려져 있다. 델파이 분석의 신뢰성을 최대화시키기 위해서는 패널의 수가 최소한 10명 이상이어야 하며(Ewing, 1991), 10~15명의 패널만으로도 유용한 결과를 얻을 수 있고(Ziglio, 1996), Brockhoff (1975)에 따르면 이상적인 조건하에서 4명의 패널만으로도 효과적인 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 전문가들의 전문성 및 성실성 등을 고려하여 전문가 패널을 구성하였다. TBM 터널 공사분야 관련 지식과 경험을 갖춘 전문가들을 대상으로 건설안전 측면에 초점을 맞춘 본 연구의 위험요소 대상 범위와 관련 문헌을 분석하여 도출된 예비 위험요소 항목들을 제시하여 전문가들의 참여의사를 타진 후 11명의 전문가 패널을 구성하였다. 패널은 모두 지반 및 암반 공학의 전문성에 기반을 둔 전문가들로 구성되었고, 학계 및 연구 분야 5명, 설계 분야 3명, 시공 분야 3명으로 구성되었다.

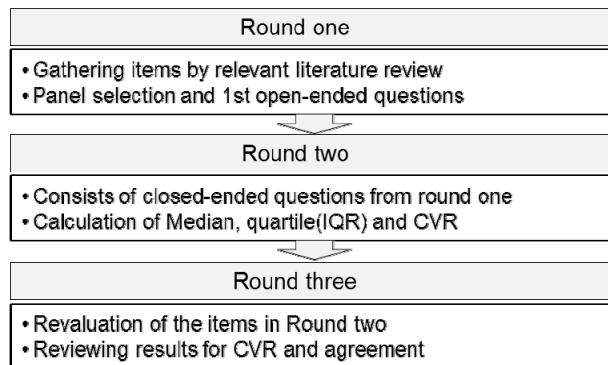


Fig. 2. Delphi technique process in this study

1차 델파이 조사는 문헌 연구를 통해 도출된 위험요소 목록과 위험요소 범위, 중요도 평가를 위한 위험성 기준을 제시하고 개방형 질문을 통하여 목록의 타당성 및 추가적인 위험요소 항목을 전문가로부터 제시 받았다. Table 1에 나타낸 바와 같이 미확인 기준 시추공과 굴진단면의 교차 구간, 지하수 저하 발생 등의 항목이 추가되었고, 총 31개의 항목 중에서 16개의 항목이 중요도 평가를 위한 항목으로 선정되었다. 대형 화재 및 지진의 경우

발생 시 피해정도가 크나 발생빈도가 낮아 터널의 공용상태가 아닌 시공 중의 위험요소로 한정된 본 연구 취지와 중요도 평가가 편향될 수 있다는 우려에 따라 제외되었다. 그리고 굴착 공종과 직접 관련이 있지 않은 TBM 장비의 운송, 하강 및 조립, 비인가자의 제한지역 출입이 제외되었으며, TBM 장비 종류에 따라 상이하거나 장비 개선, 감지기 설치, 작업자의 개인보호구 착용에 따라 저감이 가능한 항목들이 중요도 평가시 제외되었다. 전반적으로 평가의 편향성 우려, 전술한 바와 같은 전문가 패널의 전공 분야, 그리고 분석의 용이성이 고려되어 16개의 위험 요소가 2차 및 3차 델파이 설문문을 통한 중요도 결정시에 이용되었다.

2차 델파이 조사는 1차 조사에서 선정된 평가 항목들로 폐쇄형 설문지를 구성하고 각 항목의 중요도를 리커트 5점 척도(5-point Likert scale)에 따라 전문가들로부터 응답받았다. 설문결과는 통계분석을 통하여 각 항목의 중요도 및 합의 수준 등을 평가하였다.

3차 델파이 조사는 2차 조사와 동일한 항목을 포함하는 폐쇄형 설문지에 2차 조사결과의 중앙값과 사분범위를 표시하고 항목별 중요도를 평가하도록 함으로써 각 항목의 중요도를 재평가 할 수 있는 의견수렴과정을 포함하였으며 2차 조사와 마찬가지로 통계분석을 수행하였다.

3.2 델파이 조사 결과 및 신뢰성 검증

2차 및 3차 델파이 조사 결과에 대해 평균, 표준편차 및 내용타당도를 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 내용타당도(Content Validity Ratio, CVR)는 식 (1)과 같이 평가되며 델파이 설문 결과에서 각 항목의 타당성 여부를 판단하기 위해서 이용된다(Lawshe, 1975).

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

여기서, n_e 는 해당 항목이 ‘중요하다’라고 응답한 전문가의 수로써 리커트 5점 척도를 사용할 경우 4점과 5점이 이에 해당하며, N 은 설문문에 참여한 전체 응답자의 수이다. 모든 응답자가 ‘중요하다’고 응답할 경우 CVR 값은 1을 가지며, 50% 초과, 100% 미만의 응답자가 ‘중요하다’고 응답할 경우 CVR값은 0에서 0.99의 값, 50% 미만의 응답자가 ‘중요하다’고 응답할 경우 CVR값은 0을 가진다. CVR값에 의한 내용타당도의 판단은 전체 응답자 수에 따라 기준값이 달라지며, 본 연구에서는 11명의 전문가 패널이 참여하였으므로 CVR값 0.59를 기준으로 내용타당도를 평가하였다(Lawshe, 1975).

2차 조사에서는 터널 막장면에서의 불안정성, 과도한 용출수 발생 및 고수압 조건, TBM 장비 고장 및 끼임, 발진작업구 및 도달작업구의 불안정성, 연약대 구간, 인접 구조물, 지하매설물 등 손상 발생, 썩기형태의 암탈락 우려 구간의 7개 항목이 0.59 이상의 내용타당도 CVR값을 나타내었다. 3차 델파이 조사 결과 내용타당도 기준을 만족하는 항목은 2차 조사의 7개 항목이 포함되었고, 복합지반 막장면 및 핵석 출현 구간, 급곡선부 굴진, 지하수 저하

발생, 지표면 침하 및 변형 발생, 커터교환의 5개 항목이 추가되어 총 12개 항목으로 평가되었다. 곧 3차 조사에서는 4점과 5점을 받은 항목이 증가하였고, 대부분의 항목에서 중요도 점수의 평균값이 상승한 것으로 나타났다.

Table 2. Results of 2nd and 3rd Delphi surveys

No.	Items	2nd Delphi survey		3rd Delphi survey	
		M ± SD	CVR	M ± SD	CVR
1	Instability in TBM launch / break-through locations	4.09 ± 1.08	0.636	4.36 ± 0.64	0.818
2	General Instability of tunnel face	4.45 ± 0.66	0.818	4.73 ± 0.45	1.000
3	Tunnelling in high water pressure and excessive water ingress	4.27 ± 0.86	0.818	4.36 ± 0.48	1.000
4	Tunnelling in blocky rock	3.82 ± 0.39	0.636	3.82 ± 0.39	0.636
5	Tunnelling in strong and abrasive rock	2.82 ± 0.83	-0.455	3.00 ± 0.43	-0.818
6	Tunnelling in mixed face conditions and encounter of corestones	3.91 ± 0.67	0.455	3.82 ± 0.39	0.636
7	Tunnelling in weak zone	4.09 ± 0.67	0.636	4.18 ± 0.57	0.818
8	Tunnelling through unpredicted previous borehole locations	2.64 ± 0.98	-0.455	3.09 ± 0.79	-0.636
9	Tunnelling with tight turning radius	3.45 ± 0.66	0.091	3.82 ± 0.72	0.636
10	Groundwater drawdown	3.64 ± 0.88	0.455	3.91 ± 0.51	0.636
11	General settlement and ground movement	3.82 ± 0.57	0.455	4.00 ± 0.60	0.636
12	Damage of adjacent building and utility	4.09 ± 0.67	0.636	4.18 ± 0.57	0.818
13	Cutter-head interventions	3.82 ± 0.57	0.455	3.91 ± 0.51	0.636
14	Crack and damage of segment lining	3.64 ± 0.48	0.273	3.73 ± 0.45	0.455
15	TBM failure / gets stuck	4.27 ± 0.86	0.818	4.45 ± 0.50	1.000
16	Ground support installation including access, ring build, void filling	2.82 ± 0.83	-0.455	3.00 ± 0.43	-0.818

2차 및 3차 델파이 조사 결과에 대해 각각 수렴도(Convergence), 합의도(Agreement)를 계산하여 Table 3에 나타내었다. 수렴도는 델파이 조사를 통해 얻어진 응답결과가 수렴하고 있는가를 나타내는 지수이며 식 (2)를 이용하여 평가하였다. 수렴도가 작을수록 사분범위가 작은 것을 의미하므로 전문가의 의견이 수렴하고 있음을 알 수 있다. 합의도는 식 (3)을 이용하여 평가하였고 사분범위에 포함되는 응답자의 간격이 중앙값을 중심으로 분포된 범위를 나타내며 큰 값을 가질수록 조사의 응답이 합의된 것으로 판단할 수 있다.

$$\text{Convergence} = \frac{Q_3 - Q_1}{2} \quad (2)$$

$$\text{Agreement} = 1 - \frac{Q_3 - Q_1}{M_d} \quad (3)$$

여기서, Q_3 는 3/4분위수, Q_1 은 1/4분위수, M_d 는 중앙값이다.

수렴도 값은 3차 델파이 조사결과에서 평균 0.16의 값을 나타내었으며, 2차 조사결과와 비교하여 감소하여 전문가들의 의견이 보다 수렴된 것을 알 수 있다. 합의도는 2차 델파이 조사결과에서 평균 0.75의 값을 가졌고, 3차 조사에서는 0.92로 값이 증가하여 조사의 응답이 보다 합의된 것을 알 수 있다. 이는 3차 델파이 조사에서 2차 델파이 조사의 중앙값 및 사분범위가 제시되어 전문가 의견이 보다 수렴되었고, 또한 대부분 항목의 중요도 점수가 상승한 영향으로 판단된다.

Table 3. Results of stability evaluation for 2nd and 3rd Delphi surveys

No.	Items	Convergence		Agreement		Rank by CVR	
		2nd	3rd	2nd	3rd	2nd	3rd
1	Instability in TBM launch / break-through locations	0.50	0.50	0.75	0.75	4	4
2	General Instability of tunnel face	0.50	0.25	0.80	0.90	1	1
3	Tunnelling in high water pressure and excessive water ingress	0.50	0.50	0.75	0.75	1	1
4	Tunnelling in blocky rock	0.00	0.00	1.00	1.00	4	7
5	Tunnelling in strong and abrasive rock	0.75	0.00	0.50	1.00	14	15
6	Tunnelling in mixed face conditions and encounter of corestones	0.25	0.00	0.88	1.00	8	7
7	Tunnelling in weak zone	0.25	0.25	0.88	0.88	4	4
8	Tunnelling through unpredicted previous borehole locations	0.75	0.00	0.25	1.00	14	14
9	Tunnelling with tight turning radius	0.50	0.00	0.75	1.00	13	7
10	Groundwater drawdown	0.25	0.00	0.88	1.00	8	7
11	General settlement and ground movement	0.25	0.00	0.88	1.00	8	7
12	Damage of adjacent building and utility	0.25	0.25	0.88	0.88	4	4
13	Cutter-head interventions	0.25	0.00	0.88	1.00	8	7
14	Crack and damage of segment lining	0.50	0.25	0.75	0.88	12	13
15	TBM failure / gets stuck	0.50	0.50	0.75	0.75	1	1
16	Ground support installation including access, ring build, void filling	0.75	0.00	0.50	1.00	14	15
Average		0.42	0.16	0.75	0.92	-	-

3.3 결과 분석 및 위험성 관리 방안

2차 및 3차 델파이 조사결과와 내용타당도 평가값에 의한 위험요소별 중요도 순위를 Table 3에 함께 도시하였다. 본 조사결과에서는 전체 16개 항목 중 12개 항목이 내용타당도 기준을 만족하여 도심지 TBM 터널공사 시 주요한 위험요소로 결정되었으며 이에 대한 중점적인 모니터링 및 관리가 필요할 것으로 판단된다. 내용타당도 기준을 만족하지 못한 4개의 위험요소는 세그먼트라이닝 크랙 및 손상 발생, 기존 시추공과 굴진단면의 교차 구간, 고강도 및 고마모성 암 구간, 세그먼트라이닝 설치, 뒤채움 주입, 지반보강 항목들이다. 그러나 전술한 바와 같이

3차 델파이 조사의 경우 2차 조사에 비하여 대부분 항목에서 중요도 점수의 평균값이 상승하였고, 하위 4개 항목 역시 중요도 점수의 평균값이 상승하였다. 급곡선부 굴진, 기존 시추공과 굴진단면의 교차구간의 경우 사전 대비가 가능하고 피해 영향정도가 상대적으로 제한적이고, 라이닝 크랙 및 손상 발생 시 보수가 가능하므로 상대적으로 중요도가 낮게 평가된 것으로 추정된다. 또한, 3차 델파이 조사 시 하위 4개 항목 모두 중요도 점수의 평균값은 3점을 상회하는 것으로 나타났고, 따라서 16개 항목에 대한 중요도를 응답함에 따라 다른 항목 대비 상대적으로 4점 또는 5점으로 평가받지 못하여 내용타당도 기준을 충족하지 못한 것으로 추정된다.

이와 같이 16개 위험요소 항목의 중요도 값이 모두 3점을 상회하여 중요한 위험요소로 평가되었으며, 또한 각 요소들이 조합되어 작용할 경우 보다 큰 대형 피해를 야기할 수 있다. 따라서 이를 인지하고 각 터널 굴착공사의 터널 제원, 굴착단면 주위의 지반 조건 등 프로젝트별 특성을 감안하여 위험성을 평가하고 관리하는 것이 필요할 것이다.

내용타당도 기준으로 1위에서 7위까지의 항목들은 모두 지반 및 지질 조건, 지하수 조건, 미확인된 시설물과 관련된 항목들이다. 따라서 설계단계에서 지반, 지하수 조건 등을 상세히 파악하고 인접시설물에 대한 영향정도를 검토하여야 하며, 이를 반영하여 적합한 TBM 장비를 선정하는 것이 중요하다. 그리고 시공단계에서도 지표면에서 추가 시추조사를 비롯한 지반조사를 수행하고, 굴진면에서 선진 수평시추, 물리탐사 등의 방법을 이용하여 터널 건설 구간에 대한 지질학적, 수리학적 문제점을 사전에 파악하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 문헌조사 및 델파이 기법을 이용하여 도심지 TBM 터널공사 수행중 터널 및 주변 시설물, 그리고 작업자들의 안전을 저해할 우려가 있는 위험요소를 도출하고, 터널굴착공사의 안정성에 영향을 미치는 위험요소에 대한 중요도를 평가하였다.

총 31개의 위험요소 항목이 도출되었으며, 이중 TBM 장비 개선, 감지기 설치, 작업자의 개인보호구 착용에 따라 저감이 용이한 항목, TBM 장비 운반, 조립 등 부대 공종 관련 항목, 터널굴착 시공 중 발생가능성이 낮으나 중요도 평가시 편향성 우려가 있는 지진, 화재의 15개 항목을 제외한 16개의 위험요소 항목에 대한 중요도 평가를 수행하였다. 위험성 평가항목을 주요요인에 따라 분류시 굴착 노선 중 특정구간 관련 2개, 터널 본선 굴착 중 지반 조건 관련 7개, 지하수 조건 관련 2개, 인접시설물 관련 2개, 터널 굴착 및 라이닝 설치 공종 관련 3개 항목으로 구성된다. 3차 델파이 조사 결과 이중 12개 항목이 내용타당도 값을 만족하는 것으로 나타났으며, 따라서 도심지 TBM 터널공사 사고 저감을 위한 우선 관리 요소로 활용이 가능할 것이라 판단된다.

도심지 TBM 터널공사는 프로젝트별 각각 상이한 특성을 가지므로 실제 프로젝트 수행 시에는 본 연구에서도 출된 위험요소 항목을 바탕으로 굴착 인접 구간의 지질학적 특성, 토피고 조건, TBM 장비 종류 및 성능 등을 반영하여 항목별 중요도를 산정하는 것이 필요하다. 계획 및 설계 단계에서부터 이러한 위험요소 항목에 대한 위험성을 평가하고 저감대책을 수립함으로써 TBM 터널공사의 사고저감이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 ‘도심지 소단면(φ 3.5 m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(17SCIP-B105148-03)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Adler, M., Ziglio, E. (1996), Gazing into the Oracle: The Delphi Method and its Application to Social Policy and Public Health, Jessica Kingsley, London, pp. 3-33.
2. An, J.W., Kim, H.G. (2016), “Developments of performance-based assessment technique for existing tunnels”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Association, Vol. 18, No. 6, pp. 525-533.
3. Brockhoff, K. (1975), “The performance of forecasting groups in computer dialogue and face-to-face discussion”, The Delphi Method: Technique and Applications, Addison Wesley, London, pp. 291-321.
4. Eskesen, S.D., Tengborg, P., Kampmann, J., Veicherts, T. (2004), “Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, No. 3, pp. 217-237.
5. 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.
6. Kim, Y.G., Kim, D.H. (2008), “Application of risk analysis and assessment considering tunnel stability and environmental effects in tunnel design”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Association, Vol. 10, No. 1, pp. 1-15.
7. Lawshe, C.H. (1975), “A quantitative approach to content validity”, Personnel Psychology, Vol. 28, No. 4, pp. 563-575.
8. Lee, J.S. (2001), Delphi Method, Kyoyookbook, Seoul.
9. Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., Wehrmeyer, G. (2013), Mechanised Shield Tunnelling, 2nd Edition, John Wiley & Sons, pp. 359-370.
10. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2017), Manual of Design for Safety.
11. Safe Work Australia (2013), Guide for Tunnelling Works. Available at : <https://www.safeworkaustralia.gov.au>.
12. Seo, J.W., Yoon, J.H., Kim, J.H., Jee, S.H. (2010), “Development of risk analysis structure for large-scale underground construction in urban areas”, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 3, pp. 59-68.
13. Seong, J.H., Jung, M.H. (2017), “Determination of priorities for management to reduce collapse accident of open excavation and road sink in urban areas”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Association, Vol. 19, No. 3, pp. 489-501.
14. Sousa, R.L. (2010), Risk analysis for tunneling projects, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, pp. 114-115.
15. Zou, D. (2017), Theory and technology of rock excavation for civil engineering, Springer Singapore.