

# 도심지 소단면 터널식 공동구의 핵심 안전 위험요소 및 위험성 평가 연구

성주현<sup>1</sup> · 정민형<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 수석연구원

<sup>2</sup>비회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 선임연구원

## Study on key safety hazards and risk assessments for small section utility tunnel in urban areas

Joo-Hyun Seong<sup>1</sup> · Min-Hyung Jung<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Senior Researcher, Research Institute for Infrastructure Performance, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

\*Corresponding Author : Min-Hyung Jung, mhjung@kistec.or.kr

### Abstract

In line with the increased usability of utility pipe conduits in urban areas, construction and R&D activities of utility tunnel, incorporated with the shield TBM method, are actively under way. The utility tunnels are installed through underground excavation, and thus are relatively weak in terms of construction safety. However, hazards associated with the utility tunnel construction have not been properly identified, despite the introduction of a policy to the 'Design for Safety' for the purpose of reducing accident rates in the construction industry. Therefore, in this study, following the derivation of hazards associated with utility tunnel, these hazards were then used as the basis to uncover key safety hazards requiring extensive management in a field, which were then used to conduct a risk assessment having applied the matrix method so that the results can be utilized in risk assessment during the stages of utility tunnel planning, design, and construction, while also serving as a data reference.

**Keywords:** Utility tunnel, Safety hazards, Risk assessment, Likelihood, Severity

### 초 록

도심지에서의 공동구의 활용성 증가에 따라 쉴드 TBM 공법이 적용된 터널식 공동구의 시공 및 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 터널식 공동구는 지하굴착 공사로서 건설안전에 상대적으로 취약하지만, 건설업 재해율 감소를 위한 설계안전성 검토 제도 도입에도 불구하고 터널식 공동구 건설에 적합한 위험요소가 제대로 알려져 있지 않다. 따라서

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
20(6)931-946(2018)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.931>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 10, 2018

Revised September 3, 2018

Accepted September 7, 2018



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 © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

본 연구에서는 터널식 공동구에 적합한 안전 위험요소를 발굴하고 이 중에서 중점으로 관리되어야 할 핵심 안전 위험요소를 도출하였다. 도출된 핵심 안전 위험요소는 매트릭스 기법을 적용하여 위험성 평가를 실시함으로써 공동구 계획, 설계 및 시공 단계의 위험성 평가 및 주요 참고 자료로 사용될 수 있도록 하였다.

**주요어:** 터널식 공동구, 안전 위험요소, 위험성 평가, 발생빈도, 사고심각성

## 1. 서론

공동구는 가스, 전기, 통신시설 및 수도와 같은 지하매설물을 수용하는 시설로, 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 의해 도시계획시설에 포함된다. 도심지에서 공동구는 각종 유틸리티 라인을 지하에 수용함으로써 쾌적한 도시환경 조성, 지하공간 활용, 재해 예방 등의 장점을 지니고 있다. 신규로 개발되는 도시에서는 단지 개발 시 공동구가 개착식 공법으로 적용되지만, 기존 도심의 경우 시공에 따른 교통체증, 환경적 문제 등으로 개착식 보다는 터널식 공동구가 선호되고 있다. 이 때 도시 지역의 주된 지반 특성 및 공동구의 심도 등에 따라 다양한 지반에 적용이 가능한 쉴드 TBM 공법이 주로 적용되고 있다(KAIA, 2014).

건설업은 상대적으로 타산업에 비해 인력에 의하여 직접적으로 수행되고 있으며, 작업의 난이성, 고소작업, 대형 건설 장비 등에 의한 각종 위험요소가 산재하고 있어 타산업 대비 사고 재해율이 높은 편이다. 실제 Fig. 1과 같이 고용노동부의 통계자료를 분석한 결과 건설업의 사고 사망만인율(노동자 만명당 사망자 비율)은 전산업에 비해 약 2~3배를 보이고 있다. 그리고 전산업의 사고 사망만인율은 지속적으로 감소하고 있는 반면, 건설업은 감소의 경향을 보이고 있지 않다. 국토교통부는 이와 같은 건설업의 사고 재해율 저감을 위해 다양한 정책을 시행하고 있으며, 2016년 「건설기술진흥법」 개정을 통해 계획 및 설계 단계에서부터 위험요소(Hazards) 도출과 위험성 평가(Risk assessment)를 실시하는 ‘설계의 안전성 검토’ 제도를 도입하였다(MOLIT, 2017).

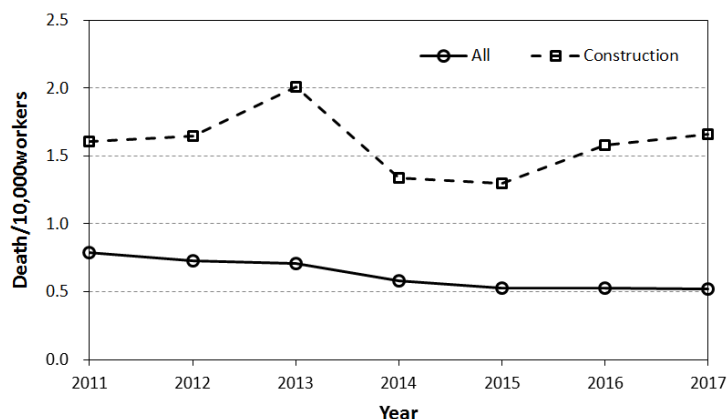


Fig. 1. Comparison of industrial disaster between all and construction (MOEL, 2012~2018)

터널식 공동구 공법으로 주로 적용이 되는 쉴드 TBM 공법에 대한 위험성 평가와 관련하여 다양한 연구가 진행되어 오고 있다. Hong et al. (2007)은 지질 이상, 고수압, 집중호우의 3가지 주요 초기사건에 대해 사건수 분석 기법으로 위험성을 평가하였다. Hyun (2013)은 TBM 터널에서 발생 가능한 리스크 요인들을 지질, 설계, 시공 관리로 분류하여 각각 12, 5, 17가지로 도출하였고, 이를 AHP와 결합수 분석 방법을 적용하여 리스크 영향도와 발생확률을 분석하였다. Chung et al. (2016)의 경우, TBM 시공 중 막장전방의 위험지반을 예측하고 이에 대한 리스크 사건의 위험도 평가 및 대책공법을 제시하는 리스크 관리 시스템을 개발하였다. 그리고 Seong and Youn (2017)은 TBM 터널 공사 안정성에 영향을 미치는 중점 관리요소로 12개의 위험요소를 도출하였다. 그러나 위 연구들은 해저 또는 하저 터널 및 쉴드 TBM의 공정에 대한 리스크를 대상으로 하고 있어, 설계의 안전성 검토 제도 목적인 사고에 따른 인명피해 절감보다는, 주로 그 목적이 사고 절감보다 공기 지연이나 원가 상승 방지와 같은 공사 관리 차원의 위험성 관리에 맞춰져 있는 실정이다. 또한, 적용된 위험성 평가 기법은 일반 실무자가 적용하기에 다소 전문적이기 때문에, 의무적으로 위험성 평가를 수행하여야 하는 현행 건설안전 제도와 관련하여 실무 적용성이 낮다는 문제가 있다. 이와 같이 현재 도심지 소단면 터널식 공동구의 안전 위험요소와 관련된 연구는 미흡한 실정으로, 특히 도심지에서 시공되는 소단면 공동구의 경우, 인근의 공사와 병행되는 경우가 많고 인접한 구조물에 영향을 미치며 최근 사회적 이슈가 되는 지반침하 및 도로함몰에도 취약성을 보인다. 이러한 이유로 국토교통부 공동구 기술기획 보고서(KAIA, 2014)에는 공동구 설계 및 시공 단계에서의 안전취약요소에 대한 기술 개발 필요성을 언급하고 있다.

따라서 본 연구에서는 쉴드 TBM 공법이 적용된 도심지 소단면 공동구 건설공사를 대상으로, 건설사고 및 사고에 따른 인명피해 절감을 목적으로 도입된 설계의 안전성 검토에 대한 실무 활용 및 가이드가 될 수 있도록 위험요소를 도출하고 주요 위험요소에 대한 위험성 평가를 실시하였다. 이를 위해 도심지 소단면 터널식 공동구의 세부 공사종류 별로 안전 위험요소를 도출하였고, 이 중 전문가 의사결정 방법을 통해 핵심 위험요소를 선정하였다. 선정된 핵심 위험요소는 설계의 안전성 검토 매뉴얼에 적용된 매트릭스 기법을 바탕으로 위험성 평가를 실시하였다.

## 2. 안전 위험요소 도출

도심지 소단면 터널식 공동구 건설공사의 안전 위험요소를 세부 공사 종류에 따라 분류하는 것은 각 공종마다 적절한 안전관리가 이루어지도록 유도할 수 있다. 세부 공사 분류를 위해 공동구 표준시방서(MLTM, 2010), Bae (2017)의 해저 쉴드 TBM 표준공정 연구, Ki (2006)의 한강하저 쉴드 TBM 시공사례 등을 조사하였고, 설계 및 시공 관계자의 면담을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서는 Table 1과 같이 수직구, 장비 조립·설치·해체, 본선 굴착, 세그먼트 라이닝 조립, 운반 및 공급, 후속 공사의 6가지 세부 공사 종류로 분류하였다.

**Table 1.** Hazards of small section utility tunnel based on detailed construction type

No.	Sub-construction type	Number of hazards	Safety hazards
1	Shaft	27	Influence of other construction works that cause excessive deformation and collapse during permanent or temporary construction, Difference between penetrated depth and soil investigated depth linked to collapse of earth retaining wall, Falling and dropping of wale during deconstruction of earth retaining wall, Failure of earth retaining wall such as anchors, struts, etc., Lack of stiffness for earth retaining wall, Excessive excavation that causes decreased stability of earth retaining walls, Lack of penetration depth that causes decreased stability of earth retaining walls, Slope activity that causes decreased stability of earth retaining walls, Inflow of running water and infiltration of ground water that cause decreased stability of earth retaining walls, Difference of soil profile between design conditions and construction condition that cause decreased stability of earth retaining walls, Instability of tunnel face at destination location of chamber, etc.
2	Assembly, install and dismantlement of equipment	9	Irrelevant underground docking of TBM that causes failure of tunnel, Overturning of TBM equipment during assembly and dismantlement, Overturning and falling of equipment due to lack of crane capacity during assembly and dismantlement of equipment, Collision of equipment attached to the safety bar when lift work by mobile crane, Non-compliance of inclined angle that causes overturning of mobile crane when lift work, Inadequate bearing capacity that causes overturning of mobile crane on soft ground, Impact load by rapid drop of heavy materials during work to of cargo crane, Inadequate installation of cargo crane outrigger
3	Main tunneling	23	Tunneling without pressurised face that causes tunnel face collapse, Insufficient face pressure in weak or permeable ground that causes Instability of tunnel face, Faults and open joints or unanticipated weak or permeable ground that cause instability of tunnel face, Mixed face conditions that cause instability of tunnel face, Increased wear on cutting tools due to mixed face conditions, Misalignment of TBM due to mixed interface, High pressure groundwater, Settlement due to volume loss of soil or rock, Ground vibration due to tunneling, Existing tunnels, deep foundations and constructing structures that cause collision or near collision with, Dangers associated with cutter-head intervention in compressed air, Instability of face during cutter-head intervention in free air or low face pressure, etc.
4	Assembly of segment lining	8	Instability of tunnel lining/ defects in tunnel lining rings that cause “Pop Out” of segments, Occurrence of segment flaw, Deterioration of segments lining, Ground and groundwater chemically aggressive towards concrete and or steel (high Sulphate, Chloride content, etc.), Carelessness during segment assembly, Stricture during tightening of bolt or pin for segment assembly, Falling of equipment during segment assembly, Rupture of high pressure hose during backfill grouting for segment
5	Transportation & Supply	6	Repeated power failure, Careless use of high voltage electricity, Fan/ventilation problem, Noise and contamination of slurry, Derailment of a locomotive, exceeded capacity of the Gantry crane
6	Follow-up	4	Insufficient ventilation during internal work, Fire during welding work and emission of harmful gas due to fire, Inadequate lighting conditions for internal work, Insufficient safety distance of track or conveyor

각 공사 종류에 대한 안전 위험요소 도출을 위해 위의 문헌 조사와 함께, 국토교통부 건설안전정보시스템 COSMIS (MOLIT)의 자료와 Seong and Youn (2017) 등의 연구를 참고하였으며, 마찬가지로 전력 공동구, 쉴드 TBM 터널의 설계 및 시공 관계자의 의견을 수렴하였다. 그 결과 본 연구에서는 총 77개의 위험요소를 도출하여 Table 1에 제시하였다. 수직구 공종의 경우, 27개의 위험요소가 도출되었는데 주로 흙막이 및 굴착과 관련된 내용이었고, 장비 조립·설치·해체의 경우는 9개로 TBM 장비 운반 및 조립, 공사 장비 및 버력 반출 등과 관계가 있었다. 본선굴착은 쉴드 TBM 굴착시의 지반 상태, 수압 조건 및 장비교체 등의 내용으로 23개의 위험요소가 도출되었으며, 세그먼트 라이닝 조립은 세그먼트 돌출, 결함 및 조립 작업 등과 관련하여 8개의 위험요소가 제시되었다. 운반 및 공급 공정에서는 6개, 후속공사에서는 4개의 위험요소가 도출되었다.

본 연구에서 제시된 위험요소는 특정 공사를 대상으로 하지 않고 일반적인 쉴드 TBM 적용의 소단면 터널식 공동구를 대상으로 하였다. 따라서 각 현장에서는 현장마다의 공법 및 특징에 맞게 위험요소를 추가로 도출하거나 수정하여 적용할 필요가 있다.

### 3. 핵심 위험요소 선정

2절에서 도출된 도심지 소단면 터널식 공동구의 모든 건설안전 위험요소는 마땅히 계획, 설계 및 시공 단계에서 적절히 관리되어야 한다. 그러나 위험요소에 대한 중요도를 파악하여 건설공사 참여자에게 제공함으로써 프로젝트 수행 시 사고 절감을 위해 우선적으로 관리해야 할 위험요소를 파악하고 대응할 수 있게 하고, 또한 설계 안전성 검토 업무의 위험요소 선정 및 위험성 평가를 수행함에 있어서 선정된 핵심 위험요소를 주요 참고 자료로 사용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 핵심 위험요소 선정을 위한 전문가 의사결정 방법으로 델파이(Delphi) 조사를 활용하였다.

#### 3.1 델파이 조사 개요

델파이 조사는 전문가 의사결정 방법 중 하나로, 선정된 주제에 대해 해당 분야 전문가들의 합의를 도출하는 기법이다. 도심지 소단면 터널식 공동구의 안전 위험요소 중 어느 위험요소를 보다 중점적으로 관리해야 하는지를 Fig. 2와 같이 반복적인 델파이 조사 절차를 통해 선정하였다. 델파이 기법은 토목분야에 다수의 활용 사례가 있다. 터널 및 지하공간 연구에 적용된 사례는 터널의 성능중심 평가기법에 대한 항목 도출에 적용되었고(An and Kim, 2016), 도심지 흙막이 굴착공사 사고 저감을 위해 관리되어야 할 우선 요소 결정에 활용되기도 하였다(Seong and Jung, 2017).

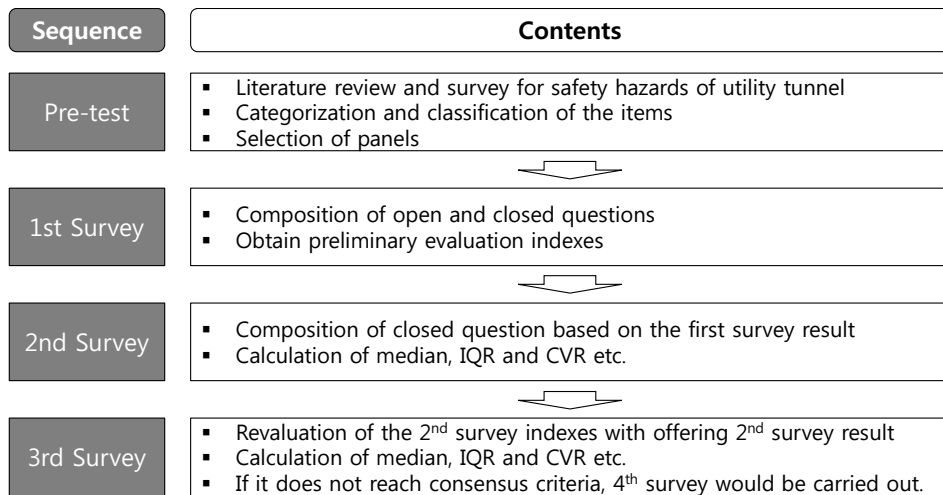


Fig. 2. Process of conventional Delphi survey

델파이 조사의 신뢰성을 높이기 위해서는 해당분야에 전문성이 있을 뿐 아니라 조사에 성실히 임하면서도 책임성 있는 전문가들로 선정해야 한다. 그리고 Anderson (1997)의 연구에 따르면, 10~15명의 패널로 유용한 결과를 얻을 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 실무경력 최소 10년 이상 20년 내외의 건설안전 제도 운영 실무자, 건설안전 분야 교수, 터널 및 건설안전 연구진, 쉴드 TBM 설계 및 시공 참여 경력자들로 14인의 전문가 패널을 구성하였다.

핵심 위험요소로 선정되었는지의 여부는 식 (1)에 제시된 Lawshe (1975)의 내용타당도(Contents Validity Ratio, CVR)와 14인에 해당하는 최소 CVR 기준 0.51를 만족하였는지 여부로 결정하였다. 본 연구에서는 5점 척도를 적용하였고, 이중 4점 및 5점이 선택된 경우 ‘중요하다’고 응답한 것으로 처리된다. 결국, 모든 전문가가 4점 또는 5점을 선택한 경우, CVR은 1이 산정된다.

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

여기서,  $n_e$ 는 위험요소에 대해 ‘중요하다’고 응답한 수이고,  $N$ 은 전문가 패널 수이다.

델파이 조사 과정에서 전문가 의견이 합의에 도달하였는지를 판단하는 기준은 식 (2)와 식 (3)의 수렴도와 합의도를 적용하였다. 수렴도는 동일한 척도에 대한 선택이 높아지면 0에 가까워지고, 합의도의 경우는 1에 가깝게 나타난다. Jeong et al. (2012)은 10인의 델파이 조사에서 수렴도 0.5 이하와 합의도 0.75 이상을 전문가 합의의 기준으로 결정하였는데, 보수적인 차원에서 본 연구에서도 동일한 기준을 적용하였다.

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

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

여기서,  $Q_3$ 는 3/4분위 수,  $Q_1$ 은 1/4분위 수,  $M_d$ 는 중앙값을 나타낸다.

1차 델파이 조사에서는 개방형 질문을 통해 전문가로부터 목록의 타당성과 설문 항목을 제시 받고, 2차 델파이 조사부터 1차 설문 결과를 바탕으로 폐쇄형 설문지를 작성하여 합의 기준에 이를 때까지 반복 수행을 시행한다. 본 연구의 경우, 2절의 연구 내용과 같이, 전문가 의견 수렴 및 각종 자료 조사를 통해 위험요소 항목을 결정을 진행하였기에 이러한 과정을 1차 델파이로 대신하였다. 폐쇄형 설문지는 5점 척도를 적용하였다.

### 3.2 조사 결과 및 핵심 위험요소 선정

Table 2는 핵심 위험요소 도출의 델파이 결과이다. 2차 델파이에서는 합의 기준을 만족하지 못하였고, 3차 델파이 조사에서 수렴도와 합의도가 기준을 만족시켜 이때의 내용타당도 CVR 기준을 만족시키는 위험요소를 핵심 위험요소로 결정하였다. 총 19개의 위험요소가 핵심 위험요소로 결정이 되었으며, 이중 수직구 공중에서는 총 27개의 위험요소 중 8개가 핵심 위험요소로 도출되었고, 장비 조립·설치·해체 공중은 9개 위험요소에서 핵심 위험요소로 2개가 선정되었다. 본선 굴착의 경우 총 23개 중 5개, 세그먼트 라이닝 조립은 총 8개 중 2개, 운반 및 공급과 후속 공정은 각각 6개 중 1개와 4개 중 1개가 핵심 위험요소로 선정되었다.

수직구 공중은 붕괴사고 및 인근 지반 침하가 자주 발생하는 흙막이 굴착 공중이 수반되기 때문에 핵심 위험요소가 다수 선택된 것으로 판단되며, 지하 깊은 곳에서 이루어지는 본선 굴착의 경우도 터널 굴착면의 불안정에 관련된 위험요소들이 주로 핵심 위험요소로 선정되었다. 장비 조립·설치·해체에서는 TBM 장비 조립·해체시의 전도와 크레인 전도를 유발하는 지반 지지력 부족이 핵심 위험요소로 도출되었다.

세그먼트 라이닝에서는 라이닝 조립이나 결함에 따른 내용이, 운반 및 공급에서는 고압의 전기를 사용하는 공사이기 때문에 전기 문제가, 그리고 후속 공정에서는 화재에 따른 유해가스가 핵심 위험요소로 선정되었다. 위험요소들은 사고를 유발하여 직·간접적으로 인명 피해를 발생하는데, 주로 사고발생 시 인명 피해를 직접적으로 일으키는 것으로 간주되는 위험요소들이 핵심 위험요소로 도출된 것으로 판단된다.

델파이 통계 결과를 살펴보면, 2차 조사에서 높은 CVR 값을 보일 경우 3차 조사에서 비교적 더 높은 CVR을 나타내었고, Table 2에는 일부만 제시되었지만 낮은 CVR 값일 경우 대체로 그 값이 더 낮아지는 경향을 보였다. 이는 합의 도출과정에서 한 방향으로 의견이 모아지는 결과 때문이었다. 특히 ‘고압의 전기 사용 부주의’의 경우 2차 조사에서 CVR 기준값 보다 약간 낮았으나, 합의 과정을 지나 3차 조사에서는 기준값을 상회하여 핵심 위험요소로 판정하였다. 수렴도와 합의도의 경우, 핵심 위험요소로 판정된 항목은 3차 델파이 조사에서 모두 기준값

을 만족하였다. 핵심 위험요소로 선정되지 못한 3개 항목이 합의도를 만족하지 못했지만, CVR 값이 매우 낮았고 추가적인 설문을 진행하는 것은 큰 의미가 없는 것으로 판단하여 3차에서 델파이 조사를 마무리하였다.

**Table 2.** Results of the Delphi surveys for safety hazards of the utility tunnel

Sub-construction type	Safety hazards	2nd survey	3rd survey			Key safety hazard
		CVR ( $\geq 0.51$ )	CVR ( $\geq 0.51$ )	Convergence ( $\leq 0.5$ )	Agreement ( $\geq 0.75$ )	
Shaft	Influence of other construction works that cause excessive deformation and collapse during permanent or temporary construction	0.714	0.857	0.50	0.78	○
	Difference between penetrated depth and soil investigated depth linked to collapse of earth retaining wall	0.714	0.857	0.50	0.75	○
	Falling and dropping of wale during deconstruction of earth retaining wall	0.571	0.857	0.38	0.81	○
	Failure of earth retaining wall such as anchors, struts, etc.	0.714	0.714	0.50	0.80	○
	Excessive excavation that causes decreased stability of earth retaining walls	0.571	0.857	0.38	0.81	○
	Inflow of running water and infiltration of ground water that cause decreased stability of earth retaining walls	0.857	0.857	0.50	0.80	○
	Difference of soil profile between design conditions and construction condition that cause decreased stability of earth retaining walls	0.857	1.000	0.50	0.80	○
	Instability of tunnel face at destination location of chamber	0.857	1.000	0.38	0.81	○
	Lack of stiffness for earth retaining wall	0.000	0.429	0.38	0.81	×
	(the remaining 18 safety hazards)	∴	∴	∴	∴	×
Assembly, install and dismantlement of equipment	Overturning of TBM equipment during assembly and dismantlement	0.571	0.571	0.00	1.00	○
	Inadequate bearing capacity that causes overturning of mobile crane on soft ground	0.857	1.000	0.50	0.75	○
	Impact load by rapid drop of heavy materials during work to of cargo crane	-0.857	-1.000	0.00	1.00	×
	(the remaining 6 safety hazards)	∴	∴	∴	∴	×



**Table 2.** Results of the Delphi surveys for safety hazards of the utility tunnel (continue)

Sub-construction type	Safety hazards	2nd survey	3rd survey			Key safety hazard
		CVR ( $\geq 0.51$ )	CVR ( $\geq 0.51$ )	Convergence ( $\leq 0.5$ )	Agreement ( $\geq 0.75$ )	
Main tunneling	Insufficient face pressure in weak or permeable ground that causes Instability of tunnel face	0.571	0.857	0.00	1.00	○
	Faults and open joints or unanticipated weak or permeable ground that cause instability of tunnel face	1.000	1.000	0.50	0.80	○
	Mixed face conditions that cause instability of tunnel face	0.857	1.000	0.50	0.75	○
	High pressure groundwater	0.714	0.857	0.50	0.80	○
	Dangers associated with cutter-head intervention in compressed air	0.571	0.857	0.00	1.00	○
	Misalignment of TBM due to mixed interface	-0.714	-1.000	0.00	1.00	×
	(the remaining 17 safety hazards)	∴	∴	∴	∴	×
Assembly of segment lining	Instability of tunnel lining/ defects in tunnel lining rings that cause “Pop Out” of segments	0.571	0.857	0.00	1.00	○
	Carelessness during segment assembly	0.571	0.857	0.00	1.00	○
	Ground and groundwater chemically aggressive towards concrete and or steel (high Sulphate, Chloride content, etc.)	-0.857	-1.000	0.00	1.00	×
	(the remaining 6 safety hazards)	∴	∴	∴	∴	×
Transportation & Supply	Careless use of high voltage electricity	0.429	0.714	0.00	1.00	○
	Noise and contamination of slurry	-0.571	-1.000	0.00	1.00	×
	(the remaining 4 safety hazards)	∴	∴	∴	∴	×
Follow-up	Fire during welding work and emission of harmful gas due to fire	0.714	1.000	0.50	0.80	○
	Inadequate lighting conditions for internal work	-0.714	-1.000	0.00	1.00	×
	(the remaining 2 safety hazards)	∴	∴	∴	∴	×
Total of key safety hazards: 19						

#### 4. 핵심 위험요소의 위험성 평가

안전 위험요소는 위험성 평가를 통해 위험성 수준을 판단하고, 허용가능 위험 수준을 넘어설 경우 저감대책 수립을 결정하여야 한다. 선정된 핵심 위험요소의 경우 위험 수준이 허용 불가 또는 조건부 허용에 해당될 가능성이

높으므로, 저감대책 마련의 필요성 판단 등 도심지 소단면 터널식 공동구 프로젝트의 안전 관리 계획 및 수행에 활용이 가능할 것이다.

위험성 평가에 적용된 소단면 터널식 공동구는 공동구 기술기획 보고서(KAIA, 2014)의 기술 개발 대상이 되는 규모로 가정하였다. 도심지에 쉴드 TBM 공법이 적용된 직경 3.5 m급 단면으로, 수직구 직경 6 m, 대상심도는 20 m 내외이며, 지반조건은 충적층, 토사층 및 암반층의 복합지반을 통과하는 조건이다. 위험요소 및 위험요소에 대한 위험 수준은 현장마다 상이할 수밖에 없기 때문에, 연구 결과의 범용성을 고려하여 특정 현장 보다는 포괄적인 조건을 대상으로 하였다.

#### 4.1 위험성 평가 기법 및 기준

터널식 공동구 안전 위험요소에 적합한 위험성 평가를 위해 건설공사 안전관리 업무수행 지침(MOLIT, 2016)과 설계의 안전성 검토 매뉴얼(MOLIT, 2017)에 적용된 위험성 평가 기법인 매트릭스 방법을 적용하였다. 위험성 평가에는 다양한 기법이 존재하지만(Lim, 2012), 실무 적용성과 관련 업무 수행자의 혼선을 피하기 위해 현재 제도에 반영된 매트릭스 기법이 적합하였다. 이 중, 매뉴얼에 수록된 Table 3의 4 × 4 매트릭스 및 위험성 허용기준과 이에 따른 Table 4의 발생빈도 및 심각성 기준을 적용하였다. 4등급 기준은 지침에 수록된 3등급에 비해 세분화되어 있으며 발생빈도와 심각성을 중간으로 애매하게 선택하지 않게 하여 각 항목의 중대성 여부를 결정하도록 유도하는 장점이 있다.

**Table 3.** Criteria of risk assessment for 4 × 4 matrix (MOLIT, 2017)

Severity \ Likelihood	1	2	3	4	
1	1	2	3	4	
2	2	4	6	8	Acceptable
3	3	6	9	12	Conditionally acceptable
4	4	8	12	16	Unacceptable

**Table 4.** Criteria of severity and likelihood for 4 × 4 matrix (MOLIT, 2017)

Likelihood		Criteria
4	Very likely	In cases of judgement by the expert that the same (or similar) accident occurred in the last 3 months or that it is very likely to occur
3	Likely	In cases of judgement by the expert that the same (or similar) accident occurred in the last 1 year or that it is likely to occur
2	Unlikely	In cases of judgement by the expert that the same (or similar) accident occurred in the last 3 years or that it is occasional likely to occur
1	Very unlikely	In cases of judgement by the expert that the same (or similar) accident occurred in the last 5 years or that it is very unlikely to occur

**Table 4.** Criteria of severity and likelihood for 4 × 4 matrix (MOLIT, 2017) (continue)

Severity		Criteria
4	Severe	Deaths, injuries which causes long-term disability/ or Failure of object (or adjacent structure) during construction
3	Serious	Injuries which accompany disasters causing shutdown/ or Severe damages of the object (or adjacent structure) which cause a construction period loss of more than one week
2	Considerable	Minor injuries which don't accompany disasters causing shutdown/ or Slight damages of the object (or adjacent structure) which cause a construction period loss within 3 days
1	Insignificant	None injury, or injury of level of emergency treatments/ or Slight damages of the object (or adjacent structure) which don't affect for construction period

## 4.2 발생빈도 및 심각성 결정

매트릭스 기법을 활용하여 위험성 평가를 수행하기 위해서는 개별 핵심 위험요소에 대한 발생빈도 및 심각성을 결정해야 한다. 가장 이상적인 결정 방법은 각 위험요소의 사고자료 DB로부터 얻어진 통계자료를 통해 위험요소와 관련한 사고가 얼마나 자주 발생하는지, 그리고 사고 발생 시 그 심각성은 어떤 수준인지를 분석하여 결정하는 것이다. 그러나 국내는 아직까지 각각의 안전 위험요소에 대한 사고 발생 통계자료가 구축되어 있지 않으며, 국토교통부의 건설안전정보시스템의 경우 도입 된지 얼마 되지 않아 아직까지는 중대재해에 대해 터널, 교량 등의 비교적 큰 공사 단위로 데이터가 축적되고 있는 상황이다.

따라서 본 연구의 발생빈도 및 심각성 평가는 자료가 불충분한 상태에서 전문가 그룹을 통해 비교적 정량적인 분석 결과를 제공하는 AHP (Analytic Hierarchy Process)를 적용하였다. AHP 기법은 각각의 평가 요소들에 대해 상대적인 중요도로 쌍대비교를 실시하고, 이를 분석하여 각 항목들의 상대적인 중요도를 얻음으로써 선호도를 결정할 수 있다.

AHP 기법에서는 개별 전문가 응답의 신뢰성을 판단하기 위해 일치성 지수를 확보하게 되는데, Min et al. (2013) 및 Kim and Oh (2012)의 연구 등과 같이 AHP 기법이 공학분야에서 활용되었을 때의 일반적인 기준인 일치성 비율  $CR < 0.1$ 을 따랐다. AHP 기법에 참여한 전문가는 연구의 맥락이 제대로 파악되어 보다 신뢰성 있는 연구 결과를 도출할 수 있도록 앞서 델파이 조사에 참여한 패널과 가능한 일치하도록 하여, 전체 14인 중 실무 활용성을 높이기 위한 건설안전 실무자 1인의 변경 외에 13인을 동일하게 구성하였다. 19가지 핵심 위험요소 각각에 대한 사고심각성과 발생빈도 마다 1, 2, 3, 4 각 등급의 중요도에 대해 AHP 설문을 진행하였다.

Table 5는 각 핵심 위험요소의 4등급 발생빈도 및 심각성에 대해 AHP 조사를 통해 얻은 1, 2, 3, 4 등급 사이의 중요도와 그 순위를 나타내었다. Table 5에 제시된 각각의 중요도 값은 14인 전문가 설문 결과의 평균값이며, 가장 순위가 높은 중요도를 보인 점수를 해당 핵심 위험요소 사고심각성 또는 발생빈도의 등급 점수로 선정할 수 있다. 전문가 개개인에 대한 일치성 비율  $CR$ 을 표에 표시하지는 않았으나, 모든 전문가의 모든 항목에서 0.1 미만의 기준을 만족하였다. 이는 하나의 위험요소에 대한 평가요소가 4가지이기 때문에, 일치성 비율의 기준을 모두 쉽게 만족할 수 있었던 것으로 판단된다.

**Table 5.** AHP results of severity and likelihood for each key hazard

Key safety hazards	Severity				Likelihood			
	1	2	3	4	1	2	3	4
	Importance (rank)				Importance (rank)			
Influence of other construction works that cause excessive deformation and collapse during permanent or temporary construction	0.097 (4)	0.178 (3)	0.345 (2)	0.373 (1)	0.086 (4)	0.144 (3)	0.369 (2)	0.401 (1)
Difference between penetrated depth and soil investigated depth linked to collapse of earth retaining wall	0.086 (4)	0.144 (3)	0.369 (2)	0.401 (1)	0.191 (3)	0.407 (1)	0.255 (2)	0.147 (4)
Falling and dropping of wale during deconstruction of earth retaining wall	0.109 (4)	0.251 (2)	0.399 (1)	0.241 (3)	0.153 (4)	0.246 (3)	0.319 (1)	0.282 (2)
Failure of earth retaining wall such as anchors, struts, etc.	0.084 (4)	0.142 (3)	0.344 (2)	0.430 (1)	0.155 (4)	0.3179 (2)	0.3181 (1)	0.209 (3)
Excessive excavation that causes decreased stability of earth retaining walls	0.109 (4)	0.205 (3)	0.397 (1)	0.290 (2)	0.101 (4)	0.215 (3)	0.376 (1)	0.308 (2)
Inflow of running water and infiltration of ground water that cause decreased stability of earth retaining walls	0.093 (4)	0.232 (3)	0.413 (1)	0.262 (2)	0.125 (4)	0.298 (2)	0.367 (1)	0.209 (3)
Difference of soil profile between design conditions and construction condition that cause decreased stability of earth retaining walls	0.107 (4)	0.198 (3)	0.463 (1)	0.233 (2)	0.117 (4)	0.235 (3)	0.405 (1)	0.243 (2)
Instability of tunnel face at destination location of chamber	0.127 (4)	0.278 (2)	0.330 (1)	0.265 (3)	0.147 (4)	0.343 (2)	0.352 (1)	0.159 (3)
Overturning of TBM equipment during assembly and dismantlement	0.132 (4)	0.242 (3)	0.343 (1)	0.268 (2)	0.222 (3)	0.447 (1)	0.226 (2)	0.105 (4)
Inadequate bearing capacity that causes overturning of mobile crane on soft ground	0.107 (4)	0.196 (3)	0.326 (2)	0.371 (1)	0.113 (4)	0.225 (3)	0.421 (1)	0.241 (1)
Insufficient face pressure in weak or permeable ground that causes Instability of tunnel face	0.123 (4)	0.254 (2)	0.403 (1)	0.220 (3)	0.157 (4)	0.320 (2)	0.356 (1)	0.167 (3)
Faults and open joints or unanticipated weak or permeable ground that cause instability of tunnel face	0.111 (4)	0.204 (3)	0.410 (1)	0.275 (2)	0.159 (4)	0.303 (2)	0.366 (1)	0.173 (3)
Mixed face conditions that cause instability of tunnel face	0.121 (4)	0.269 (2)	0.394 (1)	0.215 (3)	0.169 (4)	0.277 (2)	0.341 (1)	0.213 (3)
High pressure groundwater	0.144 (4)	0.234 (3)	0.291 (2)	0.331 (1)	0.179 (4)	0.336 (1)	0.281 (2)	0.205 (3)
Dangers associated with cutter-head intervention in compressed air	0.153 (4)	0.311 (2)	0.330 (1)	0.207 (3)	0.161 (4)	0.275 (2)	0.333 (1)	0.231 (3)
Instability of tunnel lining/ defects in tunnel lining rings that cause “Pop Out” of segments	0.170 (4)	0.313 (2)	0.329 (1)	0.189 (3)	0.167 (4)	0.321 (2)	0.323 (1)	0.198 (3)
Carelessness during segment assembly	0.198 (3)	0.397 (1)	0.267 (2)	0.139 (4)	0.140 (4)	0.274 (2)	0.355 (1)	0.231 (3)
Careless use of high voltage electricity	0.088 (4)	0.165 (3)	0.369 (2)	0.378 (1)	0.127 (4)	0.364 (2)	0.367 (1)	0.142 (3)
Fire during welding work and emission of harmful gas due to fire	0.079 (4)	0.130 (3)	0.332 (2)	0.459 (1)	0.158 (3)	0.358 (1)	0.309 (2)	0.158 (4)

### 4.3 위험성 평가 결과

AHP 설문을 통해 가장 높은 중요도를 나타내는 점수를 각 핵심 위험요소의 사고심각성과 발생빈도 등급점수로 결정하였고, 이를 Table 3의 4 × 4 매트릭스에 적용하여 위험성 정도를 Table 6에 나타내었다.

**Table 6.** Results of risk assessment for each key hazard

Sub-construction type	Key safety hazards	Grade		Point from 4 × 4 matrix	Result of risk assessment
		Severity	Likelihood		
Shaft	Excessive deformation and collapse during permanent or temporary construction due to influence of other construction works	4	2	8	Unacceptable
	collapse of earth retaining wall due to difference between penetrated depth and soil investigated depth	4	2	8	Unacceptable
	Falling and dropping of wale during deconstruction of earth retaining wall	3	3	9	Unacceptable
	Failure of earth retaining wall such as anchors, struts, etc.	4	3	12	Unacceptable
	Decreased stability of earth retaining walls due to excessive excavation	3	3	9	Unacceptable
	Decreased stability of earth retaining walls due to inflow of running water and infiltration of ground water	3	3	9	Unacceptable
	Decreased stability of earth retaining walls due to difference of soil profile between design conditions and construction condition	3	3	9	Unacceptable
	Instability of tunnel face at destination location of chamber	3	3	9	Unacceptable
Assembly, install and dismantlement of equipment	Overturning of TBM equipment during assembly and dismantlement	3	2	6	Conditionally acceptable
	Overturning of mobile crane on soft ground due to inadequate bearing capacity	4	3	12	Unacceptable
Main tunneling	Instability of tunnel face due to insufficient face pressure in weak or permeable ground	3	3	9	Unacceptable
	Instability of tunnel face due to faults and open joints or unanticipated weak or permeable ground	3	3	9	Unacceptable
	Instability of tunnel face due to mixed face conditions	3	3	9	Unacceptable
	High pressure groundwater	4	2	8	Unacceptable
	Dangers associated with cutter-head intervention in compressed air	3	3	9	Unacceptable
Assembly of segment lining	Segments “Pop Out” due to instability of tunnel lining and defects in tunnel lining rings	3	3	9	Unacceptable
	Carelessness during segment assembly	2	3	6	Conditionally acceptable
Transportation & Supply	Careless use of high voltage electricity	4	3	12	Unacceptable
Follow-up	Fire during welding work and emission of harmful gas due to fire	4	2	8	Unacceptable

위험성 평가에 따른 허용가능 위험성 수준을 살펴보면 19개의 핵심 위험요소 중 17개가 허용불가로 판단되었으며, ‘조립·해체 시 TBM 장비의 전도’와 ‘세그먼트 조립 시 부주의’의 위험요소 2가지는 조건부 허용으로 나타났다. 위험성 평가 대상의 위험요소가 이미 사고심각성과 발생빈도가 높을 것으로 예상되어 핵심 위험요소로 선정된 만큼 허용불가로 판단된 비율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 여기서 각 핵심 위험요소의 사고심각성과 발생빈도 결과를 비교해보면, 대체적으로 사고심각성이 발생빈도보다 약간 등급 점수가 약간 높게 산정되었다. 그 이유로는, 수직구의 경우 굴착심도가 깊고 쉴드 TBM 공사가 지하에서 이뤄지며 비교적 대규모의 장비가 동원되는 등 사고발생 시 그 피해가 심각하다는 부분이 전문가 설문을 통해 나타난 것으로 판단된다.

조건부 허용으로 나타난 2가지 위험요소의 델파이 조사 분석 결과를 살펴보면, 2차 및 3차 델파이에서 내용타당도 CVR 값이 다른 핵심 위험요소에 비해 비교적 낮게 산정되었으나, 허용불가로 판정된 핵심 위험요소의  $4 \times 4$  매트릭스 점수와 CVR 값 사이의 연관성은 두드러지게 나타나지는 않았다. 이는 핵심 위험요소가 선정될 때 사고심각성과 발생빈도가 모두 높아 핵심 위험요소로 결정되었다기 보다는 둘 중 하나라도 높다고 여겨지면 현장 안전관리를 위해 중요하게 관리되어야 할 필요성이 있다고 전문가들이 판단한 것으로 보인다.

허용불가로 판단된 위험요소의 경우 각 현장의 특징 및 현황에 맞도록 설계단계에서 이루어져야 할 대안들의 선정 및 평가를 통해 현장에 적합한 저감대책을 수립하여야 한다. 그리고 저감대책 수립을 통해 위험요소가 허용수준 이내로 판단되더라도 시공단계 등에서 잔존 위험요소를 관리할 수 있도록 안전관리계획서 등에 반영한다. 조건부 허용으로 나타난 위험요소의 경우 저감대책 수립의무는 없으나, 현장 여건 및 예산 등을 고려한 후 보다 위험성을 감소시킬 수 있도록 저감대책의 수립이 추천된다.

실제 터널식 공동구 건설 실무에서 설계의 안전성 검토 업무에 적용할 경우, 본 연구의 결과를 가이드로 하여 현장 여건에 맞도록 추가로 위험요소를 도출하고, 전체 위험요소에서 추가로 위험성 평가가 필요하다고 판단된 위험요소에 대해 위험성 평가를 실시해보는 것이 합리적일 것이다. 그리고 본 연구의 핵심 위험요소의 위험성 평가 결과도 현장 여건에 적합한지를 따져보고 보완해서 적용해야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 최근 도심지에서 활용성이 증대되고 있는 쉴드 TBM 공법 적용의 도심지 소단면 터널식 공동구에 대해, 건설공사 사고 저감을 위하여 안전 위험요소를 도출하고 중점적으로 관리되어야 할 핵심 위험요소를 선정하였으며, 핵심 위험요소에 대하여 사고심각성과 발생빈도에 대한 등급 점수를 결정함으로써 위험성 평가를 실시하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 쉴드 TBM 공법이 적용된 터널식 공동구 건설공사의 세부 공사 종류를 수직구, 본선 굴착 등 6가지 세부 공사 종류로 분류하고, 총 77개의 위험요소를 제시하였다.
2. 핵심 위험요소를 선정하기 위해 전체 위험요소에 대해 14인의 건설안전 분야 전문가 델파이 설문을 실시하여,

내용타당도 CVR 기준을 상회하는 핵심 위험요소 19가지를 선정하였으며, 수직구 공중에서 8개, 본선굴착에서 5개 등 각 공사 종류 별로 최소 1개씩의 핵심 위험요소가 선정되었다.

3. 핵심 위험요소에 대한 위험성 평가에  $4 \times 4$  매트릭스 기법을 적용하였으며, 사고심각성과 발생빈도의 등급 점수를 14인의 전문가 AHP 설문을 통하여 결정하였다. 19개의 핵심 위험요소 중 17개가 허용불가로 판단되었으며, 나머지 2개는 조건부 허용으로 나타났다.

핵심 위험요소로 선정된 위험요소는 상당수가 허용불가로 판단되었기에 설계과정에서 현장에 적합한 저감대책이 마련되거나 시공 시 중점적으로 관리되어야 할 것이다. 위험요소 도출 및 위험성 평가는 각 터널식 공동구 현장마다 공사 조건이 다르므로, 설계의 안전성 검토 업무 및 현장 안전관리에서 본 연구의 결과를 가이드로 삼아 현장 여건에 맞게 추가, 검토 및 수정·보완하여 사용되어야 할 것이고, 이를 통해 터널식 공동구 건설 시 건설안전 사고 절감에 기여할 수 있을 것이다.

향후, 실제 다양한 도심지 소단면 터널식 공동구 프로젝트에서 도출된 위험요소를 DB화 하여 더욱 다양한 위험요소가 발굴될 수 있도록 하여야 할 것이며, 각 위험요소에 대한 사고 및 아차사고 데이터를 국가적 시스템에 구축하여 심각성 및 발생빈도가 보다 정량적으로 산정될 수 있도록 함으로써, 건설 사고 예방 및 피해 절감에 큰 역할이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 ‘도심지 소단면( $\phi 3.5$  m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(과제번호 18SCIP-B105148-04)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

1. An, J.W., Kim, H.K. (2016), “Developments of performance-based assessment technique for existing tunnels”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 6, pp. 525-533.
2. Anderson, E.T. (1997), “Important distance education practice: A delphi study of administrators and coordinators of distance education programs in higher education”, Ph. D. Thesis, University of Idaho.
3. Bae, K.W. (2017), “A study on standard construction process management system for prediction of proper construction period of subsea tunnel”, Korea Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 18, No. 4, pp. 36-47.
4. Chung, H.Y., Park, J.J., Lee, K.H., Lee, I.M. (2016), “TBM risk management system considering predicted ground condition ahead of tunnel face: methodology development and application”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 1, pp. 1-12.

5. Hong, E.S., Kong, J.S., Shin, H.S., Lee, I.M. (2007), “A case study for probabilistic risk evaluation based on event tree analysis technique for the design of shield TBM”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 2C, pp. 139-147.
6. Hyun, K.C. (2013), A risk management system applicable to shield TBM tunnel, Ph D. Thesis, University of Korea.
7. Jeong, J.C., Lee, J.B., Lee, H.M., Gong, H.R. (2012), “The development and application of evaluation index measuring the activation degree of invention education in Korea”, *The Korean Association of Practical Arts Education*, Vol. 25, No. 2, pp. 129-150.
8. KAIA (Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement) (2014), Report on technology plan for utility tunnel.
9. Ki, I.D. (2006), “A case study of E.P.B shield TBM for a tunnel under the Han river in the Bundang railway”, *Construction Management News*, Korea Association of Construction Engineering and Management, pp. 13-23.
10. Kim, D.Y., Oh, H.U. (2012), “Establishment of traffic management strategies based on AHP”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 6D, pp. 533-538.
11. Lawshe, C.H. (1975), “A quantitative approach to content validity1”, *Personnel Psychology*, Vol. 28, No. 4, pp. 563-575.
12. Lim, H.K. (2012), *System Safety Engineering*, Hansol Academy.
13. Min, B.K., Kang, I.J., Park, D.H., Kim, B.W. (2013), “The selection of landslide risk area using AHP and geomorphic element”, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 6-1, pp. 431-437.
14. MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2010), Standard specification for utility pipe conduit.
15. MOEL (Ministry of Employment and Labor) (2012~2018), Status of Industrial disasters occurrence.
16. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016), Guidance for safety management of construction works.
17. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2017), Manual of Design for Safety.
18. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), “Construction safety management information system (COSMIS)”, <http://www.cosmis.or.kr/>.
19. 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 Space Association*, Vol. 19, No. 3, pp. 489-501.
20. Seong, J.H., Youn, J.U. (2017), “Identification and importance analysis of hazards affecting the stability of TBM tunnelling works”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 6, pp. 973-983.