

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.3.551>

JCCT 2022-5-69

한국의 대심도 터널 지반 위험인자로서 암석과 지질구조

Geologic Structure and Rocks as Geotechnical Risk Factors at Intermediate depth Tunneling in Korea

임명혁*

Ihm, Myeong Hyeok*

요약 대심도 지하 터널 공사에서 마주치는 지반공학적 위험인자는 다양하며, 심도와 한국의 지역적 지질특성에 따라 위험인자의 종류와 기준이 다르다. 도심 지하 복합 지반의 다양한 다공질의 특성을 보이는 지질의 특성 및 지질구조가 안전성에 미치는 영향을 이해하기 위해 국내외 사례를 바탕으로 한국의 대심도 암반의 위험 인자를 분석하였다. 연구 결과 대심도 터널지반의 안정성에 영향을 주는 7개의 카테고리들 즉, 지질구조, 암반특성, 수리지질, Overburden, 높은 응력, 지반특성 및 인공 구조물과 약 20 여개의 위험인자들이 도출 되었다. 위험인자들 중 가장 영향력이 큰 단층, 습곡, 암맥 및 암석 종류에 따른 위험기준 및 위험산정을 위한 구간 값을 제시한다. 다른 인자들의 기준과 구간 값은 연구 중에 있다.

주요어 : 대심도, 터널, 위험인자, 지질구조, 암석

Abstract Geotechnical risk factors encountered in intermediate-depth underground tunnel construction are diverse, and the types and standards of risk factors are different according to the depth and regional geological characteristics of Korea. In order to understand the effects of geological characteristics and geologic structure on safety, which show various porous characteristics of urban underground complex ground, the risk factors of intermediate-depth rock mass in Korea were analyzed based on domestic and foreign cases. As a result of the study, seven categories affecting the stability of the intermediate-depth tunneling, namely, geologic structure, rock characteristics, hydrogeology, overburden, high stress, ground characteristics and artificial structures, and about 22 risk factors were derived. We present the risk criteria and interval values for risk evaluation of faults, folds, dikes, and rocks that have the greatest influence among risk factors. Criteria and interval values for other risk factors are under study.

Key words : Intermediate-depth, Tunneling, Risk Factor, Geologic Structure, Rocks

1. 서론

그림 1과 같이 한국의 도심 지하 상부 지반에는 상하수도관, 전력구, 지하철 및 지하상가 등 여러 가지

시설물들이 있고, 그 하부에 존재하는 토사 지반은 불투수성의 점토층과 다공질의 사질층과 자갈층 등이 분포한다. 토사 층 아래에는 암반층이 존재하며 암반 내부에는 석회암질의 암석 또는 단층 파쇄대로 인해 다양한

*정회원, 대전대학교 건설안전공학과 교수 (제1저자)

접수일: 2022년 4월 7일, 수정완료일: 2022년 4월 22일

게재확정일: 2022년 4월 30일

Received: April 7, 2022 / Revised: April 22, 2022

Accepted: April 30, 2022

*Corresponding Author: mhilm61@hanmail.net

Dept. of Construction Safety Engineering, Daejeon Univ, Korea

크기의 공동이 존재하기도 한다. 이렇게 다양한 구조물, 토사층 및 암반층이 존재하는 도심 지하의 다공성 복합지반에 대한 충분한 조사와 위험성 검토를 실시하지 않으면 지하 공동 발생, 지반함몰, 싱크홀, 터널 붕괴, 인명 피해, 인근 시설물의 파괴 및 공사 지연 등의 결과를 초래할 수 있다[1].

한국에서 대심도의 법적 정의는 지하실, 기초설치 등에 활용되지 않는 한계심도인 약 40 m보다 더 깊은 깊이로 지칭하고 있으며[2], 해외에서는 통상적으로 지하 수 십m ~ 수 km의 다양한 깊이로 정의된다[3] [4] [5]. 본 연구에서는 한국의 지하 심도 40m ~ 100 m 지반을 연구대상으로 하였다.

본 연구의 목적은 한국의 대심도 지질특성을 반영한 대심도 터널 굴착 시 위험산정을 위해 22개의 위험인자 중 지질구조와 암석에 대한 위험 기준 및 구간을 제시하고자 한다.

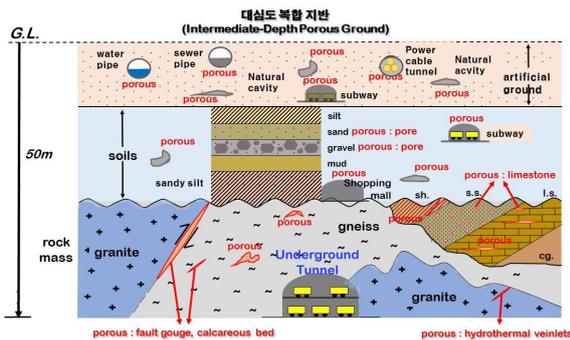


그림 1. 한국의 도심 복합지반의 단면 모식도(lhm, 2021)
Figure 1. Complex underground of urban area in Korea

II. 위험 인자

한국의 대심도 지반 굴착 위험도 산정을 위한 위험인자 도출을 위해 총 141개의 국내외 사례들을 수집하였으며, 이중 120개의 유효한 자료들을 data base화 하였다. 각각의 사례들로 부터 대심도 터널의 막장 불안정 또는 터널 붕괴에 영향을 주는 지반 위험 인자들을 파악하는 방법으로 위험 인자들을 추출하고 카테고리화 하였다[1]. 7개의 카테고리과 약 22개의 위험인자를 표1에 상세히 제시 하였다.

도출된 인자들은 사례에서 파악된 빈도수에 근거하여 우선순위를 두었으며, 본 연구에서 수행한 대심도 암반 굴착 위험도 산정을 위한 인자 분석은 한국의 대심도

복합지반의 특수성을 고려하였다. 향후 대심도 터널 공사에 있어서 지반의 안정성을 확보하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

한국의 지질은 포항 분지를 포함하는 동해안의 신생대 제3기층 일부를 제외한 대부분의 기반암이 풍화심도가 얇고 암의 강도가 강한 경암으로 구성되어 있다. 상부 퇴적물은 낙동강 하구의 양산단층대에서 60~100 m 깊이, 한강 하저와 한강변에서 30~40 m 내외의 깊이를 보이는 등 대규모 단층대와 큰 강 주변을 제외하고는 대체로 20 m 이내의 얇은 심도에 분포한다. 한국은 경상분지와 포항 분지를 제외하면 대부분 고생대와 그 이전의 암반으로 구성되어 있다.

한국의 지하 터널 굴착에서의 지반공학적 위험 산정 (Geotechnical Risk Assessment for Underground Tunneling in Korea - KGRAUT)은 한국의 심도 40 m 이상 100 m 이하의 깊이는 대부분 경암으로 이루어져 있을 것으로 추측됨으로써, 토질 특성이 배제된 7개의 카테고리인 지질구조, 암반 특성, 응력, 수리 지질, 인공 구조물, Overburden 및 지반 특성으로 산출된다.

표 1. 대심도 굴착 암반의 위험인자와 카테고리 (수정 lhm, 2021)
Table 1. Geotechnical categories and risk factors of intermediate-depth tunneling in Korea (modified by lhm, 2021)

categories	factors	frequency	remark
geologic structure	fault and fracture zone fold dyke	33/ 120	this study
rock mass characteristics	rock type uniaxial compression strength alternation of limestone RQD anisotropy	28/ 120	this study
high stress	differential stress rock burst, squeezing and swelling	10/ 120	
hydrogeology	coefficient of permeability water inrush fluctuation of groundwater table intensity of rain fall pore water pressure	18/ 120	
ground characteristics	karst and valley terrain Earthquake	7/ 120	
overburden	depth of tunnel over-excavation	12/ 120	
artificial structures	diameter of tunnel tunneling method tunneling orientation	12/ 120	

총 120개의 국내외 대심도 굴착 data base에서 도출한 7개의 카테고리 빈도(frequency) 중 지질구조는 33개 빈도, 암반특성은 28개 빈도, 응력은 10개 빈도, 수리지질은 18개 빈도, 인공구조물은 12개 빈도, Overburden은 12개 빈도, 지반특성은 7개의 빈도로 각각 나타났다. 카테고리 중 터널 불안정에 높은 영향을 주는 카테고리는 지질구조, 암반특성, 수리 지질, 응력, 인공구조물, Overburden, 지반특성의 순서로 나타났다(표. 1). 이 중 가장 높은 영향을 주는 것으로 나타난 두 가지의 상위 카테고리인 지질구조와 암반특성은 전체 사례의 약 47%를 차지하는 것으로 분석되었다.

III. 단층

1. 단층의 폭

7개의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 단층과 파쇄대의 첫 번째 기준은 단층 폭(fault width)이다[6]. 단층의 폭은 최소 1mm 이상이라도 터널이나 비탈면 등의 구조물에 영향을 미친다[7]. 한국의 지질특성 및 대심도 터널의 경우도 유사하게 적용할 수 있다. 단층의 폭 1mm 이하인 경우, 대심도 터널 위험성에 영향이 거의 없으며[6], 단층의 폭이 100mm 이상인 경우, 터널의 노선 변경이나 대규모 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 단층의 폭을 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표2와 같이 세분할 수 있다.

표 2. 단층의 폭에 따른 위험 기준 및 구간
 Table 2. Risk criteria and sections according to the width of the fault in KGRAUT

fault width(mm) (Fw)	score interval	representative score	rank
Fw < 1	81~100	90	very good
1 ≤ Fw < 10	61~80	70	good
10 ≤ Fw < 50	41~60	50	moderate
50 ≤ Fw < 100	21~40	30	poor
Fw ≥ 100	0~20	10	very poor

2. 활성단층과의 거리

7개의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 단층과 파쇄대의 두 번째 기준은 활성단층

(active fault)이다[7]. 활성단층의 존재는 자체가 터널이나 비탈면 및 건설구조물 등의 안전에 심각한 영향을 미친다[8]. 한국의 지질특성 및 대심도 터널의 경우도 활성단층과의 거리에 따라 안전성을 분류할 수 있다. 활성단층과의 거리가 40km 이상인 경우, 대심도 터널 위험성에 영향이 거의 없으며[8], 활성단층과의 거리가 2km 이내인 경우, 터널의 노선 변경이나 대규모 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 활성단층과의 거리를 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표3과 같이 세분할 수 있다.

표 3. 활성단층과의 거리에 따른 위험 기준 및 구간
 Table 3. Risk criteria and sections according to the distance from the active fault in KGRAUT

distance from active fault(km) (AFd)	score interval	representative score	rank
AFd > 40	81~100	90	very good
8 < AFd ≤ 40	61~80	70	good
4 < AFd ≤ 8	41~60	50	moderate
2 < AFd ≤ 4	21~40	30	poor
AFd ≤ 2	0~20	10	very poor

3. 터널 직경 및 단층과의 거리

7개의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 단층과 파쇄대의 세 번째 기준은 터널 직경 및 단층과의 거리이다[6] [7]. 대심도 터널 굴착 직경(D)에 대비하여 터널과 단층의 이격 거리에 따라 터널 굴착지반의 위험성이 좌우된다. 한국의 지질특성 및 대심도 터널의 경우도 단층과의 거리에 따라 안전성을 분류할 수 있다. 단층과의 거리가 터널직경(D) 대비

표 4. 터널 직경 및 단층과의 거리에 따른 위험 기준 및 구간
 Table 4. Risk criteria and sections according to the distance from the fault in KGRAUT

distance from fault (Fd)	score interval	representative score	rank
Fd > 4D	81~100	90	very good
3D < Fd ≤ 4D	61~80	70	good
2D < Fd ≤ 3D	41~60	50	moderate
D < Fd ≤ 2D	21~40	30	poor
Fd ≤ D	0~20	10	very poor

4D 이상 이격된 경우, 대심도 터널 지반 위험성에 영향이 거의 없으며[9], 단층과의 이격거리가 1D 이내인 경우, 터널의 노선 변경이나 대규모 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 단층과의 이격거리를 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표4와 같이 세분할 수 있다.

IV. 습곡

1. 습곡축과 터널축

대심도 터널 굴착 지반의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 습곡의 첫 번째 기준은 습곡 축과 터널 축의 교차각($X\alpha$)이다. 습곡의 축과 굴진 터널의 축간 교차각은 터널 지반이나 구조물에 영향을 미친다[10]. 한국의 지질특성 및 대심도 터널의 경우도 유사하게 적용할 수 있다. 습곡의 축과 굴착 터널의 축이 서로 45° 이상 교차할 경우, 대심도 터널 위험성에 영향은 거의 없으며, 습곡의 축과 굴착 터널의 축이 서로 20° 이내로 교차할 경우, 터널의 노선 변경이나 대규모 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 습곡의 축과 굴진 터널의 축간의 교차각을 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표5와 같이 세분할 수 있다.

표 5. 습곡의 축과 굴진 터널의 축 간 교차각에 따른 위험 기준 및 구간

Table 5. Risk criteria and sections according to the intersection angle between fold axis and the tunnel axis in KGRAUT

intersection angle between fold axis and the tunnel axis($^\circ$) ($X\alpha$)	score interval	representative score	rank
$45 < X\alpha \leq 90$	71~100	85	good
$20 < X\alpha \leq 45$	31~70	50	moderate
$0 \leq X\alpha \leq 20$	0~30	15	poor

2. 습곡축면의 수선과 터널축

대심도 터널 굴착 지반의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 습곡의 두 번째 기준은 습곡축면의 수선과 터널 축의 교차각($X\beta$)이다. 습곡축면의 수선과 굴진 터널의 축간 교차각은 굴착 터널 천정이나 측벽의 안정성에 영향을 미친다[11]. 한국의

지질특성 및 대심도 터널의 경우도 유사하게 적용할 수 있다. 습곡축면의 수선과 굴착 터널의 축이 서로 20° 이하 교차할 경우, 대심도 터널 위험성에 영향은 거의 없으며, 습곡축면의 수선과 굴착 터널의 축이 서로 70° 이상 교차할 경우, 터널의 천정 및 측벽의 대규모 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 습곡축면의 수선과 굴진 터널의 축간의 교차각을 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표6과 같이 세분할 수 있다.

표 6. 습곡축면의 수선과 굴진 터널의 축 간 교차각에 따른 위험 기준 및 구간

Table 6. Risk criteria and sections according to the intersection angle between perpendicular line of the fold axial plane and the tunnel axis in KGRAUT

intersection angle between fold axis and the tunnel axis($^\circ$) ($X\beta$)	score interval	representative score	rank
$0 \leq X\beta \leq 20$	71~100	85	good
$20 < X\beta \leq 70$	31~70	50	moderate
$7 \leq X\beta \leq 90$	0~30	15	poor

3. 습곡의 파장

대심도 터널 굴착 지반의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 습곡의 세 번째 기준은 습곡의 파장(λ)과 터널 직경(D)과의 비율이다($\lambda/2$). 습곡 파장의 $1/2$ 과 굴진 터널의 직경이 같거나 유사할 경우, 굴착 터널 천정이나 측벽 및 막장의 안정성에 심각한 영향을 미친다[11]. 즉, 습곡 파장의 $1/2$ 규모가 대심도 터널의 직경과 비교해서 매우 크거나 매우 작을 때 굴진 터널 지반은 안정적이다. 습곡 파장의 $\lambda/2$ 규모가 굴착 터널의 직경보다 크거나 터널 직경의 반보다

표 7. 습곡 파장과 굴진 터널의 직경에 따른 위험 기준 및 구간
Table 7. Risk criteria and sections according to the fold wave length and the tunnel diameter in KGRAUT

fold wave length and tunnel diameter ($\lambda/2$)	score interval	representative score	rank
$D/2 > \lambda/2 > D$	71~100	85	good
$D < \lambda/2 \leq 2D$ $D/2 \leq \lambda/2 < D$	31~70	50	moderate
$\lambda/2 = D$	0~30	15	poor

작을 경우, 대심도 터널 위험성에 영향은 거의 없다. 습곡 파장의 $\lambda/2$ 규모가 굴착 터널의 직경과 유사할 경우, 터널의 천정, 측벽 및 막장의 대규모 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 습곡 파장과 굴진 터널의 직경 규모를 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표7과 같이 세분할 수 있다.

4. 습곡의 양익각

대심도 터널 굴착 지반의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 습곡의 네 번째 기준은 습곡의 양익각이다(FXi_w). 습곡의 양 날개 면에 접선을 연장하여 서로 만나는 교차각을 습곡의 양익각이라 하며, 양익각이 70° ~ 120° 사이일 때 굴착 터널 천정이나 측벽 및 막장의 안정성에 심각한 영향을 미친다 [11]. 습곡의 양익각이 매우 작거나 매우 클 경우, 터널 지반은 안정적이다. 즉, 양익각이 70° ~ 120° 사이일 경우, 터널의 천정, 측벽 및 막장의 대규모 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 습곡의 양익각을 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표8과 같이 세분할 수 있다.

표 8. 습곡의 양익각에 따른 위험 기준 및 구간
 Table 8. Risk criteria and sections according to the fold interlimb angle in KGRAUT

fold interlimb angle(°) (FXi _w)	score interval	representative score	rank
30 > FXi _w > 150	71~100	85	good
120 < FXi _w ≤ 150 30 ≤ FXi _w < 70	31~70	50	poor
70 ≤ FXi _w ≤ 120	0~30	15	very poor

V. 암맥

1. 암맥의 폭

7개의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 암맥의 첫 번째 기준은 암맥 폭(dyke width)이다[12]. 암맥의 폭은 최소 0.1m 이상이라도 터널이나 비탈면 등의 구조물에 영향을 미친다. 암맥의 폭 0.1m 이하인 경우, 대심도 터널 위험성에 영향이 거의 없으며[12], 암맥의 폭이 0.1m~D(터널 직경)인 경우,

위험성이 높아 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 암맥의 폭을 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표9와 같이 세분할 수 있다.

표 9. 암맥의 폭에 따른 위험 기준 및 구간
 Table 9. Risk criteria and sections according to the dyke width and the tunnel diameter in KGRAUT

dyke width(m) and tunnel diameter (Dw)	score interval	representative score	rank
0.1 > Dw > D	71~100	85	good
0.1 ≤ Dw < 1	31~70	50	moderate
1 ≤ Dw ≤ D	0~30	15	poor

2. 암맥의 경계면 수선과 터널축

대심도 터널 굴착 지반의 위험 카테고리 중 지질구조 카테고리에 속하는 위험인자인 암맥의 두 번째 기준은 암맥 경계면의 수선과 터널 축의 교차각(X_Y)이다. 암맥 경계면의 수선과 굴진 터널의 축간 교차각은 굴착 터널 천정이나 측벽의 안정성에 영향을 미친다[13]. 한국의 지질특성 및 대심도 터널의 경우도 유사하게 적용할 수 있다. 암맥 경계면의 수선과 굴착 터널의 축이 서로 20° 이하이거나 70° 이상으로 교차할 경우, 대심도 터널 위험성에 영향은 거의 없으며, X_Y가 40° ~ 50° 일 경우, 터널의 천정, 측벽 및 막장의 위험성이 크므로 보강 작업이 즉시 필요하다. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 X_Y를 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표10과 같이 세분할 수 있다.

표 10. 암맥 경계면의 수선과 굴진 터널의 축 간 교차각에 따른 위험 기준 및 구간

Table 10. Risk criteria and sections according to the intersection angle between perpendicular line of the dyke boundary and the tunnel axis in KGRAUT

intersection angle between perpendicular line of dyke boundary and the tunnel axis(°) (X _Y)	score interval	representative score	rank
0 ≤ X _Y < 20 70 ≤ X _Y ≤ 90	71~100	85	good
20 ≤ X _Y ≤ 40 50 < X _Y < 70	31~70	50	moderate
40 ≤ X _Y ≤ 50	0~30	15	poor

VI. 암석의 종류

7개의 위험 카테고리 중 암반특성 카테고리에 속하는 위험인자인 암석의 종류(rock type)는 결정질 암석(crystalline rocks)을 제외한 모든 암석의 종류가 대심도 굴착 암반에서 위험 요소로 작용한다[11]. 특히, 포항지역에 주로 분포하는 미고결 암석, 석회질 암석 및 제주도와 울릉도 및 도서 해안 지역에 주로 분포하는 다공질 암석은 대심도 터널 굴착 암반과 구조물의 위험성이 매우 크다[14]. 따라서 한국의 대심도 터널 지반에 영향을 미치는 암석의 종류를 위험도에 기준하여 구간을 구분하면 표11과 같이 세분할 수 있다.

표 11. 암석의 종류에 따른 위험 기준 및 구간
Table 11. Risk criteria and sections according to the rock type in KGRAUT

rock type	score interval	representative score	rank
crystalline rock(Rcry)	81~100	90	very good
single rock except Rcry	61~80	70	good
two or more types of rock	41~60	50	moderate
sedimentary rocks except conglomerate and sandstone	21~40	30	poor
unconsolidated rocks, limestone, dolostone, marl, and porous rocks	0~20	10	very poor

VII. 결론

한국의 대심도 지하인 심도 40m ~ 100 m 지반에 터널 굴착 시 발생할 수 있는 위험인자와 카테고리는 22개와 7개로 분류할 수 있다. 카테고리 중 터널 굴착 시 위험성에 높은 영향을 주는 카테고리는 지질구조, 암반특성, 수리 지질, 응력, 인공구조물, Overburden, 지반특성의 순서로 나타났다. 이 중 가장 높은 영향을 주는 것으로 나타난 두 가지의 상위 카테고리인 지질구조와 암반특성은 전체 사례의 약 47%를 차지하는 것으로 분석되었다.

지질구조 카테고리는 단층, 습곡 및 암맥 등의 3개 위험인자로 구성되며, 각 인자별 한국의 대심도 터널 굴착 위험 기준은 단층의 경우, 단층의 폭, 활성단층과의

거리, 터널 직경 대비 단층과의 거리 등이다. 습곡의 경우, 습곡축과 터널축과의 교차각, 습곡측면의 수선과 터널축과의 교차각, 습곡의 파장, 습곡의 양익각 등이다. 암맥의 경우, 터널 직경 대비 암맥 폭, 암맥 경계면의 수선과 터널축과의 교차각 등이다.

암반특성 카테고리는 암석의 종류를 비롯한 불연속면의 공학적 제 특성이 위험인자로 분류되나, 본 연구에서는 암석의 종류에 따른 위험 기준 및 구간을 분석하여 제시하였다.

References

- [1] Ihm, Myeong-Hyeok, Hana Lee, 2021, Analysis of Geological Factors for Risk Assessment in Deep Rock Excavation in South Korea, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.31, No.4, pp. 211-220., (in Korean with English Abstract).
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transportation in Korea, 2019. 대심도 교통시설사업의 원활한 추진을 위한 제도개선 착수, (in Korean with English Abstract).
- [3] Yassaghi, A. and Salari-Rad, H., 2005. Squeezing rock conditions at an igneous contact zone in the Taloun tunnels, Tehran-Shomal freeway, Iran: a case study, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 42, pp. 95-108.
- [4] Zhao, J., Gong, Q.M., Eisensten, Z., 2007. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore, Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 22, pp. 388-400.
- [5] Zhang, C., Feng, X. T., Zhou, H., Qiu, S., and Wu, W., 2012. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels, Rock Mechanics & Rock Engineering, Published Online.
- [6] M. Gharizade V., A. Golshani and R. Nemati, 2015, Behavior of circular tunnels crossing active faults, Acta Geodyn. Geomater., 12, 4, 363-376.
- [7] Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K., Jeon, J.S., Chi, H.C. and Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, south Korea, Journal of Geography, 103, 111-126(in Japanese).
- [8] Ihm, Myeong-Hyeok, 2020, Research Planning for Utilization and Investigation of Earthquake

- Faults at Underground Engineering in South Korea, Korean Society of Civil Engineers, 2020 Fall Conference, Jeju.
- [9] 김종우, 2019, 축소모형실험을 통한 지하철 병설터널의 안정성평가 사례연구, Tunnel and Underground Space, 425-438.
- [10] Paltrinieri, E. and Zhao, J., 2015, TBM Tunnelling in Faulted and Folded Rocks, 105p.
- [11] Twiss and Moores, 1992, Structural Geology, Freedman & Company, 532p.
- [12] Ted Nye, David Mares, 2015, Monitoring of a shallow cover tunnel driven under live railway tracks, Conference: Ninth International Symposium on Field Measurement in Geomechanics, Sydney, Australia.
- [13] Sean Morris, 2021, Why Beaufort's Dyke is not a good location for a transport bridge or tunnel between Northern Ireland and Scotland, NFLA Radioactive Waste Policy Briefing 84.
- [14] L.R. e Sousa, T. Miranda, R.L. Sousa, J. Tinoco, 2018, Deep underground engineering and the use of artificial intelligence techniques, Int. J. Earth Environ. Sci., 3, 158.

※ 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 (도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구, 과제번호: 20UUTI-B15 7786-01) 지원으로 수행되었으므로 이에 깊은 감사를 드립니다.