

제1강 도심지터널 지하안전 영향평가와 안전관리

Underground Safety Management in Urban Tunnelling

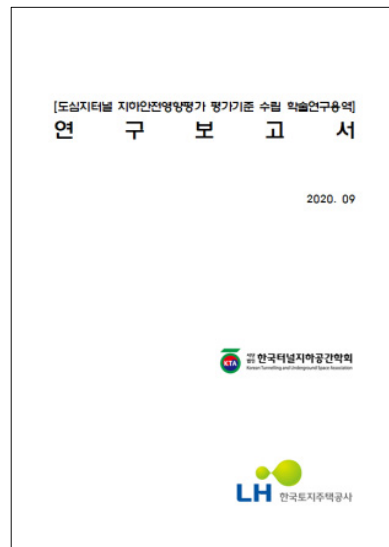


김영근
(주)건화 부사장/연구소장
공학박사/기술사

최근 도심지 터널공사의 체계적인 안전관리에 대한 관심과 노력은 꾸준히 증가하고 있으며, 지하터널공사에서의 안전문제는 중요한 이슈가 되어 왔다. 특히 도심지 터널공사에서의 지반함몰(싱크홀)사고와 붕락사고는 안전문제에 대한 철저한 관리를 필요로 하는



지하안전영향평가서 표준매뉴얼
(국토교통부, 2020)



도심지 터널 지하안전영향평가
(LH/한국터널지하공간학회, 2020)

중요한 계기가 되었다. 이러한 배경을 바탕으로 국토교통부에서는 2020년 지하공사에 대한 안전관리를 체계적으로 수행하도록 지하 안전평가서 표준매뉴얼을 제작하여 배포하였으며, LH는 한국터널지하공간학회와 공동으로 도심지터널 지하안전영향평가 평가기준을 작성하여 도심지 터널공사에서의 지하안전영향평가를 보다 효율적으로 수행하고자 하였다.

본 고에서는 지하안전영향평가 방법 중 특히 터널공사에 대한 지하안전영향평가 방법을 도심지터널 지하안전평가기준을 중심으로 소개하였으며, 지하터널공사에서의 안전관리체계를 해외의 리스크 안전관리 시스템과 비교분석하였다. 또한 도심지 터널공사의 안전 관리방안에 대하여 기술하고자 하였다.

1. 도심지 터널공사의 지하안전관리

2016년 1월 지반침하로 인한 피해를 방지하고 공공의 안전을 확보하기 위해 지하를 안전하게 개발, 이용하기 위한 안전관리체계를 확립하는 것을 목적으로 「지하안전관리에 관한 특별법」이 제정되었으며, 이 법에 근거하여 지하개발사업자는 지하안전영향평가를 실시하여야 하며 이는 2018년 1월 1일부터 시행되었다. 이후 각종 지하굴착공사 및 도심지 터널공사에서 지하안전영향평가가 수행되고 있다.

최근 그림 1에서 보는 바와 같이 도심지에서의 지하도로 및 도시철도사업이 적극적으로 활성화되면서 도심지터널공사에 대한 지하 안전영향평가가 매우 중요해 졌으며, 도심지 터널특성을 반영한 보다 효율적인 지하안전영향평가기준이 요구되었다. 이에 국토교통부를 중심으로 터널공사에 대한 지하안전영향평가 방안이 구체적으로 마련되었으며, 도심지 터널공사에 대한 안전관리를 보다 적극적으로 강화하였다.



(a) 도심지 지하도로 터널



(b) 수도권 광역급행철도사업

〈그림 1〉 도심지 터널 프로젝트

그러나 이와 같은 강화된 안전관리방침에도 불구하고 최근 도심지 터널공사에서 터널공사 중에 지반침하, 지반함몰 및 지반붕괴 사고가 발생함에 따라 보다 근본적인 대책마련이 시급히 요구되고 있다. 그림 2는 도심지 터널공사 중에 발생한 지반함몰사고의 예로서 현재 사고 원인에 대한 공학적인 분석과 대책 마련 중에 있다. 도심지 터널공사는 지반리스크 뿐만 아니라 주변 안전 및 환경리스크를 많이 포함하고 있는 가장 위험한 공종으로서 이에 대한 보다 적극적인 안전관리대책이 요구된다.



〈그림 2〉 도심지 터널에서의 지반침하(싱크홀)사고

국토교통부는 지반침하 사고를 사전에 예방하고 지하 공간의 안전한 개발과 이용을 지원하기 위한 지하안전정보시스템(www.jis.go.kr) 구축을 완료하고 운영 중에 있다(그림 3). 국토교통부는 지반침하가 사회문제로 대두됨에 따라 지난 2014년 지하공간 통합안전관리체계 구축 등의 내용을 담은 범정부 차원의 지반침하 예방 대책을 발표하고, 지하안전관리에 관한 특별법을 제정해 2018년부터 시행 중에 있다.



〈그림 3〉 지하안전정보시스템(국토교통부 <https://www.jis.go.kr>)

지하안전정보시스템에는 국토교통부 소속 지방국토관리청 및 지자체 담당자가 지하안전영향평가·소규모 지하안전영향평가·사후 지하안전영향조사·지하안전점검·지하안전계획수립 관리 등에 대한 검토·승인·관리를 지원하는 업무기능이 있다. 또한, 민간의 지하개발사업자(시행사), 지하안전영향평가·소규모 지하안전영향평가 전문기관 등의 사용자와 지자체 등이 이용하는 민원 기능으로 구성되었다.

지하안전정보시스템 위탁 기관으로 지정된 국토안전관리원(한국시설안전공단)은 지하안전영향평가 등의 기술적인 업무지원 및 운영관리뿐만 아니라 이용자 상담 및 민원처리를 위한 콜센터도 운영 중에 있으며, 지하안전정보시스템의 운영을 통하여 지하개발사업자, 지하안전영향평가 전문기관 등 사용자는 처리상황을 실시간으로 확인할 수 있으며, 일반국민은 시스템을 통해 주변지역의 지하개발사업을 확인하고 지반침하로 인한 피해에 적극 대응할 수 있다.

따라서 도심지 터널공사에 대한 지하안전영향평가 및 안전관리에 대한 제반 정보는 지하안전정보시스템을 참고하며 대부분의 정보를 얻을 수 있을 것이다. 또한 현재 수행되고 있는 도심지 터널공사에 대한 지하안전영향평가 및 사후지하안전영향조사에 자료와 경험이 축적됨에 따라 도심지 터널공사에 대한 안전관리는 보다 개선될 것으로 판단된다.

현재 도심지 터널은 지하 40m 이하의 대심도 지하에 계획되고 있으며, 복합적인 기능을 포함하기 위하여 대단면화되는 특성을 가지므로, 이러한 도심지 터널특성을 반영한 지하안전영향평가방법과 지하안전관리방안이 구체적으로 마련될 것이며, 특히 터널공사 중에 발생하는 각종 리스크(지질 리스크, 시공 리스크, 안전 리스크, 환경 리스크 등)를 얼마나 적극적으로 능동적으로 대응할 것인가가 관건이라 할 수 있다.

2. 터널 지하안전영향 평가

지하안전영향평가(터널)매뉴얼(국토교통부, 2020)은 터널 지하안전영향평가 방안에 대한 표준안으로 제시하고 있다. 이 표준안 중 터널 특성을 반영하는 주요 항목의 세부 내용은 다음과 같다.

2.1 대상지역의 설정

(가) 굴착검토범위 선정

▣ 검토개요

- 사업구간 굴착시 영향을 미치는 검토범위 산정방법 검토
 - 이론식 및 경험식에 의한 방법에 대한 적용성 검토
 - 최소굴착검토범위 검토
 - 지반침하취약구간 굴착검토범위 검토

▣ 검토결과

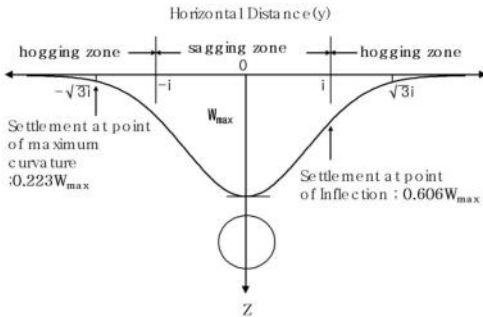
(1) 이론식 및 경험식에 의한 방법에 대한 적용성 검토

① 횡단면 지표침하

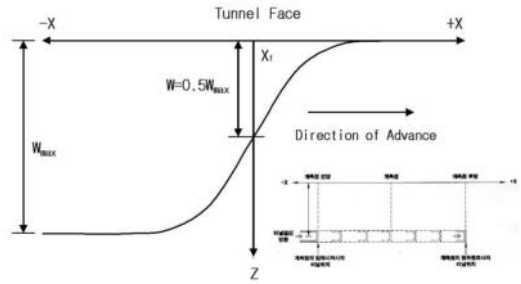
- Peck(1969) : 모래지반 및 점토지반 등 다양한 지반에서 시공된 터널 계층자료의 분석결과를 토대로 지표침하형상 곡선식을 제안
- 그 후 Attewell과 Farmer(1974), O'Reilly와 New(1982) 등 많은 연구자들이 현장 계측결과와 비교하여 식의 타당성을 확인

② 종단면 지표침하

- 도심지에서 터널 굴착에 의한 인접 건물의 침하손상은 터널막장이 건물 하부를 완전히 통과한 후 침하가 100% 수렴된 상태의 최종 침하형상곡선 보다는 터널 막장이 진행됨에 따라 변화하는 종단면 지표침하 상태가 더 위험하다.
- 국내의 경우 배구진(1989)과 김창용 등(1998)은 현장측정결과를 토대로 터널막장에서의 침하비가 최종 침하량의 약 20~30% 정도로 발생한다고 연구하였다.



횡단면 지표침하곡선



종단면 지표침하곡선

③ 변곡점(i) 및 지반손실률(V)

- 터널굴착에 의한 횡·종단면상의 지표침하 예측식을 적용하기 위해서는 먼저 변곡점과 지반손실률에 대한 값을 합리적으로 결정하여야 한다.
- 일반적으로 변곡점의 위치는 지반조건, 터널심도 및 직경 등에 큰 영향을 받으며, 터널 시공방법에 따라서는 큰 차이를 보이지 않는다.

④ 이론식 및 경험식에 의한 방법을 통한 굴착검토범위 검토결과

- Attewell(1986)의 제안에 따르면 굴착영향거리는 $45^\circ + (\Phi/2)$ 로 산정하며, 도심지 터널(대심도) 사업의 경우 실제보다 과다산정되므로 적용시 주의하여야 한다.
- Peck(1969) 등 각 연구자별 굴착검토범위 검토결과
 - Peck(1969) 등 국내외 연구자들은 토사, 점토 등의 얇은 터널 굴착 조건에서 지표침하 발생경향을 연구하였으며, 각 연구자가 제안한 논문을 분석하여 아래와 같이 굴착검토범위를 산정하였다.
 - 굴착영향범위는 횡단면 지표 침하곡선에서 변곡점(i)까지 거리의 2.5배로(2.5i) 산정하였다.
 - 검토범위 산정시 터널직경(D)은 10m, 토피(z)는 20m로 가정하였다.

제안자	제안식	굴착검토범위(터널 중심에서부터 거리)
Peck(1969)	$i = 0.2(D + z) = 6m(=0.6D)$	약 1.5D
O'Reilly와 New(1982)	$i = 0.28z - 0.1(\text{sand}) = 5.5m(=0.6D)$	약 1.5D
Clough와 Schmidt(1981)	$\frac{i}{R} = \left(\frac{z}{D}\right)^n = 8.7m(=0.9D)$ $n = 0.8$	약 2.25D

⑤ 경험식 및 이론적 방법에 대한 적용성 검토 결과

- 국내외 터널 굴착에 의한 지표침하 발생경향에 대한 연구는 터널 굴착 지반조건이 토사, 점토 등 국내에서 일반적으로 굴착되는 암반터널 조건이 아니므로 경험식 및 이론적 방법을 통해 터널 굴착검토범위 산정은 토사터널 등과 같이 지반조건이 유사할 경우 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
- 또한 경험식 및 이론적 방법은 터널직경, 토피고 등 사업구간의 다양한 조건을 반영하기 어려우므로 적용시 이를 고려하여야 한다.
- 따라서 이론식 및 경험식에 의한 방법은 각 연구자가 검토한 지반조건과 사업구간의 지반조건이 유사할 경우에만 검토하여 적용하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 암반구간을 굴착하는 국내 일반적인 도심지 터널의 경우는 지반조건이 크게 상이하여 적용성이 떨어지므로 반영하지 않는 것이 타당하다.

구분	적용조건	굴착검토범위 산정방법
이론식 및 경험식	• 사업구간 중 터널구간 굴착 지반조건이 토사, 점토일 경우	• 각 연구자의 연구결과를 분석하여 대상사업구의 적용성 검토 후 반영 • 최소 굴착검토범위, 수치해석 결과와 비교 후 보수적으로 적용

(2) 최소굴착검토범위 검토

① 해석방법

- 터널 굴착에 의한 검토범위를 산정하기 위해 해석조건별 수치해석을 수행하였다.

〈해석조건〉

구분	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
해석조건	응력해석	응력해석	침투-응력해석	침투-응력해석
인접구조물 반영 여부	미반영	반영	미반영	반영

- 수치해석에 의한 방법을 통해 굴착검토범위 산정시 인접구조물을 반영할 경우 구조물 하중에 의해 실제와 상이한 침하경향을 보이므로 인접 구조물은 미반영하는 것이 적절한 것으로 검토되었다.
- 또한 침투-응력해석조건에서는 일반적인 지표침하곡선과 달리 지하수 저하에 의한 침하영향으로 모델링 전구간에 지표침하가 발생하여 굴착검토범위를 산정하기 어려우므로 침투를 고려하지 않고 응력해석조건으로만 해석을 수행하는 것이 적절한 것으로 검토되었다.

② 토피고 및 지반조건에 따른 굴착검토범위 산정결과

- 굴착검토범위에 영향을 미치는 지반조건과 토피고를 변수로 하여 수치해석을 수행하였다.
- 검토결과
 - 토피고에 따른 지중연직변위 분포경향은 토피고가 클수록 지반하중의 영향으로 터널 천단침하량이 크게 발생하였다.
 - 또한 상부 지층의 변형계수가 클수록 터널 천단침하량은 감소하는 경향을 나타내었다.
 - 각 조건별 굴착검토범위 산정결과 1.13D~1.50D로 검토되었다.
 - 따라서 최소 굴착검토범위는 1.5D로 선정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

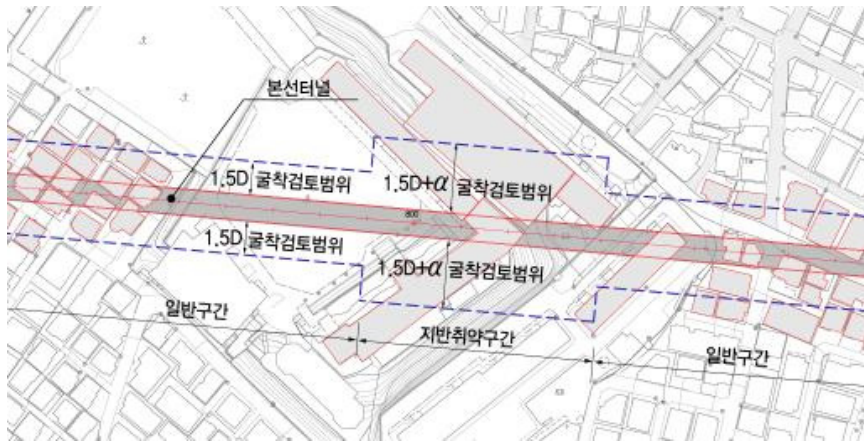
(3) 지반침하취약구간 굴착검토범위 검토

① 검토방법

- 이론식 및 경험식 : 사업구간 중 이론식 및 경험식 적용이 가능한 구간(토사, 점토층 굴착구간)은 적용성 검토 후 반영하고 최소 굴착검토범위, 수치해석 결과와 비교 후 보수적으로 적용
- 수치해석 : 지반침하 취약구간에 대해 대표단면을 선정한다.
- 대표단면 선정기준
 - 연암 이하 굴착구간(RMR 40 이하) 중 본선터널구간, 횡갱터널구간, 확폭터널구간, 정거장터널구간의 구간별 지반조건이 가장 열악한 단면을 대표단면으로 선정
- 해석조건
 - 응력해석조건, 인접구조물은 미반영
- 기타
 - 기존 운행 중인 철도터널 경계에서 30m이내에 굴착이 이루어질 경우, 관련법에 따라 관계기관과 협의하여야 함

② 검토결과

- 지반침하 취약구간에 대한 수치해석결과 굴착검토범위가 최소굴착검토범위(1.5D) 이상일 경우에는 산정된 굴착검토범위 적용



굴착검토범위 산정결과 예시

2.2 지하수 변화에 의한 영향 검토

(가) 설계지하수위 산정

▣ 검토개요

- 지하수변화에 의한 영향 검토 및 지반안전성 검토시 초기조건으로 적용되는 설계지하수위 선정 방법에 대해 검토한다.

■ 검토결과

- 연간지하수위 변동량 산정
 - 지하수 정보센터(www.gims.go.kr)의 국가관측망 및 보조관측망 자료를 활용하여 연간 지하수위 변동량을 산정한다.
 - 계측 미실시, 계측오류 및 양수 등 신뢰저하 관측망은 제외한다.
- 강우시 침투해석에 의한 지하수위 상승고 산정
 - 시추공 72시간 관측수위를 초기조건으로 적용한다.
 - 인접하여 하천이 위치할 경우 하천 홍수위로 모델링하여 침투해석을 수행한다.
 - 침투해석을 통해 관측된 시추공 지하수위에서 강우시 지하수위 상승고를 산정한다.
 - 초기지하수위는 각 대표단면별 가장 가까운 위치의 72시간 시추공 지하수위를 적용하여 각 단면별로 설계지하수위를 산정한다.
- 설계지하수위 선정
 - 연간 지하수위 변동량(최근 1년)과 강우시 지하수위 상승고를 비교하여 안전측으로 적용
 - 초기지하수위에서 산정된 지하수위 상승고를 합하여 설계지하수위를 선정

〈설계지하수위 선정 예〉

구분	지반고, E.L(+), m	시추공 관측 지하수위		침투해석결과 상승고(m)	연간지하수위 변동량(m)	적용 상승고(m)	설계지하수위		
		E.L(+), m	G.L(-), m				E.L(+), m	G.L(-), m	
A-A 단면	좌측	20.64	11.60	9.04	1.99	2.06	2.06	13.66	6.98
	우측	20.54	13.10	7.44	1.64	2.06	2.06	15.16	5.38

- 설계지하수위가 굴착면 아래에 위치할 경우 굴착에 의한 지하수변화에 의한 영향이 없을 것으로 판단되므로 검토를 생략할 수 있으나 관련 근거자료를 명확히 명시하여야 한다.

(나) 지하수위 변동 허용기준

■ 검토개요

- 지하수위 저하에 의한 침하영향을 확인하기 위한 누적 및 일별 지하수위저하 기준 검토

■ 검토결과

- 지하수위 변화량 안전성 판단기준
 - 기존에는 1일 강수량 200mm 이상의 집중 강우시 배면지반에서 지하수위 변화는 1.0m로 판단되어 1일 변화량이 1.0m 이상일 경우 위험한 것으로 판단함(토류벽의 굴착단계별 거동예보 시스템 개발, 1998, 연세대학교)
 - 이후 2016년 서울시에서 제시한 공사장 지하수 관리 매뉴얼에 따라 누적 지하수위와 일별 지하수위로 구분하여 관리한다.
- 공사장 지하수 관리 매뉴얼(서울시, 2016)
 - 누적 지하수위 변화량 기준 : 8m(총적층을 대상으로 지하수위가 10m 저하될 경우 25mm의 지반침하가 발생 할 수 있는 것으로 개략 검토됨, 10m에 대한 안전율 80% 적용)
 - 일별 지하수위 변화량 기준 : 1m/일

• 검토결과

- 누적 지하수위 변화량 기준 : 현장여건(지반조건, 벽체공법, 현장현황 등)을 종합적으로 고려하여 지표침하 25mm가 발생하는 지하수위 저하량을 적용
- 일별 지하수위 변화량은 1m/일 적용(토류벽의 굴착단계별 거동예보 시스템 개발, 공사장 지하수 관리매뉴얼 참조)
- ※ 지하수위계 계측결과 지하수위가 10m 이상 저하되어도 인접 지반에 미치는 영향이 미미(지중경사계, 지표침하계, 인접구조물 경사계, 균열계는 1차관리 기준치 이내)한 사례가 다수 존재함

2.3 지반안전성 검토

(가) 수치해석에 의한 지반안전성 검토

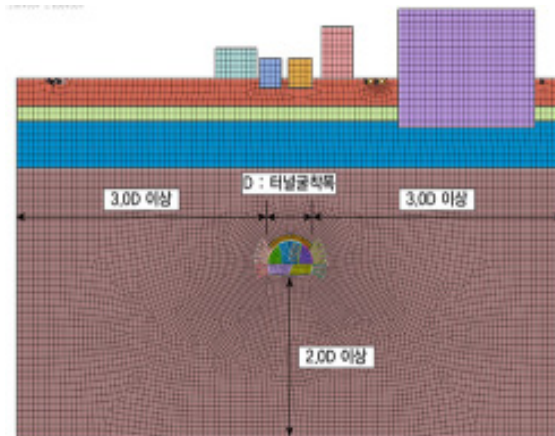
▣ 검토개요

- 지반안전성 검토를 위한 수치해석 수행시 해석조건 및 방법(해석영역, 해석방법, 안전성 검토기준, 설계하중)에 대한 검토

▣ 검토결과

(1) 해석 영역

- 경계조건의 구속영향을 배제하기 위하여 굴착면 좌우로 3D(D : 터널 굴착 폭), 하부 2D 이상을 해석영역에 포함하여 검토를 수행하며, 또한, 3D 범위 내에 구조물이 존재할 경우 해당 구조물의 규모를 모델링에 포함하여 수치해석을 수행한다.



지반 안전성검토를 위한 해석 영역

(2) 해석 방법

- 해석은 굴착과 굴착에 따른 지하수 변화에 의한 영향을 동시에 반영이 가능한 방법으로 수행한다.
- 대표단면에 대해 안전측 해석방법인 2차원 해석을 기본으로 수행하며, 정거장 터널 및 수직구 등 3차원적인 거동하는 경우는 3차원 해석을 수행한다.

- 3차원 해석을 통해 안전성을 확인해야 하는 경우는 다음과 같다.
 - 「시설물 안전 및 유지관리에 관한 특별법」상 주요시설물(C등급 이하) 및 노후구조물(구조적 균열)인접
 - 정거장 터널구간
 - 굴착영향범위 내에 동시굴착 현상이 존재하는 경우

(3) 설계하중

구분	도로하중	인접건물			인접구조물	열차하중
		용도	주택	사무실		
적용하중	12.70kN/m ²	최상층	14.0kN/m ²	16.0kN/m ²	25.0kN/m ³	60.0kN
		일반층	13.0kN/m ²	14.0kN/m ²		
		1층	16.0kN/m ²	15.0kN/m ²		
		지하층	33.0kN/m ²	30.0kN/m ²		
근거	도로교 설계기준 DL24 적용	설계시공지침(일본건축학회)			철근콘크리트 단위중량 적용	KR C-08020의 표준열차하중도 (여객 전용선)적용

(4) 안전성 검토기준

- 터널

구분		허용기준	비고
변위	천단변위(mm)	-	• 변위에 대한 기준은 없으므로 기술자의 판단에 따라 변위가 과다할 경우 보강계획 수립
	내공변위(mm)	-	
지보재 응력	shotcrete 응력(MPa)	0.4fck	• 지보재 강도에 따라 변경
	rockbolt 축력(kN)	0.5fy×As	• 지보재 강도에 따라 변경

- 인접구조물 및 지하매설물

구분	침하 허용기준(mm)	각변위	비고
인접구조물	25	1/500	
지하매설물	25	1/500	

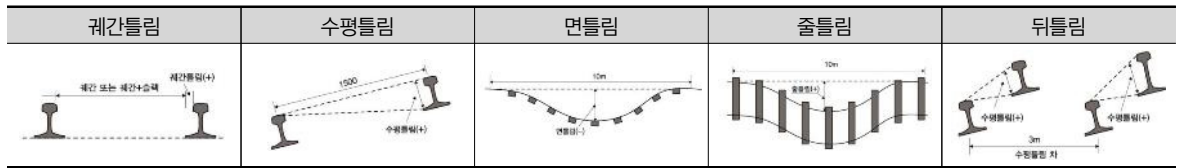
- 지하철 선로

- 운영주체가 서울교통공사일 경우

구분	궤간틀림	수평틀림	면틀림	줄틀림	비고
시공기준	중 6mm(4mm), 감 3mm(2mm) 이내	본선 7mm(5mm), 측선 (7mm) 이내	본선 7mm(5mm), 측선 (7mm) 이내	본선 7mm(5mm), 측선 (7mm) 이내	• 서울교통공사 선로정비규정 제2장 궤도정비의 기준

- 운영주체가 철도시설관리공단일 경우

	주의기준					표준면차	비고
	V≤40	40<V≤80	80<V≤120	120<V≤160	160<V≤230	160<V≤230	
궤간틀림	<-3,17≤	<-3,17≤	<-3,17≤	<-3,17≤	<-3,13≤	-	• 선로유지관리지침 (철도시설관리공단, 2018)
수평틀림	10≤	10≤	10≤	10≤	10≤	-	
면틀림	15≤	13≤	10≤	7≤	2,1≤	2,1≤	
줄틀림	14≤	12≤	9≤	7≤	6≤	1,6≤	
뒤틀림	13≤	10≤	9≤	8≤	6≤	-	



(나) 발파진동영향 검토

■ 검토개요

- 암반구간 발파시 발파진동에 의한 영향 평가방법 및 결과에 대한 검토
- 발파 소음·진동에 대한 검토는 설계분야에서 검토한 내용 수록
- 발파진동영향 검토와 손상기준은 국가건설기준(KDS 27 20 00)을 준용

■ 검토결과

(1) 발파진동 추정식

- 발파진동 추정식은 설계단계에서는 시추공 시험발파를 통해 발파진동 추정식을 산출하나 시추공 시험발파 수행이 어려운 경우에는 국토교통부에서 제시한 아래 식을 적용하여 발파진동영향 예측 및 발파공법을 선정한다.

- 국토교통부 식 $V = 200 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.6}$

여기서, V = 진동속도(cm/sec)

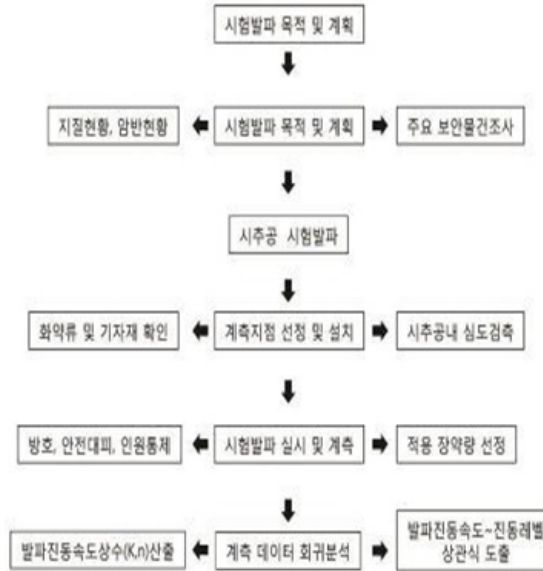
D = 폭원으로부터 이격거리(m)

W = 지발당 최대장약량(kg)

• 시추공 시험발파

- 시추공 시험발파를 실시하여 발파진동 추정식 산출
- 수행절차
 - 계획노선상의 시추공 중 시험발파 대상 시추공 확보
 - 관할 경찰서에 화약류 사용허가 신청 및 신고
 - 시추공 시험발파 전 진동 전파특성 파악을 위해 미소 장약량으로 사전 시험발파 실시

- 시추공에서 다양한 화약량으로 6회 발파수행
- 다양한 거리에 설치된 진동측정기 센서를 통해 진동 데이터 수집
- 수집된 데이터를 통해 진동추정식, 진동레벨상관식 및 소음예측식 산출



(2) 발파진동 허용기준

- 발파진동허용기준은 아래의 터널설계기준(KDS 27 20 00 : 2016)에서 제시하는 표를 기준으로 기존 설계 및 시설물 관리기관 협의사례, 환경분쟁조정위원회 조정사례 등을 고려하여 선정한다.
- 구조물의 손상기준 발파진동 허용치(KDS 27 20 00 : 2016)

구분	문화재 및 진동예민 구조물	조적식(벽돌, 석재 등) 벽체와 목재로 된 천장을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물	철근콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건축물	철근콘크리트 또는 철골골조 및 슬래브를 갖는 대형건물
최대입자 속도(cm/sec)	0.2~0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

(3) 발파진동 영향 검토

- 발파진동 영향 검토는 발파진동 추정식을 이용한 방법과 수치해석을 이용한 방법이 있다.

① 발파진동 추정식에 의한 검토

- 발파진동 추정식을 이용하여 발파시 검토대상 구조물에 발생하는 발파진동값 예측
- 구조물에 따른 허용기준과 비교하여 안전성을 판단

② 수치해석에 의한 검토

- 필요시 수치해석을 통해 검토대상 구조물에 발생하는 발파진동값 예측

2.4 계측 계획

▣ 검토개요

- 계측계획의 적정성을 확인하기 위한 계측기 설치 계획, 측정 빈도, 계측관리 기준치에 대해 검토

▣ 검토결과

- 계측기 설치 위치 및 측정 빈도
 - 터널구간

구분	설치간격 및 위치	측정시기	측정빈도	비고
천단침하계	20m (지반조건에 따라 간격 증가 및 감소 가능), 막장후방 1m 이내	0~15일	2회/일	단면당 천단 1개소 설치
		15~30일	1회/2일	
		30일~	1회/주	
내공변위계	20m (지반조건에 따라 간격 증가 및 감소 가능), 막장후방 1m 이내	0~15일	2회/일	단면당 설치
		15~30일	1회/2일	
		30일~	1회/주	
지표침하계	정밀계측구간, 횡방향 : 1.5D + am (D : 터널직경)	0~15일	1회/일	터널상부 설치
		15~30일	1회/2일	
		30일~	1회/주	
숫크리트응력계	정밀계측구간	0~15일	1회/일	막장부 후방 3m 설치 직후 (수평, 수직방향 5개)
		15~30일	1회/2일	
		30일~	1회/주	
록볼트축력계	정밀계측구간	0~15일	1회/일	막장부 후방 3m 설치직후 (5개의 다른 심도 설치)
		15~30일	1회/2일	
		30일~	1회/주	
지중변위계	정밀계측구간	0~15일	1회/일	막장후방 3m 또는 굴착후 24시간 이내 설치 직후 (3~5개의 다른 심도 설치)
		15~30일	1회/2일	
		30일~	1회/주	
지중경사계 및 지중침하계	정밀계측구간, 20m	0~15일	1회/일	터널전방(H+h1) 혹은 2D설치 직후 (터널상부 5개소 설치)
		15~30일	1회/2일	
		30일~	1회/주	

- 천단침하계와 내공변위계는 표준시방서(KCS 27 50 10 : 2016)에 따라 계측기 설치간격은 20m 간격을 표준으로, 토피가 터널직경의 2배 이하인 구간은 10m 간격을 표준으로 하되 지반조건이 불량한 구간이나 변화가 심한 구간에 대하여는 계측간격을 표준간격보다 좁혀야 하며, 지반조건이 양호하고 구간 내에서 지반 변화가 적을 때에는 사전검토 결과를 토대로 계측간격을 표준보다 넓히거나 계측을 생략할 수 있다.

- 모든 계측기는 현장여건에 따라 증감할 수 있다.
- 계측관리 기준
 - 계측관리기준은 수치해석결과, 경험치, 타 계측결과 및 현장지반조건 등을 참조하여 결정하며, 계측치의 절대변화량 및 변화속도 등을 참고하여 계측관리기준치를 설정하고 그에 따라 안전성을 평가한다.
 - 계측관리기준 선정시 수치해석결과에 의한 설계예상치를 적용할 경우, 제한된 지반조사결과를 활용한 결과로 현장여건(지반조건, 지하수위 등)이 상이하면 적용하기 어려우므로 1차관리기준은 3차관리기준의 60%, 2차관리기준은 3차관리기준의 80%를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
 - 또한, 안전성 평가 및 대책공의 실시(지보패턴 변경 등)는 단일항목의 결과만으로 평가하기보다는 관련된 계측항목(지보재 응력, 축력 등)을 종합적으로 고려한다.
 - 계측관리기준 선정 예

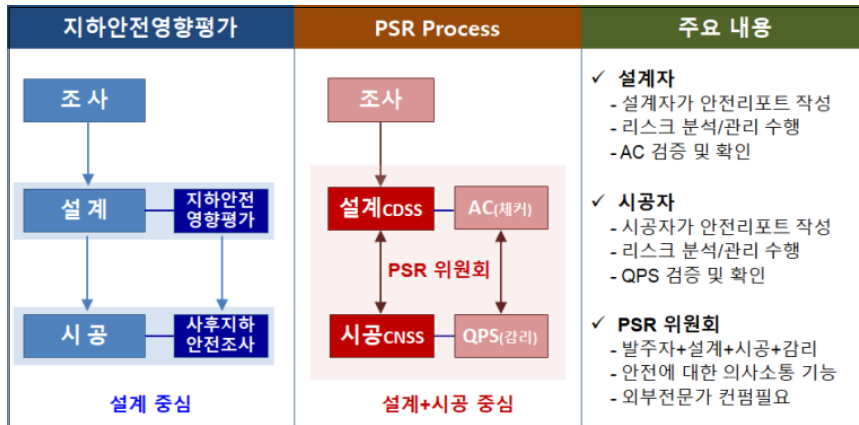
구분			1차 관리기준(안전)	2차 관리기준(주의)	3차 관리기준(위험)
지중경사계	일간 변위량	토사	$\sigma = 2\text{mm}$ (7일간)	$\sigma = 4\text{mm}$ (7일간)	$\sigma = 10\text{mm}$ (7일간)
		암반	$\sigma = 1\text{mm}$ (1일간)	$\delta \leq 2\text{mm}$ (1일간)	$\sigma = 4\text{mm}$ (1일간)
	최대변위량		3차관리기준 $\times 0.6$	3차관리기준 $\times 0.8$	$0.002 \sim 0.003H$ (H= 최대굴착깊이)
지하수위계	일 수위변화량(ΔH)		$\Delta H = 0.5H$	$\Delta H = 0.75\text{m}$	$\Delta H = 1.0\text{m}$
	누적 수위변화량 (MH)		3차 관리기준 $\times 0.6$	3차 관리기준 $\times 0.8$	지표침하량 25mm가 발생하는 지하수 저하량의 80%
지표침하계	최대변위량		3차 관리기준 $\times 0.6$	3차 관리기준 $\times 0.8$	25mm(허용치)
응력계	최대변위량		3차 관리기준 $\times 0.6$	3차 관리기준 $\times 0.8$	허용치
균열계	최대변위량		0.2	0.38	0.5
건물경사계	각변위		1/1,000	1/850	1/500
천단침하계	연암조건, 복선터널단면		18mm	24mm	30mm
내공변위계	연암조건, 복선터널단면		18mm	24mm	30mm
천단침하 및 내공변위 속도	-		5mm 이상/일	막장부 근처 10mm/일 이상, 후방 5mm/일 이상	변위의 가속
로크볼트 축력 (kN)	D25-SD350		53.0 (3차관리기준 $\times 0.6$)	70.9 (3차관리기준 $\times 0.8$)	88.7(허용응력)
숏크리트응력 (Mpa)	일반		5.0 (3차관리기준 $\times 0.6$)	6.7 (3차관리기준 $\times 0.8$)	8.4(허용응력)

1) 누적 지하수위 저하량은 지하수위 저하에 따른 인접 지반 침하영향을 확인하기 위해 참고자료로 활용하며, 공사장 지하수 관리매뉴얼 (2016.12)의 누적지하수위 3차관리기준 기준(8m)은 구조물 최대허용침하량(25mm)이 발생하는 것으로 검토된 값(Sowers, 1962)의 80%이며, 지하수위의 계절적 자연변동량은 배제하고, 관측자료 최저 지하수위에서 굴착으로 인해 추가로 저하된 지하수위를 말할 서울시 지층은 일반적으로 매립층(5m), 충적층(15~20m), 풍화토(5m), 풍화암, 연경암 순으로 구성되어 이를 단순화하여 충적층을 대상으로 지하수위 강하량을 10m로 가정하였을 때 25mm의 지반침하가 발생할 수 있는 것으로 개략 검토됨
누적지하수위 3차관리기준은 사업대상지역의 지반조건을 반영하여 지표침하량 25mm가 발생하는 지하수 저하량을 산정하여 적용하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 기준에 대한 추가적인 연구가 필요함

- 계측계획도면은 계측관리계획(계측기 설치시기, 계측주기, 계측관리기준 등)을 수록하여 현장에서 계측관리가 원활하게 확인할 수 있도록 하여야 함

3. 터널 지하안전영향평가와 해외 안전관리시스템 비교

지금까지 설명한 터널 지하안전영향평가 방법을 해외의 안전관리시스템과 비교하고자 하였다. 이를 위하여 싱가포르 LTA에서 시행되고 있는 PSR(Project Safety Review)방법과 비교분석하였다. 그림 4에는 국내 터널지하안전영향평가 방법과 싱가포르 PSR 프로세스에 대한 비교내용이 정리되어 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 국내 터널지하안전영향 평가는 설계검토 중심으로 수행됨을 볼 수 있다.



〈그림 4〉 터널 지하안전평가 방법과 PSR 프로세스 비교

또한 그림 5에는 국내 터널지하안전영향평가서와 싱가포르 PSR 보고서에 대한 비교내용이 정리되어 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 국내 터널지하안전영향평가서는 지반안전성 및 지하수 변화 등을 중심으로 설계 검증의 보고서이며, 싱가포르 PSR 보고서는 리스크 분석 및 평가내용이 포함되어 있는 안전 리스크 보고서라 할 수 있다.

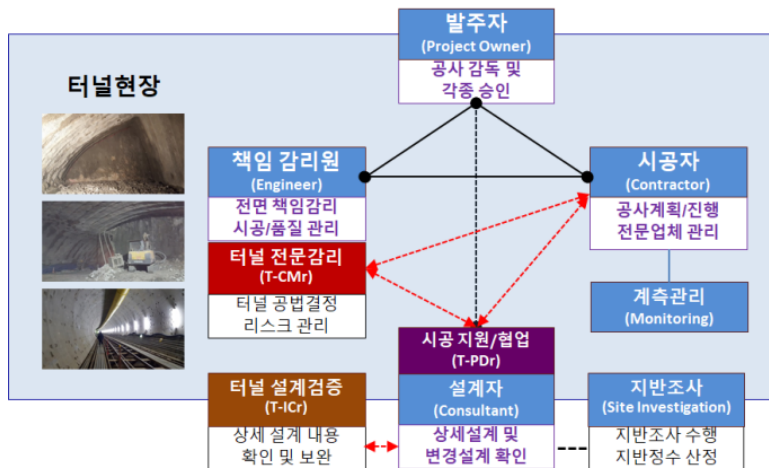
지하안전영향평가	PSR Process	주요 내용
지질 및 지반 현황분석	지질 및 지반 현황분석	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 동일한 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 지질 및 지반 현황분석 - 지반침하 해석 - 지하수 변화 해석 ✓ 다른 수행 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 건물/구조물 손상 평가 - 정량적 리스크 분석 평가 - 리스크 저감 대책 ✓ 주요 특징 <ul style="list-style-type: none"> - 안전과 리스크 중심 - 리스크 저감대책 - 철저한 계속관리
지하수 변화해석	지하수 변화해석	
계측 계획	계측 계획	
지반안전성평가	건물/구조물 손상평가	
지반안전 확보방안	리스크 저감 대책	
	리스크 분석 평가	
설계검증 중심	안전/리스크 평가 중심	

〈그림 5〉 터널 지하안전평가서와 PSR 보고서 비교

4. 도심지 터널공사의 안전관리 방안

4.1 선진형 터널공사 건설시스템

선진국에서 운영되는 터널공사관리방법을 참고하고, 국내 현재의 여건을 반영하여 선진형 터널공사 건설관리시스템을 도출하였다. 본 시스템의 기본적인 체계가 그림 6에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 발주자와 시공사 그리고 책임감리자외에 현장에 상주하는 터널 전문기술자로 구성된다.



〈그림 6〉 선진형 터널공사 건설시스템(김영근, 2017)

본 시스템의 기본적인 방향은 터널전문가가 현장에 상주하면서 지반의 불확실성에 대한 리스크를 시공 중에 확인하고 이에 대한 즉각적인 대처를 하도록 하는 것이다. 이러한 역할을 담당하는 전문 감리자(T-CMr)는 발주자와 시공사로부터 객관성과 독립성을 확보하여 기술적인 의사결정을 하도록 하는 것이다. 또한 터널설계의 책임기술자(T-PDr)이 설계단계에서부터 리스크 평가를 통한 안전설계를 수행하고, 설계내용이 시공에 실현되는 과정을 확인하도록 하여 설계자가 시공단계에서의 권한과 책임을 가지도록 하는 것이다. 또한 설계자는 설계내용과 성과물에 대하여 독립적인 체커엔지니어(T-ICr)에게 검증을 받도록 하여 설계자의 오류 및 문제점을 사전에 방지하도록 하는 것이다.

이와 같이 본 시스템은 각각의 기술자가 업무를 수행하면서 일정한 권한과 책임하에서 독립적이고 동등한 관계를 가지며, 상호 체크를 통한 협업 시스템이다.

4.2 도심지 터널 안전관리 방안

도심지 터널공사는 지질리스크를 포함한 다양한 리스크가 존재하는 가장 위험한 공종이라고 할 수 있다. 따라서 보다 확실하고 철저한 안전관리가 무엇보다 요구되며, 기본적인 안전관리 방안은 다음과 같다.

지반조사는 아무리해도 지나치지 않다. Detailed Site(Ground) Investigation

- 정밀한 지반조사 : 도심지 터널설계시 지반조사는 100~200m 간격으로 시추조사를 실시하고 있으나, 지반이 매우 불량하거나 완전 풍화된 토사 지반 등 취약구간에서는 시추조사 간격을 50m당 최소 1개소 이상 실시하거나 확보해 이를 설계에 반영하도록 하여야 한다. 또한 설계시 예상한 지반조건을 시공 중에 전문가에 의한 Face mapping을 실시하여 반드시 이를 확인하고 변경하도록 하여야 한다.

터널공사는 현장을 아는 전문가가 해야 한다 Tunnel Expert in Site

- 터널전문가 현장배치 : 앞서 설명한 선진형 터널공사 건설시스템의 핵심사항으로서 안전한 터널시공을 위해 지반 및 터널 기술자를 현장에 상주시켜 터널 막장면 확인, 보강대책 수립, 계측관리 등 지하안전 업무를 총괄하도록 하고 터널공사 중 지반공학적 문제 발생시 주도적으로 독립적인 권한으로부터 안전대책을 수립하도록 하여야 한다.

상시 계측관리는 안전의 핵심이다. Robust Monitoring during Construction

- 철저한 계측관리 : 도심지 터널의 경우에는 터널굴착 중에 발생하는 제반 현상을 즉각적으로 주기적으로 모니터링 하여야 하며, 필요시 자동계측 시스템을 적용하여 공사 관계자간 실시간 계측데이터를 공유하고 대처하도록 하여야 한다. 특히 건물 및 도로 하부등 주요 통과 구간에 대한 계측관리기준(설치 갯수, 측정 빈도, 관리 기준)등을 일반구간 보다 더 강화하여 관리하여야 한다.

리스크 감소의 키는 정보공유와 상호소통이다. Better Communication through Organizations

- 공사정보 소통공유 : 시공단계에서 발생하는 모든 자료가 발주자, 시공자(전문업체 포함) 감리자에게 공유하도록 하고, 이상 징후 발견시 SNS 등을 통하여 즉각적으로 경고하고 같이 대응할 수 있도록 한다. 또한 시공사는 조사 및 설계단계의 모든 자료(입찰시 직접 실시한 지반조사 외에 경쟁사의 지반조사 자료, 지하정보 통합체계 등)을 통해 확보 가능한 정보를 적극 반영하도록 하여야 한다.

안전관리는 모든 단계에서의 리스크 평가로부터 만들어진다. Risk Management at all stages

- 리스크 평가관리 : 도심지 터널공사에서 선진국에서 수행하고 있는 정량적 리스크 분석 및 평가방식을 적용하고, 설계에서부터 시공 그리고 유지관리까지 모든 단계에 반영하도록 하여 리스크 평가를 실시하고 이를 보고서로 제출하도록 하여야 한다. 이를 위해 발주처 또는 관계부처에서는 국내 터널공사 특성을 반영한 리스크 평가기준과 관리방안을 조속히 마련하여야 한다.

■ 제11강을 마치면서

이상으로 도심지 터널공사와 관련하여 지하안전영향평가와 지하안전관리를 살펴보았다. 이러한 평가기준이나 방안은 최근에 만들어진 것으로 지하터널공사에서의 안전이라는 이슈가 매우 중요하게 됨에 따라, 이에 대한 적극적인 대응을 하고 있음을 확인할 수 있다.

터널 지하안전영향평가는 터널공사로 인한 안전문제에 보다 적극적으로 대응하기 위하여 설계단계에서부터 지하안전영향평가를 수행하도록 하고, 이에 대한 평가기준을 마련하여 보다 객관적으로 평가업무를 수행하고자 하는 것이다. 지난 몇 년 동안 비교적 많은

터널지하안전영향평가 수행되어 왔지만, 발주자 및 전문기관 모두 만족하지 못한 상태로 단순한 하나의 검토과정으로 인식되어 있고 설계자, 시공자 그리고 감리자와의 책임과 역할이 불분명한 것이 사실이다. 지하안전영향평가라는 틀 속에서 터널공사의 특성을 반영하는 것이 매우 중요하며, 평가과정에서의 제반 문제점에 대한 개선을 통하여 터널공사에서의 지하안전영향평가와 지하안전관리가 제대로 정착하여야만 한다.

특히 도심지에서의 대심도의 연장이 긴 터널특성을 고려하여 이에 대한 평가기준과 방법에 대한 지속적인 검토나 개선이 필요하다고 생각된다. 특히 선진국에서 의무적으로 수행하고 있는 리스크 평가를 어떻게 터널공사에 반영하고 적용해야 할지 고민할 필요가 있음이다.

이제 안전이라는 것은 우리에게 있어 필수 불가결한 이슈가 되었다. 특히 지하공사에서의 안전문제는 국민적 관심사가 되었다. 여전히 마스크를 통해서 보도되는 터널공사중의 사고소식을 접하면서 이제는 정말 새로운 변환을 통하여 터널공사에 대한 안전문제를 불식시키고 안전한 터널공사의 이미지를 제고하는 노력이 정말 필요한 때라고 생각한다. 이를 위해서는 터널 전문가 및 터널 기술자들의 부단한 노력과 더불어 선진시스템을 반영하여 우리만의 시스템을 개선하고 구축하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 지하안전영향평가서 표준매뉴얼, 2020, 국토교통부
2. 도심지터널 지하안전영향평가 평가기준 수립 연구보고서, 한국토지주택공사 및 한국터널지하공간학회, 2020
3. 지하공사에서의 프로젝트 리스크 및 안전관리 시스템, 2017, 한국프로젝트경영협회 2017 PM 심포지엄
4. 선진국형 터널공사 건설시스템, 2018, KTA 정책연구보고서, 한국터널지하공간학회
5. 선진국 지하대심도 개발에서의 핵심이슈와 대책, 2019, 지하대심도 건설기술세미나
6. AS/NZS 4360:2004, Risk Management (Standards Australia)
7. BS 31100:2008, Risk Management – Code of Practice (BSI)
8. Identifying Hazards in the Workplace – A Guide for Hazards in the Workplace (Australia Comcare)
9. ISO 31000: 2009 Risk Management – Principles and guidelines on Implementation
10. LTA General Specification Appendix A
11. Construction Safety Handbook, LTA, 2012
12. Managing Safety and Risks in Singapore Mass Rapid Transit Projects, LTA

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]