

| 터널기술위원회 |

국내터널 붕괴 및 위험도 평가에 대한 고찰



황 제 돈
에스코아이에스티 사장
(hwangjd@escoist.com)



김 상 환
호서대학교 공대 교수
(kimsh@hoseo.ac.kr)



신 휴 성
한국건설기술연구원 선임연구원
(hyushin@kict.re.kr)



이 재 국
에스코컨설턴트 과장
(jklee@escoeng.com)

1 서언

전 국토의 70% 이상이 산악지역이라는 지형특성과 교통 인프라의 고속화 추세와 함께 도로, 철도, 도시철도(지하철), 지하저장시설 등과 같은 대규모 터널 및 지하공동의 수요가 증가하고 있다. 이에 따른 터널기술 또한 크게 발전하고 있다. 그럼에도 불구하고 지반의 불확실성에 기인하여 터널 건설 중 붕괴사고는 줄어들지 않고 있으며, 최근에도 대형 터널붕괴사고가 언론에 빈번히 보도되고 있다. 이러한 터널붕괴는 인명피해와 큰 경제적 손실을 초래할 뿐만 아니라 사회적 문제로 까지 대두되고 있는 실정이다. 이에 따라 우리 터널기술위원회에서는 터널건설 중 발생한 붕괴·붕락 사례를 조사하고, 간단한 통계분석을 통해 붕괴유형과 붕괴된 현장의 제반 특성에 대하여 고찰하고 터널붕괴 위험도 평가기법에 대하여 소개하고자 한다.

2. 터널 붕괴사례 조사 및 특성별 분류

현재까지 70여개의 국내 터널 붕괴사례를 수집하였으며 수집 자료에는 암반터널에서부터 천층 토사터널까지 포함하고 있다. 본 자료수집 단계에는 붕괴현장의 설계자료 및 시공현황 뿐만 아니라 지반조사자료 등을 확보해 표 1과 같은 분류체계로 자료를 정리하였다.

조사된 자료에 포함된 붕괴 터널은 지하철터널 44.6%, 도로터널 41.1%, 철도터널 7.1%, 기타 7.2%로 구성되어 있으며 각 분류항목별로 수집 자료의 분포 현황을 분석해 보면 터널단면이 비교적 큰 경우와 저토피 구간 및 풍화가 심한 보통암 등급 이하의 취약지반에서 붕괴사고가 많이 발생하였다. 또한 산악 암반터널에서는 일반적으로 매우 불리한 불연속면 조건에서 대형 썸기형 낙반사고가 지배적이었으며 도심지 토사터널에서는 지하수 조건에 매우 민감하여 지하수와와의 싸움이라 일컬어질 만하다.

표 1. 터널 붕괴·붕락 현장자료 분류체계

분류	내용
기하학적조건	• 터널굴착 단면적
	• 터널환산 심도비 (H/D)
지반조건(암질상태)	• 막장암종
	• 막장풍화도
불연속면조건	• 지반등급
	• 불연속면의 상태
지하수조건	• 불연속면의 기하학적 특성
	• 지하수유입량
굴착조건	• 터널길이
	• 지하수비
지보/보강수준	• 굴착방법
	• 굴착효율
	• 지보패턴 수준
	• 보조공법

2.1 기하학적 특성에 따른 터널붕괴

터널환산단면적(m²)에 따라 터널붕괴현황을 분석해보면 그림 1과 같다. 이 그림에서 보여주는 것과 같이 터널환산단면적이 70~120m² 경우에 있어서 터널이 붕괴된 사례

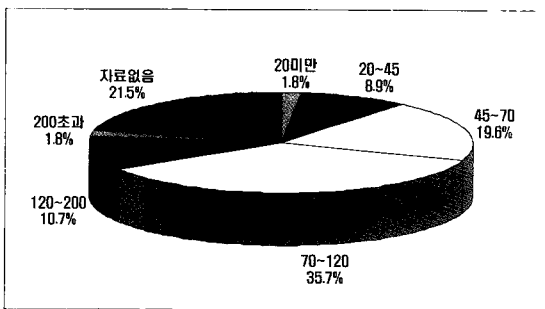


그림 1. 터널환산단면적에 따른 터널붕괴사례

가 35.7%로 가장 많은 것으로 조사되었다.

터널환산심도비(H/D:토포/터널폭) 따른 터널붕괴현황을 분석해 보면 그림 2와 같다. 이 그림에서 보여주는 것과 같이 터널환산심도비가 2.5이하인 경우에 있어서 터널이 붕괴된 사례가 35.7%로 가장 많은 것으로 조사되었다.

2.2 지반조건에 따른 터널붕괴

암반상태에 따른 터널붕괴사례는 그림 3과 같이 보통암류의 경우 42.9%로 가장 많으며 RQD의 경우는 그림 4와 같이 10~25% 경우와 N치 경우는 50회/30cm 이하의 경우가 많은 것으로 분석되었다.

막장의 풍화도에 따른 붕괴사례는 그림 5에서 보여주는 바와 같이 심한풍화구간에서 막장지반이 보강되었다고 하여도 붕괴사례가 많은 것으로 분석되었다. 따라서 굴진시 막장의 지반조건에 대한 세밀한 조사와 검토가 요구된다.

2.3 불연속면 조건에 따른 터널붕괴

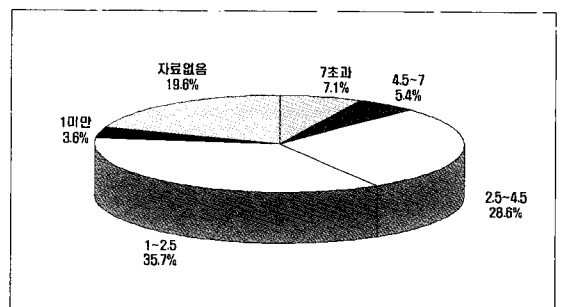


그림 2. 터널환산심도비에 따른 터널붕괴사례

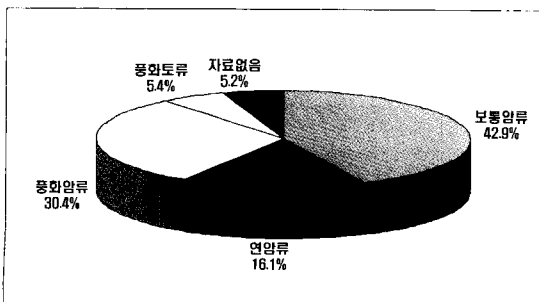


그림 3. 암반상태에 따른 터널붕괴사례

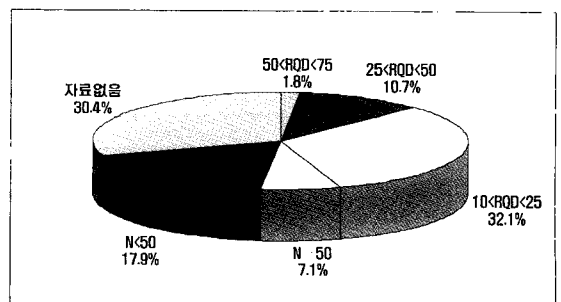


그림 4. RQD 및 N치에 따른 터널붕괴사례

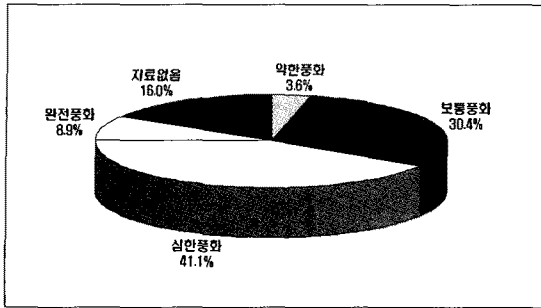


그림 5. 막장의 풍화도에 따른 터널붕괴사례

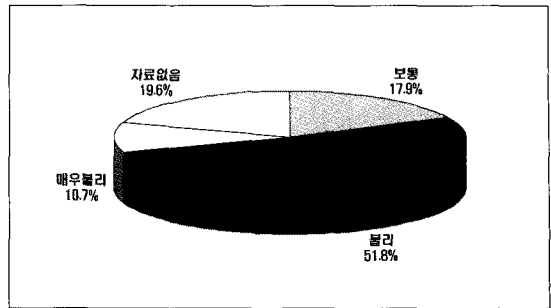


그림 6. 불연속면 상태에 따른 터널붕괴사례

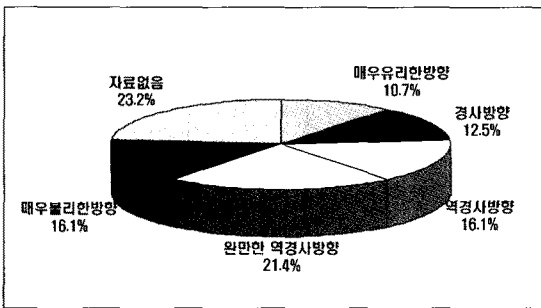


그림 7. 불연속면방향에 따른 터널붕괴사례

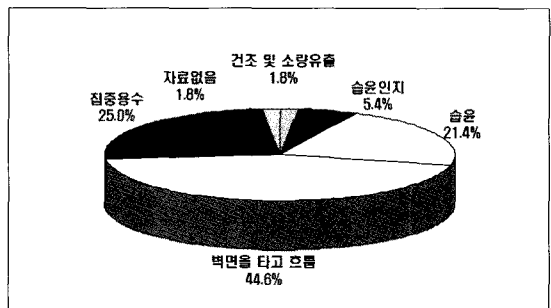


그림 8. 지하수유입량에 따른 터널붕괴사례

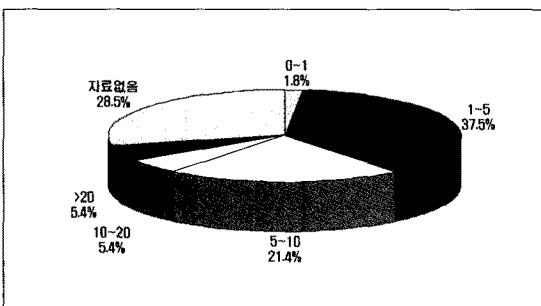


그림 9. 지하수비에 따른 터널붕괴사례

암반의 불연속면 조건에 따른 터널붕괴사례의 경우 그림 6과 7에서 보여주는 바와 같이 기본적으로 불연속면상태가 불리한 경우와 완만한 역경사방향의 불연속면의 특성을 갖는 경우에 붕괴된 사례가 많은 것으로 분석되었다.

2.4 지하수 조건에 따른 터널붕괴

지하수조건에 따른 터널붕괴사례의 경우에 있어서는 그림 8과 9에서 보여주는 것과 같이 터널벽면을 타고 지하수가 유출되는 경우와 지하수비가 5~10인 경우에 터널이 붕

괴된 사례가 가장 많은 것으로 분석되었다. 여기서 지하수비는 $(H+Dz)/Hw$ 로 정의하며 H는 토피고, Dz는 터널높이, Hw는 지하수위를 의미하며 지하수위가 높을 수록 지하수비는 증가한다.

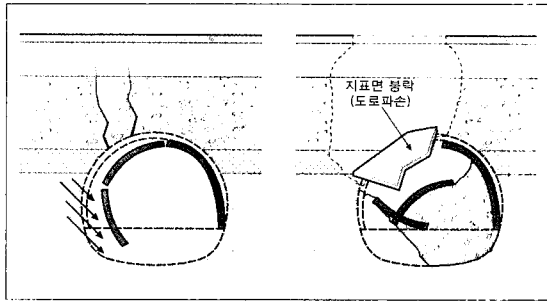
3. 터널 붕괴 유형 및 규모 분석

터널의 붕괴범위에 따라 붕괴특성을 분류하면 크게 터널 내부에서만 붕괴가 관측되는 경우와 지표면 상부까지 확대되는 경우로 구분할 수 있으며, 상대적으로 취약한 지반조건(지반강성이 작은 지반조건, 토피고가 얇은 지반조건, 지하수위가 높게 분포하는 지반조건 등)에서 터널의 붕괴로 인해 지표면 상부까지 붕괴가 확대되는 것으로 관측된다.

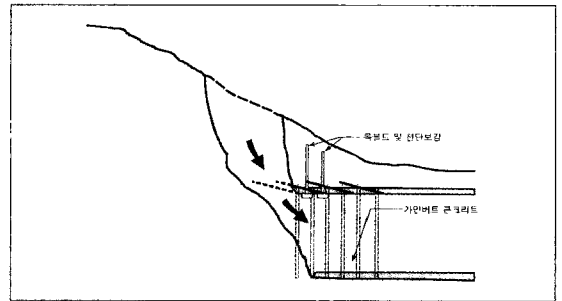
터널의 붕괴발생 위치에 따라 붕괴특성을 분류하면 그림 10과 같이 본선터널에서 붕괴가 발생하는 경우와 터널 갱구부에서 붕괴가 발생하는 경우로 구분할 수 있으며, 본선터널에서 발생하는 붕괴특성은 터널 내부에서만 붕괴가 관측되거나 붕괴범위가 확대되어 터널 주변지반까지도 영

향이 관측된다. 터널 갱구부에서 발생하는 붕괴특성은 주로 터널 갱구부의 토피도가 얇으므로 붕괴가 터널상부 주변지반까지 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타난다.

터널의 붕괴발생 시기에 따라 붕괴특성을 분류하면 그림 11에서 보여 주는 것과 같이 터널굴착 시기인 1차 지보재 타설 전 붕괴와 1차 지보재 타설 후 붕괴로 구분할 수 있

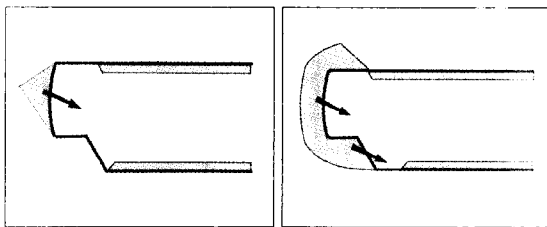


(a) 본선터널 붕괴특성

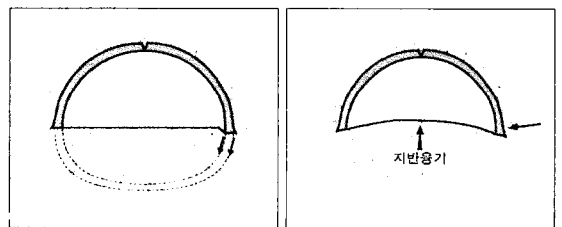


(b) 터널 갱구부 붕괴특성

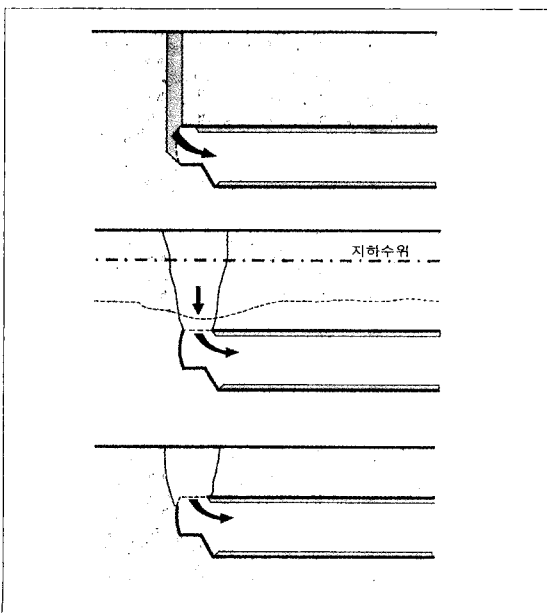
그림 10. 터널 붕괴발생 위치에 따른 분류



(a) 터널 막장 불안정

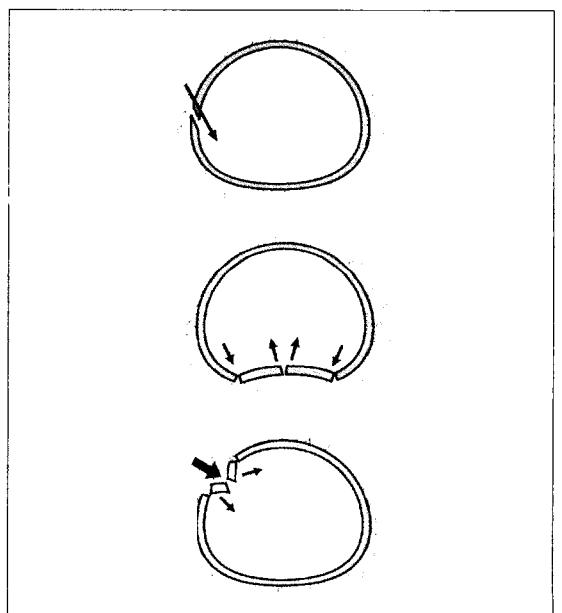


(a) 지보재 폐합 전 붕괴



(b) 터널 천장부와 상부지반 불안정

그림 11. 1차 지보재 타설 전 붕괴유형



(b) 지보재 폐합 후 붕괴

그림 12. 1차 지보재 타설 후 붕괴유형

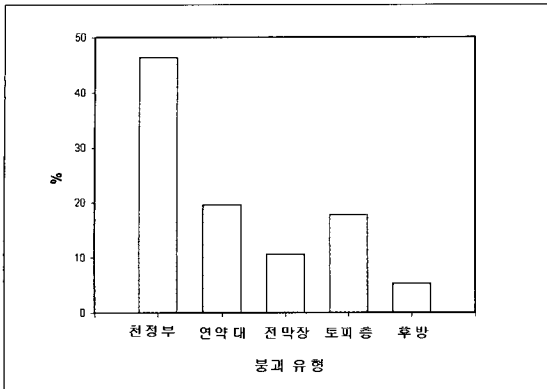


그림 13. 붕괴사례의 붕괴유형 현황

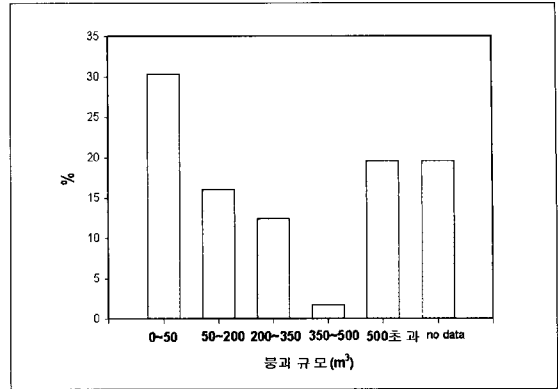


그림 14. 붕괴사례의 붕괴규모 현황

다. 1차 지보재 타설 전에 발생하는 붕괴는 주로 터널 막장면이 불안정하여 막장면의 붕괴가 발생하는 경우와 터널 천장부와 상부지반이 불안정하여 터널 천단부 붕괴가 발생하여 지표면까지 영향을 미치는 경우가 있다.

1차 지보재 타설 후에 발생하는 붕괴는 그림 12에서 보여주는 바와 같이 지보재 폐합 전에 발생하는 붕괴와 지보재 폐합 후에 발생하는 붕괴가 있다.

이와 같은 붕괴유형에 대하여 국내 붕괴된 터널 사례들을 분석하여 붕괴사례를 분류해 보면 그림 13과 같다. 굴착 직후 막장 천단부에서 썩기형태로 대형 암괴가 붕락되는 천장부 붕괴유형이 46.4%로 가장 많았고 국부적 연약대를 통해 지반이 토출되는 연약대 붕락 19.6%, 토비층 함몰 17.9%, 전막상 붕락 10.7% 순으로 파악되었다. 지보재 타설 후 붕괴가 일어나는 후방 붕락은 5.4%를 차지하고 있다.

또한 터널 붕괴규모에 대하여서는 낙반 크기나 배출된 토사량으로 정리하여 분석을 실시하였다. 분석된 결과를 정리하여 나타내면 그림 14와 같다. 그림 14에서 보여주는 것과 같이 50m³ 이하의 소형 붕괴가 많았지만 500m³ 이상의 초대형 붕괴사고도 빈번히 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 터널의 붕괴는 타 토목구조물에 비해 상당히 대규모로 발생하는 경우가 많으므로 상당한 복구비 및 공기 지연과 같은 막대한 손실이 뒤따른다. 따라서 사전 붕괴조짐 예측과 즉각적인 대처를 통한 안전 시공관리가 매우 중요하다 판단되었다.

4. 터널 붕괴 요소 분석

수집된 붕괴사고 현장에 대하여 암종별 현황을 보면 그림 15와 같이 분석할 수 있다. 그림 15에서 보여주는 바와 같이 많은 수의 붕괴사고가 변성암류에서 전체 사고사례의 71%를 차지하며 발생하였으며 그중 특히 편리가 심한 편마암 지역에서 붕괴가 지배적으로 발생하였음을 알 수 있다. 상대적으로 화성암류 암반에서는 전체 사고사례의 11% 정도로 비교적 안정된 굴착조건을 제공하고 있으며, 변성을 받지 않은 퇴적암류 암반조건도 전체의 18%를 차지하였으나 변성암류보다는 훨씬 안정된 터널시공 조건을 제공하는 것으로 분석되었다.

그림 16과 같이 붕괴사례의 발생 시점을 살펴보면 상반 굴착시 굴착과 함께 막장에서 다양한 유형으로 붕괴사고가 발생하는 사례가 전체의 69%로 가장 많았으며 굴착이 완료되고 슛크리트 타설이 완료된 후 슛크리트 파괴와 함께 붕괴로 이어지는 사례는 전체의 12% 정도로 상대적으로 붕괴사고 발생률이 적었다. 하지만 관통후 후방 붕괴가 발생하고 있으므로 일반적인 관통후 슛크리트 폐합이 이루어지면 붕괴에 매우 안전하다는 통념은 매우 위험하다. 따라서 관통 후에도 지속적인 계측을 통한 매우 세심한 현장관리가 필요한 것으로 판단되었다.

붕괴구간의 위치를 살펴보면 그림 17과 같이 갱구로부터 터널직경(D)의 5배정도 이내의 거리(L=5D)인 갱구부에서 전체 사고사례의 36% 정도가 발생하였다. 이는 갱구부

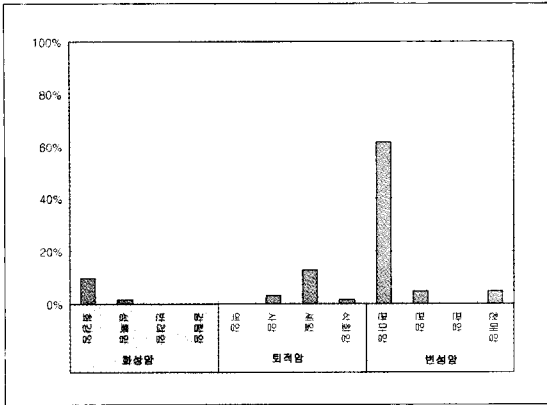


그림 15. 암종별 붕괴사례 분류현황

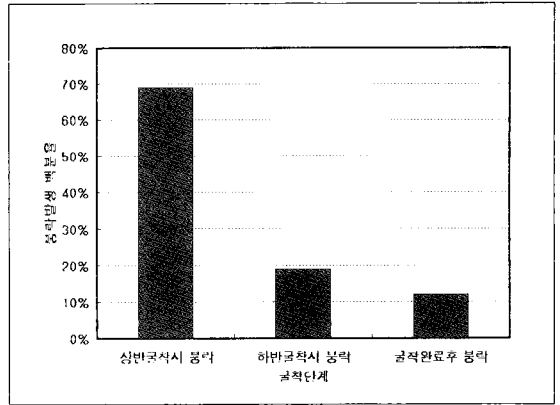


그림 16. 붕괴발생지점 현황

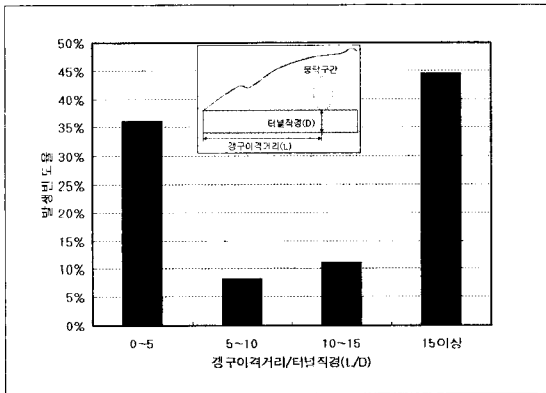


그림 17. 붕괴구간과 갱구와의 이격거리 현황

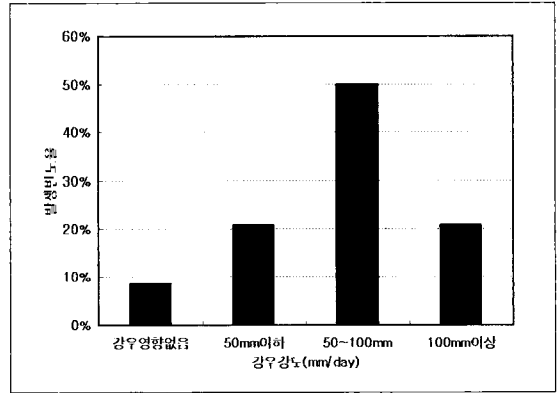


그림 18. 붕괴시점 전후의 강우 현황

가 상대적으로 지반조건이 매우 취약하며 상부 지형특성에 기인하여 편압 등 매우 불리한 3차원적 초기응력이 분포하고 있음에 기인한다. 따라서 보다 견실한 갱구부 처리와 터널시공 초기의 갱구부 굴진에 각별한 시공상의 주의가 필요한 것으로 분석되었다.

붕괴사고가 발생한 터널의 심도에 있어서는 전체 붕괴 사례 중 59%가 터널직경의 3배 이내인 비교적 저토피 구간에서 발생하였으며 수집된 10여개의 지표 함몰형 터널 붕괴사례 모두 직경의 6배 이내의 토피고 조건에서 발생하였다. 따라서 저토피의 도심지 터널에서 각별한 주의를 요하며 도심지의 산악터널에서도 저토피 구간인 계곡부에서 세심한 시공관리가 요구된다.

또한, 그림 18에서 보여주는 바와 같이 전체 붕괴사고사례 중 70% 이상이 붕괴시점 전후에서 50mm 이상의 강우

가 발생하였음을 감안할 때 도심지 토사터널 뿐만 아니라 산악터널에서도 정기적인 강우량 측정을 수행하고 시공관리에 활용하는 것이 매우 중요한 것으로 판단된다.

5. 터널 붕괴 위험도 평가에 대한 고찰

기존 터널설계는 지반조사에 의해 제공되는 지반정보를 기반으로 터널구간별 지반등급에 따라 지보패턴을 부여하는 방식으로 이루어진다. 지보패턴을 이용한 터널설계방식은 최종적으로 다양한 수치해석을 통한 터널 안정성에 대한 설계 적정성 평가를 수행하기는 하나 몇몇 대표 지반정수 및 터널의 기하학적 특성만을 고려해 수치해석적으로 평가되어지는 것이 일반적이다. 이를 통해 지반 굴착

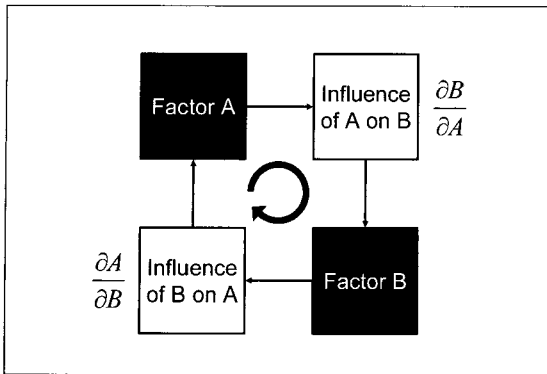


그림 19. 상관도 행렬 개념도(After Hudson,1992)

변위에 따른 지보재의 안전성을 검토하는 정도로 설계 적정성 검토를 수행한다.

종래 터널공법의 지보개념은 발생하는 중압에 대해서 이를 지지할 수 있는 강도의 지보설계 및 시공에 주요점을 두었다. 그러나 지보에 작용하는 중압은 지반조건이나 암반의 물성에 의하여 결정될 뿐만 아니라 시공되는 지보의 물성에 의해서도 변화하는데, 이러한 지보의 특성은 지보 재료의 강성, 강도를 비롯하여 지보의 형상, 설치시기, 암반과의 밀착정도 등에도 크게 영향을 받는다. 이외에도 붕괴된 터널사례 및 분석자료(박광준 & 이인근, 1993)에 의하면, 터널 붕괴는 지반의 불확실성에 기인한 국부적인 연약대 출현, 지하수 상태 및 막장관리 등 표준화된 구간별 지반등급만으로는 표현되기 어려운 지반상태와 시시각각 현상변화에 의해 변화하는 시공조건에 대해서도 크게 영향을 받는다.

Hudson(1992)은 다양한 지반공학적인 문제에 대해 영향을 미치는 인자들로부터 상호 민감도를 파악하여 공학자의 객관적인 공학적인 판단을 지원하기 위한 체계적인 방법론을 제시하였다. 상관도 행렬(interaction matrix)개념을 도입하여 그림 19와 같이 각 영향인자들의 복합 상관도를 표현할 수 있도록 하였으며, 사건의 원인(cause)과 결과(effect)의 논리화에 관심 문제에 대한 각 인자들의 가중치를 결정할 수 있는 논리체계도 제시하였다.

이러한 상관도 행렬개념은 다양한 지반공학문제에 적용되어 왔다. Cencioli & Crosta (1993)는 암반사면의 붕괴 위험도를 정량적으로 산정하기 위하여 사면붕괴에 영향을

미치는 인자들을 선정하고 점수화할 수 있는 현장평가표를 작성하였으며, Hudson(1992)에 의해 제안된 상관도 행렬 및 가중치 산정체계를 적용하여 붕괴도 평가를 정량적으로 수행한 바 있다. 이어 동일한 개념 및 가중치 산정체계는 암반의 발파효율 평가(Latham & Lu, 1999), 지하양수 발전소 부지선정을 위한 적합성 평가(Shang et al, 2000), TBM 터널에서의 TBM 운용효율성 평가(Benardos & Kaliampakos, 2004)와 고속도로상에서의 낙석 위험도에 대한 평가(Zhang et al, 2004) 등에 지반조건을 고려한 위험도 평가에 적용된 바 있다. 이러한 상관도 행렬을 활용한 기존 연구는 공통적으로 핵심인 상관도 행렬 구성요소의 수치값(민감도값)이 전문가에 의해 인위적으로 결정되기 때문에, 산정되는 각 영향인자들의 가중치값 및 지수값의 객관성에 대한 문제가 제기될 수 있다.

또한, 국내외적으로 터널설계(안)는 상가에서 언급된 국부적인 지반변화 조건 및 가능한 취약 시공조건에 대해 검토하고 평가할 수 있는 방안을 보고한 바 없다. 나아가 시공 중 다변하는 막장상태와 시공조건을 조사하여 터널 붕괴에 대한 막장 위험도 수준을 매 굴진장마다 평가하면서 막장관리를 수행할 수 있는 공학적 평가기법도 존재하지 않는다.

따라서 금번 터널기술위원회에서는 앞서 언급된 상관도 행렬개념과 각 인자의 가중치를 산정하는 체계를 기반으로 터널 위험도 지수(Tunnel Hazard Index)라는 새로운 평가체계를 소개하고자 한다. 또한 기존 적용사례에서는 상관도 행렬을 구성하는 각 행렬항(matrix elements)들을 전문가의 경험을 기초하여 인위적으로 결정함에 따른 문제점이 있기 때문에 국가별 기존 붕괴 터널현장 자료를 분석하여 각 인자간의 민감도를 의미하는 상관도 행렬의 각 항들을 객관적으로 결정할 수 있도록 하는 것이 합리적이라고 판단된다.

이에 대하여 김상환 외(2007)는 Benardos (2004)가 제안한 터널의 안정성에 영향을 미치는 대표적인 주요 인자들 (RQD, 풍화도, RMR, 일축압축강도, 토피고, 지하수위 및 투수계수 등) 이외에 수정안정계수 (Modified Stability Number, MSN)라는 요소를 추가시켜 지하구조물(터널) 설계시 적용할 수 있는 간편위험도지수(Underground Risk Index, URI)에 대한 산정 및 평가기법에 대하여 제안

표 2. URI의 범주

낮은 URI (I)		중간 URI (II)		높은 URI (III)	
I a	I b	II a	II b	III a	III b
0		33		66	
100		100		100	
매우적음	적음	보통	보통이상	위험	매우 위험

하였다.

URI는 Benardos (2004)의 제안과 동일하게 표 2에 나타낸 바와 같이 0~100의 백분율로 표현이 되며 양호한 조건 (URI가 낮음)에서 리스크가 많은 불량한 조건 (URI 높음)으로 구분 평가할 수 있다. 이를 3개의 범주로 분류한다면 0~33, 33~66, 66~100의 범주로 나눌 수 있다.

결국 위와 같은 위험도 예측기법을 따라서 URI 평가를 수행하게 되면 특정 구간의 위험도를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 여러 방면의 리스크를 사전에 예측·대책 수립을 할 수 있을 것이다.

이러한 제안된 간편 위험도 지수 URI를 이용하여 사례 연구를 통하여 터널굴진속도가 터널붕괴위험도에 어떠한 영향이 있는지 상관관계를 분석하였다. 그 결과에 의하면 그림 20과 같이 위험도가 높을수록 즉 URI 값과 터널굴진속도와의 반비례함을 알 수 있었다. 이러한 간편 위험도 분석을 통하여 사전에 터널시공기간예측 등에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 제안하였다.

최근에는 배규진 외(2007)는 국내현장에서 수집된 52개 현장의 붕괴/붕락 사례자료를 기반으로 통계분석을 실시하고 이를 근거로 새로운 터널위험도지수(KICT Tunnel

Hazard Index, KTH index)를 제시하였다.

새롭게 제시한 터널위험도지수에 대한 산정 및 평가방법에 대하여 소개하면 다음과 같다.

국내 터널 붕괴/붕락 사례 DB에 설정되어 있는 13개의 영향인자에 대하여 각 인자별로 3~5개 정도의 등급으로 표현할 수 있도록 분류표를 작성하였다(한국건설기술연구원, 2005). 여기서, 영향인자는 크게 (1) 기하학적인 특성, (2) 지하수 상태, (3) 막장지반 특성, (4) 불연속면 특성, (5) 시공조건인 5개로 분류하였다. 첫 번째 항목인 '기하학적인 특성'은 (1-1) 터널 단면적과 (1-2) 터널심도로 세분하였다. 두 번째 항목인 '지하수 상태'는 (2-1) 지하수위와 (2-2) 용수상태로 세분화 하였으며, 세 번째 항목인 '막장지반 특성'은 (3-1) 막장지반등급, (3-2) 막장 암석종류, (3-3) 연약대 존재 및 종류로 세분하였다. 네 번째 분류항목인 '불연속면 특성'은 (4-1) 절리군수, (4-2) 절리군방향성, (4-3) 절리면 상태와 같이 3개로 세분화 하였다. 마지막으로 다섯 번째 항목인 '시공조건'은 (5-1) 굴착방법, (5-2) 굴착방식, (5-3) 보조공법으로 세분화하여 표현하였다.

이상과 같이 분류된 총 13개의 분류항목별로 3에서 5등급으로 터널붕괴에 취약한 정도를 표현하도록 분류기준을 마련하였다. 마련된 분류기준은 보유한 터널 붕괴/붕락 사례 DB에서 각 항목에 대해 유효한 값의 최대값과 최소값을 기준으로 일정간격으로 나누어 설정하였다.

상기 언급된 터널 붕괴/붕락 영향인자 분류 및 등급표를 활용하여 총 52개의 붕괴현장 자료를 재구성하였다. 재구

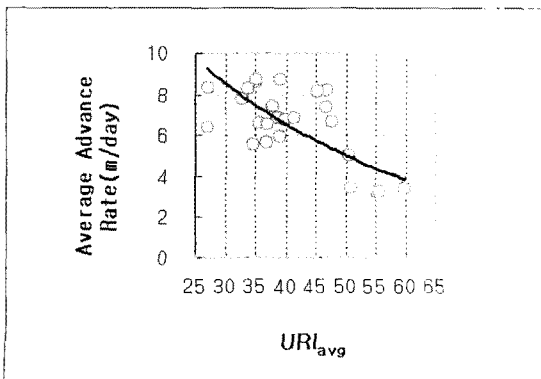


그림 20. URI와 터널굴진속도와의 상관관계

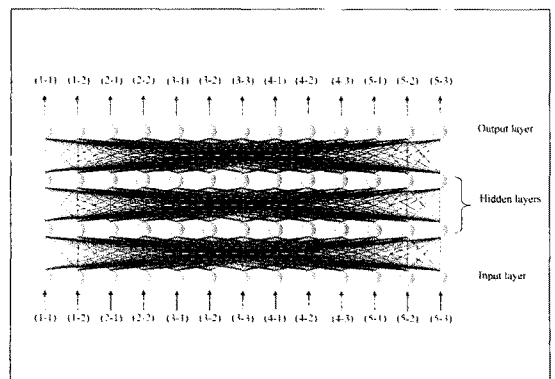


그림 21. 학습에 사용된 인공신경망 구조

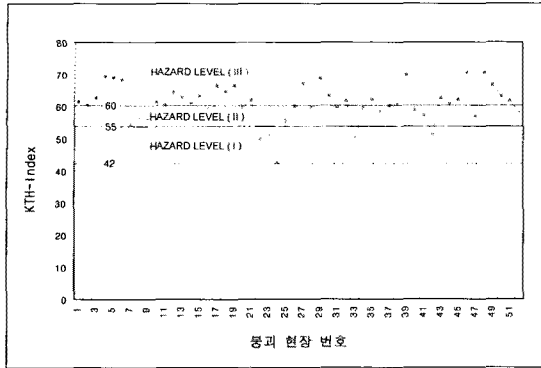


그림 22. KTH index 평가도표

성된 자료는 코드화되어 한국건설기술연구원(2005)에서 개발한 인공지능망 학습엔진을 이용해 학습되었다. 학습을 위해 설계된 인공지능망의 입력층과 출력층의 형태와 은닉층의 구성은 그림 21과 같다.

평가방법으로 평가도표의 작성은 적용된 52개의 붕괴터널현장에 대한 KTH index값을 재 산정하고, 이들 값의 분포를 고려하여 총 4개의 위험도 등급(안정수준과 위험수준 I - III 등급)으로 구간을 구분하였다. 평가도표 작성에 적용된 현장은 모두 붕괴된 현장이다. 각 현장에 대해 산정된 위험도 지수값은 위험수준으로 평가될 수 있는 수치라 판단할 수 있다. 총 52개 붕괴현장의 KTH index값 분포에서 위험수준 I은 하위값 10%의 붕괴터널 현장이 포함된 구간, 위험수준 II는 30% 그리고 위험수준 III은 나머지 60%의 붕괴터널 현장이 분포되어 있는 구간으로 구분하였다. 작성된 KTH index에 대한 평가도표는 그림 22와 같다.

상기 결과에 의하면 KTH index값 범위가 42이하의 안정수준으로 판단할 수 있으며, 42~55 구간은 위험수준 I(Hazard Level I), 55~60까지는 위험수준 II(Hazard Level II), 60 이상은 위험수준 III(Hazard Level III)으로 평가할 수 있다. 개략적으로 위험수준 I은 잠재붕괴 규모를 50m³이하의 소규모 낙반정도 수준인 것으로 평가되며, 위험수준 II는 50m³~500m³, 위험수준 III은 500m³이상정도 수준의 규모로 평가될 수 있으나, 현장적용을 통한 보다 체계적인 위험수준별 잠재붕괴규모 및 예상현상 파악을 위한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김상환, 이충환 (2007), "터널 리스크 평가 기법의 적용성에 대한 연구", 한국터널공학회논문집, 제9권, 1호, pp.1-12
2. 박광준, 이인근 (1993), "도심지 지하철 터널의 붕괴유형과 원인", 지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 41-48.
3. 배규진, 신휴성 (2007), "터널붕괴 위험도(KTH)지수 및 평가도표 개발", 토목학회논문집
4. 한국건설기술연구원 (2005), "터널공사 재해 최소화 및 예방 기술 개발 (III)", 연구보고서, 건기연:2005-088, 한국건설기술연구원.
5. Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C. (2004), "A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling—illustrated by the Athens", Metro, Greece, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 41, pp. 987-999.
5. Cancelli, A., Crosta, G. (1993), "Hazard and risk assessment in rockfall prone areasp: Chapter 15-Risk and Reliability in Ground Engineering", Proceedings of the conference organised by the Institute of Civil Engineers(ICE), London, 11-12 November, pp. 177-190.
6. Hudson, J.A. (1992), "Rock Engineering Systems: Theory and Practice", p. 185, Horwood, Chicester.
7. Latham, J.-P., Lu, P. (1999), "Development of an assessment system for the blastability of rock masses", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 36, pp. 41-55.
8. Shang, Y.J., Wang, S.J., Li, G.C., Yang, Z.F. (2000), "Retrospective case example using a comprehensive suitability index(CSI) for siting the Shisan-Ling power station", China, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 37, pp. 839-853.
9. Zhang, L.Q., Yang, Z.F., Liao, Q.L., Chen, J. (2004), "An application of the rock engineering systems(RES) methodology in rockfall hazard assessment on the Chengdu-Lhasa highway", China, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Paper 3B11-SINOROCK2004 Symposium, Vo. 41, No. 3, CD-ROM.