



# 터널의 방재설계 및 정량적 위험도평가

## Tunnel Safety Design and Quantitative Risk Assessment

나옥빈 Ok-Pin Na  
현대건설 연구개발본부 과장

조윤구 Yun-Gu Cho  
현대건설 연구개발본부 부장

### 1. 머리말

최근 전 국토의 절반 이상이 산지로 구성되어 있는 지형특성 때문에 교통량이 증가하고 사용자 통행시간의 가치가 증가됨에 따라서 신설 교통망 건설시에 장대터널과 지하구조물의 수요가 증가되고 있다. 터널 구조물은 지중에 시공되어 있으므로 폐쇄적 공간에서 발생하는 화재는 진압, 대피 등이 어려워서 대형 인명피해와 재산의 손실, 장시간의 사회적 비용을 초래하게 된다.

전 세계적으로 1866년 이후 터널내 사고는 29개국에서 177회 발생하였고, 1949년부터 2008년 사이에 700명 이상이 사망, 1,000명 이상이 부상, 500대 이상의 차량이 손실을 보았으며, 경제적 손실은 1조 4천억원에 이른다. 최근 10년 동안 발생했던 전 세계의 터널화재 중 영국과 프랑스를 잇는 유로터널(Euro tunnel)과 이탈리아의 몽블랑터널(Mont-Blanc tunnel)에서 발생한 사고의 경제적 손실만도 약 8천억 이상이다<sup>1)</sup>. 이러한 막대한 사회적 비용을 최소화하기 위해서 터널내 구조물의 내화설계뿐만 아니라 화재진화 및 화재성장 억제, 연기확산차단 및 배출, 사용자에게 대한 피난대책등 대형사고를 막기 위한 방재대책기술들이 적용되고 있다.

본 논고에서는 이러한 방재대책으로 도로터널과 철도터널에 적용되는 방재설계기준과 이를 위한 안전성평가방법에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

### 2. 국내 방재설계 규정

국내에서는 2003년 대구지하철 화재이후 터널방재에 대한 인식이 시작되었다. 국토해양부에서는 2004년도에 ‘도로터널 방재시설 설치 지침’을 제정하여 수행하였으며, 2009년에는 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침’이 공포되었다. 이 설치지침은 터널연장 기준등급과 교통량 등의 터널 제반위험인자를 고려한 위험도지수 기준등급으로 구분하여 방재시설을 도시 및 지역에 따라 설치하도록 되어 있다<sup>2)</sup>.

철도터널의 경우 2005년 10월에 ‘철도시설 안전기준에 관한 규칙’과 2006년 9월에는 ‘철도시설안전세부기준’을 고시하여 연장 1km 이상의 모든 신규터널에 안전성 분석을 수행하여 방재계획을 수립하도록 하였다. 터널 화재안전설계에 있어서 분석방법으로는 실험이나 전산유체해석(Computational fluid dynamic analysis)을 적용하였으나 연기확산만 예측하여 평가함으로써 피난객의 위험도는 논리적으로 평가되지 않은 문제가 있었으며, 이

를 위해서 정량적 위험도 분석(Quantitative Risk Analysis)을 수행하도록 하고 있다<sup>3,4)</sup>.

### 3. 정량적 위험도 평가

#### 3.1 위험(risk)

위험은 다음 <표 1>에서와 같이 개인적 위험과 사회적 위험으로 나눌 수 있으며, 동일한 위험에 있어서 개인적 위험은 동일하나 피해규모와 사고 크기를 반영한 사회적 위험은 다를 수 있다. 따라서 위험도는 사고발생 확률과 사고 발생 피해의 곱으로 설명할 수 있으며, 이는 정량화된 수치로 나타낼 수 있으므로 막대한 사회적 피해를 방지하기 위한 터널의 방재설계에 있어서는 유용하게 활용될 수 있다<sup>5)</sup>.

#### 3.2 위험도 평가(risk assessment)

위험도 평가는 터널의 위험도를 정량적으로 분석하

표 1. 개인적 위험과 사회적 위험의 개념

구분	개인적 위험 (individual risk; IR)	사회적 위험 (societal risk; SR)
내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>위험의 판단을 개인을 기준으로 설정</li> <li>위험의 크기를 단일수치로 표현</li> <li>인원수에 대한 가중적용에 한계</li> <li>위험 A, B의 크기가 같을 때, <math>IR_A=IR_B</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>사고크기와 피해규모가 동시에 적용</li> <li>개인적 위험보다 포괄적인 위험 반영</li> <li>동일 위험 A, B에 대해서, <math>SR_A &lt; SR_B</math></li> </ul>
개념도		

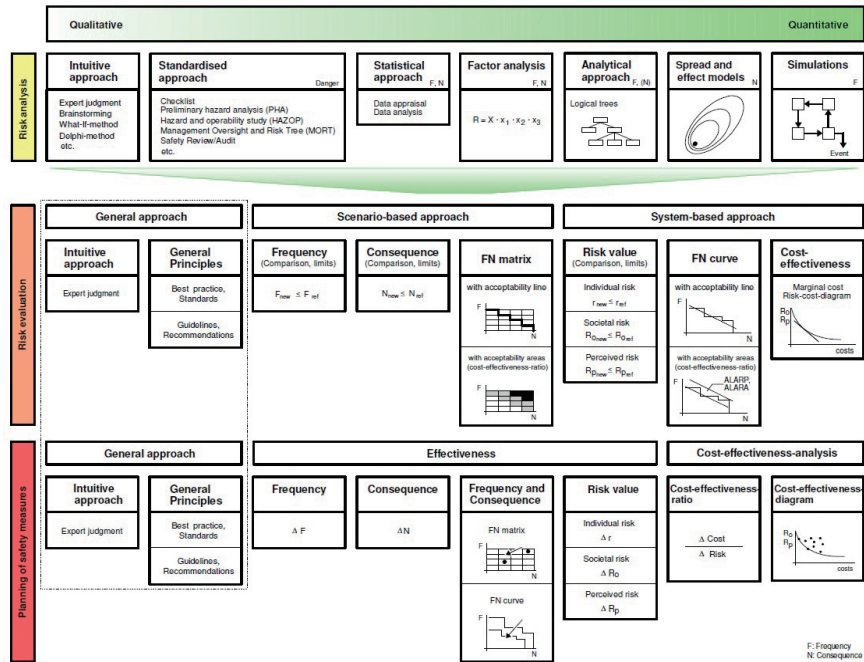


그림 1. 위험도 평가의 방법론적 개념도

고 수치화함으로써 방재시설의 설치 또는 적정성 여부를 판단하기 위한 기준을 제시하여 방재시설에 대한 성능설계를 수행하기 위해 사용된다. 위험도에 대한 평가수행은 시나리오별 사상자수(fatalities) 및 이에 대한 누적빈도(frequency)에 대한 분석 후 사회적 평가기준에 의해서 그 안전목표를 판단한 후 최종 설계를 완료한다. 세계도로협회(World Road Association PIARC)는 위험도평가의 방법론(Methodology)은 <그림 1>과 같이 정리하였으며, 수행절차는 <그림 2>와 같이 제안하고 있다.

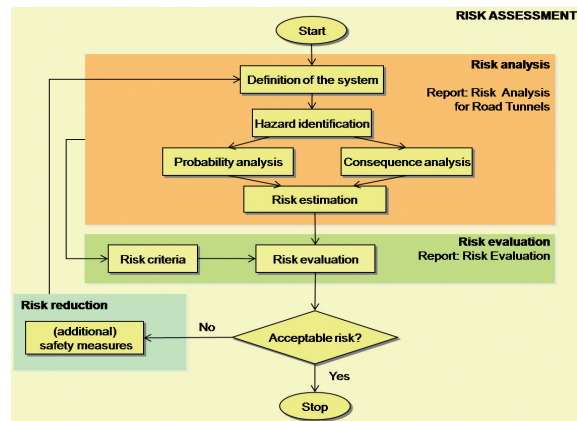


그림 2. 위험도 평가 절차

위험도 평가는 크게 위험도 해석(risk analysis), 위험도 분석(risk evaluation), 그리고 위험도 저감(risk reduction) 등의 3가지 세부요소로 구성되어 있다<sup>6,7)</sup>. 위험도 해석은 터널내에서 잠재적 화재사고에 대한 순서나 관계에 대한 체계적인 분석을 하고, 방재 시설계획에 있어서 부족한 점과 개선방향을 찾아내는 과정이며, 위험도분석은 평가된 위험도가 수용가능한지를 판단하는 과정이다. 만약 분석된 위험도가 수용될 수 없다면, 추가적인 방재안전설비를 설치하여 위험도를 저감시키는 과정을 거쳐야 한다<sup>7)</sup>. 최근에는 이러한 위험도평가를 고속철도의 방재설계에 적용하였다(그림 3)<sup>3)</sup>.

위험도 해석의 방법은 적절한 사건의 시나리오들을 정의하고 각각의 확률을 예측하여 위험도를 평가하는 시나리오적 접근법과 터널 방재시스템내에서 모든 발생사건들이 이용자에게 미치는 위험도를 평가하여 터널 전체시스템에 대한 위험도를 평가하는 시스템적 접근법이 있다<sup>7)</sup>.

터널내에서 발생가능한 시나리오 작성시에는 화재 사고 발생률, 차종별 화재강도 및 사고발생률, 화재확산 빈도예측, 발생위치, 피난객의 탈출 가능성 등을 고려하여 작성해야 한다. 특히, 피난객은 다양한 위험요소에 노출되며, 피난시에는 화염과 유독가스 등에 의한 신체능력 저하, 연기에 의한 가시도 저하, 피난유도 표지판, 제연용 환기시설 등에 의해서 피난활동이 제약 받는다. 터널내에서 발생한 화재성상은 터널 구조적 특성과 방재시설 및 피난객의 행동특성을 고려하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 모사할 수 있으며, 피난시 흡입되는 유독가스에 대한 유효복용분량을 적용하여 누적되는 열, 유독가스 등을 수치화하여 사망자수를 예측할 수 있다<sup>4)</sup>. 여러 사고 시나리오에서 산

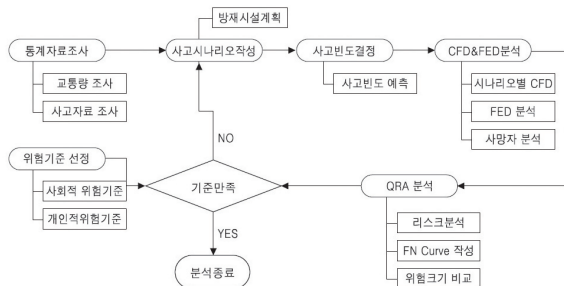


그림 3. 호남고속철도 정량적 위험도평가 절차

출된 사고발생확률과 사고결과를 일괄적으로 계산하여 사회적 위험기준인 확률빈도-사망자 곡선을 통하여 위험도를 평가한다. 일반적으로 적용하고 있는 사회적 위험도 기준은 <그림 4>와 같으며, X축은 사건의 결과인 사망자수, Y축에는 사건발생빈도를 누적으로 표현한다. 평가기준은 크게 사회적으로 받아들일 수 없는 high level 기준, 받아들일 수 있는 low level, 그리고 그 중간영역인 ALARP(As Low As Reasonable Practicable) 영역으로 나뉜다.

국내에서는 영국 HSE를 기준(1명 사망확률 : 10<sup>-1</sup> ~ 10<sup>-4</sup>, 1,000명 사망확률 : 10<sup>-4</sup> ~ 10<sup>-7</sup>)으로 삼고 있으며, 최근에는 홍콩, 네덜란드 등의 기준 등도 비교 검토 되고 있다<sup>3,8)</sup>.

### 3.3 방재시스템 관리

정량적 위험도평가를 실시하여 터널내 방재 시설물들을 설계한후 이 시설물들을 전체적으로 통합하여 방재시스템으로 운영하고 관리해야 한다. 터널내 사고비율은 낮으나 터널은 일반구간과 달리 폐쇄형 공간으로서 사고 및 돌발 상황 발생시 대피장소가 협소하고 2차사고 등으로 이어지고 화재와 함께 발생한 연기, 유독가스로 인한 인명피해가 지속적으로 증가할 수 있다. 따라서 터널관리 주체에서는 터널내의 다양한 방재시설물을 효율적으로 관리하고 내부상황을 실시간으로 모니터링하고 있지만 1명의 운영자가 동시에 많은 상황을 감시하기는 힘들며(1인당 평균 CCTV 64대 감시), 터널내 유고상황 발생시 신속한 대응이 어렵다<sup>9)</sup>.

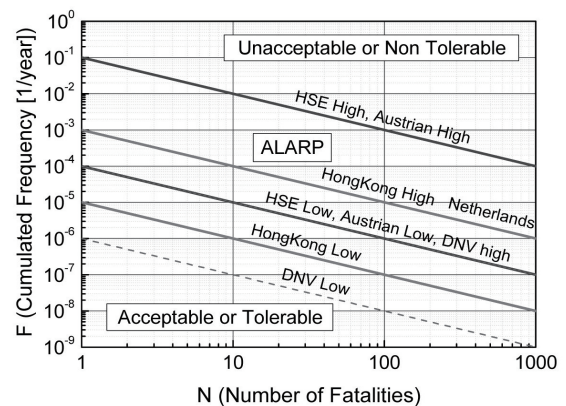


그림 4. 각국의 사회적 위험도 평가기준 비교

이러한 터널내 환기시설, 교통관련 시설, 방재시설 등을 효과적으로 유지관리하기 위해서 TGMS(Tunnel Group Management System)이나 FTMS(Freeway Traffic Management System)등의 통합관리시스템을 구축하고, 지능형 교통시스템(ITS)과 연계하여 사용자에게 최적의 교통서비스를 제공하고 있다. 더불어 2010년부터 터널내 영상유고감지시스템(그림 5)을 도입하여 중부내륙의 11개 터널에 운영중에 있으며, 터널 이용자에게 터널내 상황을 미리 알려주어 터널내에서 안전하게 대처할 수 있도록 하고 있다.

#### 4. 맺음말

본 논고에서는 국내 방재설계지침과 이에 따른 정량적 위험도 분석에 대해서 간략히 알아보았으며, 이를 통해 설계된 방재시설물의 향후 관리방향에 대해 기술하였다. 터널 방재기준은 지속적으로 강화되고 있으며, 이를 만족시킬 방재시설도 합리적으로 관리되고 유지보수가 되어야 할 것으로 판단된다. 터널의 신뢰성 있는 위험도 평가를 위해서 폭넓은 사고통계자료, 화재성상, 국내에 적합한 사회적 위험기준 등의 자료를 지속적으로 축적된다면 방재설계시 더 유효하고 경제적인 방재시설 설치기준을 제시할 수 있을 것이다. 또한, 방재시설물의 첨단화로 인하여 ITS와 연계한 통합관리시스템을 구축하여 운영한다면 터널내 화재발생시 유관기관과 신속하고 유기적으로 대처할 수 있으며

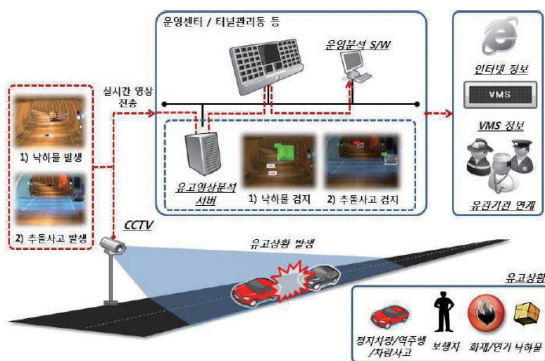


그림 5. 터널영상유고감지시스템 개념<sup>9)</sup>

원활한 소방 활동으로 인해서 유사시 더 안전하게 많은 인명을 대피시킬 수 있을 것으로 기대된다.

담당 편집위원 : 류동우(대진대학교) dwryu@daejin.ac.kr

#### 참고문헌

1. SCOR Global P&C, Fire protection in tunnels: Focus on road and train tunnels, 2014.
2. 윤성욱, 김효규, 김도학, 윤일병, 국내 도로터널의 방재 시설 설치지침 동향, 대한토목학회, Vol. 59, No. 1, 2009, pp. 57 ~ 67.
3. 문연오, 석진호, 김기림, 김선홍, 안병재, 유호식, 고속철도 터널의 방재설계-호남고속철도 사례중심으로, 유신기술회보, Vol. 15, 2008, pp. 220 ~ 237.
4. 이호석, QRA 기법을 통한 철도터널 방재설계, 한국설비기술협회, Vol. 25, No. 10, 2008, pp. 72 ~ 78.
5. S.N. Jonkman, J.K. Vrijling, P.H.A. J.M. van Gelder, 'A generalized approach for risk quantification and the relationship between individual and societal risk', Safety and Reliability for Managing Risk, 2006, pp. 1,051 ~ 1,059.
6. PIARC Technical Committee, 'Risk Analysis for Road Tunnel', Technical Report, 2006.
7. PIARC Technical Committee, 'Risk Evaluation', Technical Report, 2010.
8. 유지오, 철도터널 방재기준 및 정량적 위험도평가, 한국방재학회지, Vol. 13, No. 49, 2012, pp. 24 ~ 42.
9. 한국도로공사, '터널 영상유고감지시스템 성능평가방법 구축 및 확대적용 방안 연구', 연구보고서, 2013.



**나옥빈 과장**은 미국 콜로라도주립대학에서 콘크리트 내구성 실험 및 수치해석에 관한 연구로 박사학위를 취득하고, 2013년부터 현대건설 연구개발본부에서 재직하고 있다. 주 관심 연구분야는 콘크리트의 고내구성 및 내화분야이며 현재 다수의 국내외 건설프로젝트 업무를 담당하고 있다.  
okpin.na@hdec.co.kr



**조윤구 부장**은 서울대학교 토목공학에서 박사학위를 취득하고, 1998년부터 현재까지 현대건설 연구개발본부에서 재직하고 있다. 주 관심 연구분야는 콘크리트 재료, 특히 슬래그 활성화 분야와 내구성분야이며 현재 다수의 국내외 건설 프로젝트의 콘크리트 재료분야 총괄업무를 담당하고 있으며, 우리학회 매스콘크리트위원회에 위원으로 참여하고 있다.  
yungu.cho@hdec.co.kr