

장대 철도터널에서의 방재 안전성 평가에 관한 연구

김영근^{1*}, 김동현²

A study on the estimation of safety in long railway tunnel

Young-Geun Kim, Dong-Hyun Kim

Abstract Recently, as the construction of new railway and the relocation of existing line increase, tunnel structures get longer. The railway fire accidents in long tunnel bring large damages of human life and disaster. The interest on safety in long tunnel has been growing and the safety standard for long tunnels is tightening. For that reason, at the planning stage of a long tunnel, the optimum design of safety facility for minimizing the risks and satisfying the safety standard is required. For the reasonable design of a long railway tunnel considering high safety, qualitative estimation for tunnel safety is required. In this study, QRA (Quantitative Risk Analysis) technique is applied to design of a long railway tunnel for assuring the safety function and estimating the risk of safety. The case study for safety design was carried out to verify the QRA technique for two railway tunnels.

Keywords: Long tunnel, safety, QRA, risk estimation

요 지 최근 새로운 철도를 건설하거나 기존선로를 개량하기 위하여 터널의 건설이 급속히 증가하고 있으며, 점점 장대화되고 있는 실정이다. 그러나 터널이 장대화됨에 따라 터널내에서의 화재사고 발생시 치명적인 대형사고의 가능성이 증대되고 있어, 장대터널에서의 안전성에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 이유로 터널내 위험도를 최소화하고 터널방재기준을 만족시킬 수 있는 터널내 방재시설에 대한 최적의 설계기준이 요구되고 있으며, 장대 철도터널의 합리적인 설계를 위하여 터널 방재 안전성에 대한 정량적인 평가방법이 필요하다 할 수 있다. 본 연구에서는 정량적 위험도 분석방법인 QRA 기법을 장대터널에서의 방재 안전성 평가에 적용하여 그 유효성을 검토하고자 하였다. 적용사례에서는 장대터널에서의 갱외탈출로 개념의 사갱 및 수직구 계획을 수립하기 위하여 각각의 경우에 대한 QRA분석을 실시하고, 장대터널의 방재 안정성을 평가함으로써 실행 가능한 합리적인 수준의 터널 방재설계를 수행하고자 하였다.

주요어: 장대터널, 방재 안전성, 정량적 위험도 분석, 위험도 평가

1. 서 론

철도가 새롭게 계획되거나 선형개량공사가 증가함에 따라 터널 구조물의 건설이 증가되고 있으며, 특히 산악 구간을 통과하는 경우 터널이 더욱 장대화되고 있으며 이를 장대터널(long tunnel)이라고 한다. 국내 터널설계 기준에서는 1 km 이상을 장대터널, 5 km 이상인 경우는 초장대 터널로 규정한 바 있으며, 국제터널협회(ITA)의 기술위원회에서는 5 km 이상의 터널을 장대터널로, 심도 300 m 이상을 심층터널로 규정하고 있다.

그러나 터널이 장대화됨에 따라 터널내 열차화재 등이 발생하는 경우 장대터널의 특성으로 인하여 대형 사고를 초래할 수 있으므로 최근 철도터널에서의 방재문제에 대

한 관심이 증가하고 있으며, 이에 따른 터널 방재기준도 더욱 강화되고 있는 실정이다(ISO/TS 13571, 2002). 따라서 터널 계획시 화재사고 발생시 인명피해를 방지하고 최소화하기 위한 다각적인 노력이 필요하며, 특히 최근 개정된 터널 방재기준을 만족하면서 위험도를 최소화할 수 있는 최적 방재시설물 계획이 요구되고 있다.

이와 같이 합리적인 장대터널 방재 설계를 위해서는 열차사고 통계분석 및 피난시물레이션을 기초로 한 보다 객관적이며, 정량적인 평가가 필요하다 할 수 있으며, 이를 위해서 본 연구에서는 정량적 위험도 분석기법인 QRA(Quantitative Risk Analysis)를 철도터널에서의 방재설계에 적용하고자 하였다.

대상터널은 연장 약 4.1 km의 산악구간에서의 장대 철도터널과 연장 약 3.6 km인 도심지 지역에서의 장대 철도터널로서 두 터널 모두 철도터널 관련 방재기준보다 향상된 터널방재성능이 요구되어, 도시지역 안전기

¹중신회원, 삼성물산(주) 건설부문, 토목엔지니어 부장

²정회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀 책임연구원

*교신저자: 김영근 (babokyg@hanmail.net)

준에 만족하는 합리적인 터널내 방재구조물 계획을 수립하기 위하여 정량적 위험도분석을 실시하였다.

장대터널에서의 갱외탈출로 개념의 사갱 및 수직구 계획을 수립하기 위하여 각각의 경우에 대한 QRA분석을 실시하고, 장대터널의 방재 안정성을 평가하므로써 실행가능한 합리적인 수준의 터널 방재설계를 수행하고자 하였다.

2. 철도터널 안전 및 방재기준

국토의 70%가 산악지형으로 이루어진 우리나라는 지형적 특징으로 인해 도로 및 철도터널의 건설이 꾸준히 증가하고 있다. 철도분야의 경우는 2020년까지 전국에 걸친 노선개발사업을 추진 중이며, 현재 진행되고 있는 3단계 개발 사업과 향후 진행될 4단계 개발 사업은 산악지역이 발달한 강원도 지역과 영남내륙에 집중되어 있다.

철도노선은 평면 및 종단 선형 조건이 엄격하고, 주변 교통체계(도로)와 상호 연관이 되지 않아 정거장구간을 제외한 일반노선구간에서 민원발생요인 크다. 따라서 이와 같은 철도노선의 특성과 최근 주변 자연환경 훼손 최소화를 위한 환경 친화적 건설 정책으로 산악 철도터널건설이 급증할 것으로 예상되며 장대터널의 비중도 급속히 증가할 전망이다.

장대 터널의 증가추세에 따라 터널의 환기·방재의 중

요성이 대두되고 있으며, 특히 터널 내 방재안전기준이 정립되지 않아 설계단계에서 많은 문제점 등이 제기되고 있으며 향후 더욱 심각해질 것으로 예상된다.

국내 철도터널 방재기준은 장대터널의 증가, 환기 및 방재 시스템의 다양화 및 복잡화, 관련 사회적 여건의 변화 등을 반영하지 못하고 최소안전기준을 제시하는 수준이다. 현재 발행된 철도설계기준(노반편)과 방재시설 설치기준(안)은 최소한의 안전기준 및 5 km 이상의 산악터널에 대한 기준만을 언급하므로 중소규모 터널에 대한 안전기준은 마련되지 않은 실정이다.

따라서, 터널안전에 관한 사회적 요구를 충족하기 위하여 철도터널 안전기준을 마련 중이며, 터널연장에 따른 방재안전시설과 안정성분석을 통한 터널방재안전설계를 주요내용으로 하고 있다. Table 1에는 철도터널에서의 국내외 주요 방재기준을 나타내었다.

3. 정량적 위험도 분석(QRA)

장대터널에 대한 방재 안전기준이 강화됨에 따라 방재기준을 만족하면서 최적의 안전을 확보할 수 있는 방재시설물에 대한 기술적인 검토가 요구되고 있다. 이러한 목적으로 달성하기 위하여 정량적 위험도분석(QRA) 기법이 도입되고 있다(김원국, 2003; 전덕찬, 2004).

QRA기법은 화공플랜트 및 원자력발전소에 대한 위험

Table 1. Safety standards for railway tunnel

구 분	방 재 기 준	발 행 기 관	발행 년도	주 요 내 용
국 내 기 준	철도 설계기준 (노반편: 방재시설)	한국철도 시설공단	2004. 12	원활한 대피·구조 활동을 위한 최소기준 제시
	철도터널 방재시설 설치기준(안)	한국철도 시설공단	2004. 02	5 km 이상의 산악터널에 대한 방재기준 제시
	고속철도 설계기준 (노반편: 터널방재)	한국철도 시설공단	2005. 09	터널연장별 구체적인 세부 설치기준을 제시
	철도시설 안전기준에 관한 규칙	건설교통부	2005. 10	철도부문에서의 안전관리체계 강화 철도시설의 안전기준과 유지관리
	철도터널 안전기준(안)	건설교통부	2006.	사고예방, 피해저감, 대피 및 구조촉진 항목분류
해 외 기 준	UIC Code 779-9: Safety Tunnels	International Union of Railway	2003. 01	목적별 방재시설물과 각 시설에 대한 평가 및 효과 제시
	NFPA Code 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems	National Fire Protection Association	2000.	철도시스템의 전반적인 소방안전기준을 제시

도를 분석하기 위해서 시작되었는데, 철도선진국(유럽)에서는 터널 설계 등에 적극 적용되고 있으며, 국내에서도 철도터널에 적용필요성이 요구되고 있으며, QRA기법을 도입할 경우 설계안의 요소별 평가가 가능함으로써 위험도에 대한 정성적이고 주관적인 접근을 개선할 수 있을 것이다(Jonkman et al., 2003).

QRA는 위험을 정량적으로 표현하기 위해서 ‘위험’이

라는 개념을 다음 식에서와 같이 수치적으로 환산한다. 여기서 사망자수에 의한 사회시설의 위험을 평가하고, 인명피해를 방재계획상 가장 큰 위험으로 간주하게 된다.

$$\text{위험} = \text{사고발생확률} \times \text{사고발생 피해}$$

QRA는 통계데이터를 기반으로 위험을 수치적으로 계산하고 그 결과를 평가기준과 비교하여 적절한 수준의 위험도를 만드는 과정으로 Fig. 1과 같은 설계흐름을 가지고 있다.

위험요소들에 대한 정량적인 특성부여를 위하여 대부분의 QRA기법에서는 통계에 의한 데이터를 적용하고 있으며 통계적응에 대한 불확실성은 Fig. 2에서와 같은 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation)을 통해 감소시키고 있다.

통계는 과거에 대한 사실을 기반으로 현재와 미래를 예측할 수 있으나 새롭게 발생할 수 있는 통계량이나 새로운 위험요소(기존의 통계데이터를 적용할 수 없는 위험요소)에 대해서는 정량화된 통계데이터를 적용할 수 없는 한계를 지니고 있어 최근 국내외에서는 모의실험 또는 전산유체역학을 이용한 수치시뮬레이션을 통하여 그 한계를 보완하고 있다. 그러나 모의실험과 수치시뮬레이션은 그 수행횟수에 대한 제한이 있을 수 있어 반복수행을 통하여 근사적인 확률을 추정하는 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하는 것이 모의실험 및 수치시뮬레이션을 이용하여 위험요소에 정량적인 특성을 부여하는데 필수불가결한 방법이라 판단된다.

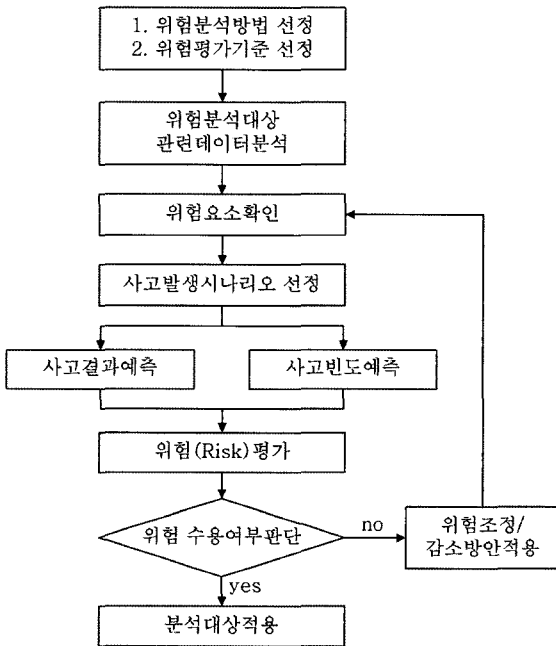


Fig. 1. Flow chart of QRA

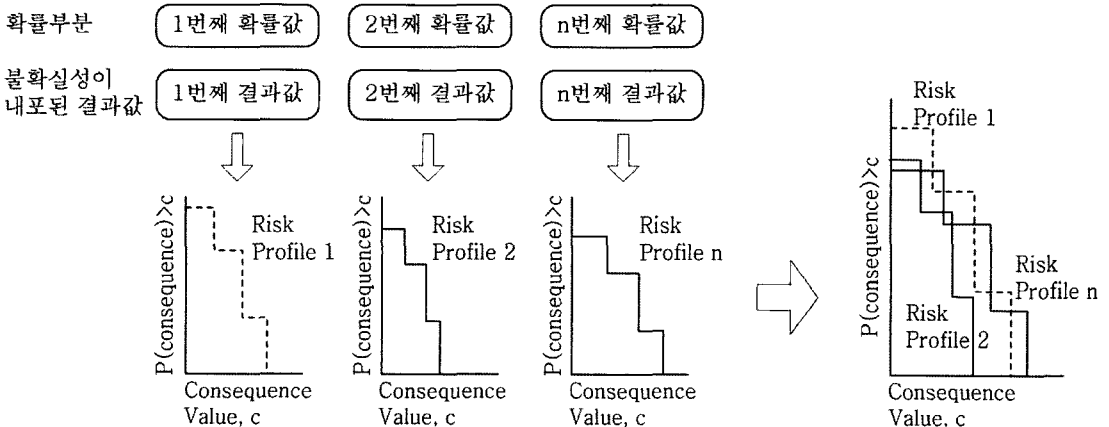


Fig. 2. Monte-Carlo simulation

열차 운행중 철도터널에서 발생할 수 있는 위험에 대한 평가를 인명피해로 가정했을 때 철도터널의 위험요소는 터널붕괴에 의한 피해, 열차충돌 및 탈선시 충격에너지에 의한 피해, 화재사고에 의한 피해 등이 있을 수 있다. 이중 국내외 사고통계를 볼 때 터널 내 화재사고에 의한 인명피해가 가장 크게 발생한다. 터널은 공간적인 제약으로 인해 화재발생시 화염으로부터 발생하는 높은 복사열과 대류열, 많은 양의 유독가스 등에 의해 인명피해를 발생시킬 수 있는 위험한 환경으로 급격히 변화될 가능성이 크다. 따라서 이러한 터널내 환경과 터널로부터 탈출하면서 발생할 수 있는 인명피해의 상관

관계를 분석하여 사고에 대한 위험결과를 도출하는 것이 가장 중요한 위험계산방법이라 할 수 있다.

열차사고 시나리오, 사고통계 분석자료, 화재·피난시 물레이션 등의 분석과정을 거쳐 철도터널의 정량적 위험 평가는 F-N curve로 나타낼 수 있다(Fig. 3). 이는 위험을 정량적인 수치인 “사고확률×사망자수”의 관계로 표현한 도표이며, 위험의 적정(관리)수준인 ALARP영역을 함께 나타낸다. ALARP(As Low As Reasonably Practicable)는 ‘실행할 수 있는 한 위험도를 낮게’하는 것으로 경제성 원칙에 입각하여 위험도를 낮추는 개념이며, ALARP 영역에 해당할 수 있도록 F-N curve결과는 실행 가능한 범위 안에서 최대한 위험도를 낮추는 노력하여야 함을 의미하며, 도시지역 안전지표인 홍콩기준 ($10^{-4} \sim 10^{-6}$ fatalities/year)을 평가기준으로 적용하였다.

장대터널에서의 방재설계시 고려할 수 있는 인자는 다음과 같다.

- 토목분야 인자: 터널연장 / 터널단면적 / 터널종단경사 / 환기구 및 대피통로 구조안전대피소 / 측방대피로등
- 차량분야 인자: 차량종류 / 터널내 차량속도 / 탑승 인원등
- 기계전기분야 인자: 제연용 환기기 / 승객유도표지 / 방화문 / 가압시설등

그림 4는 터널내 방재 위험도 분석시 고려할 수 있는 다양한 대피경로에 대한 시나리오의 이벤트 트리를 나

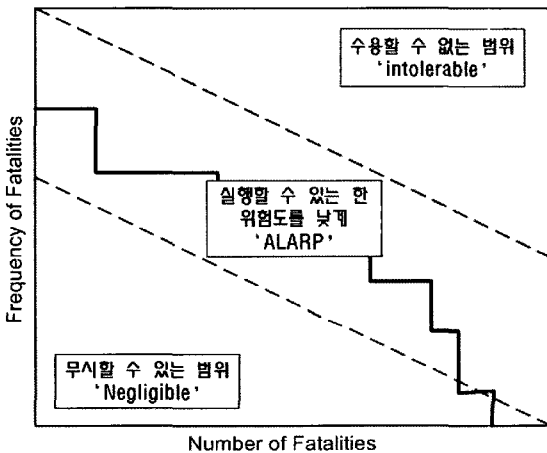


Fig. 3. F-N curve for QRA

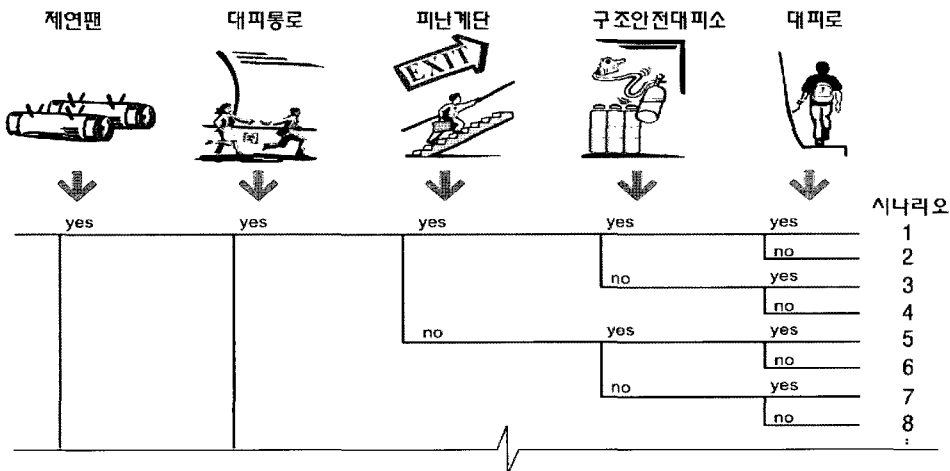


Fig. 4. An event tree for scenario

타낸 것이다.

QRA 분석을 위하여 2가지 형태의 기초데이터를 제공하게 되는데, 먼저 통계적 데이터이다. 이는 사고시나리오 작성을 위하여 관련통계자료를 수집, 정리하여 사용하며 위험도는 연간 사망자가 발생할 확률을 나타내므로 철도의 3대 사고인 탈선/충돌/화재를 모두 감안하여 산출하게 된다.

다음은 시뮬레이션 데이터로서 설계시 반영할 수 있는 많은 제반데이터는 통계적 수법으로 산출할 수 없는 경우가 대부분이다. 따라서, 활용 가능한 다양한 시나리오에 대하여 신뢰성있는 데이터를 얻기 위한 수치해석

이 필요하며, 수치해석 데이터는 ISO규정에 의거한 FED(Fractional Effective Dose)산출로 승객의 피난속도와 온도, 독성가스, 연기농도에 의한 가시거리와의 관계를 수치적으로 정리한다. Fig. 6에는 QRA 분석에 대한 전체적인 흐름도가 나타나 있다.

4. QRA에 의한 방재 안전성 평가

터널의 방재안전설계를 위하여 각 터널의 현황 및 특성을 파악하는 것은 제일 우선시 되어야 할 사항이다. 검토

구 분	내 용
사고범위	■ 다양하게 발생 가능한 열차사고의 고려
최악상황	■ 가장 위험성이 큰 화재사고로 가정
차량진행방향	■ 상행, 하행 모두 분석
사고위치	■ 사고발생으로 인하여 열차가 터널 내 정지함 ■ 정지위치는 각 구간의 중간지점

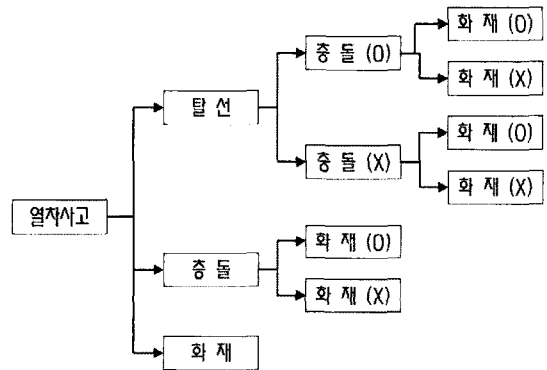
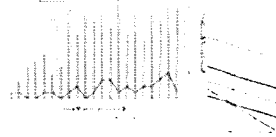


Fig. 5. Conditions and types for train accident

기초 조사

- 기초통계조사
- 국내외 관련자료 조사
- 위험기준 조사



분석데이터 구축

- 화재 시뮬레이션
- 피난 시뮬레이션
- 시뮬레이션 데이터 구축
- FED분석



QRA

- Event Tree
- Fault Tree
- F-N Curve
- 위험도분석

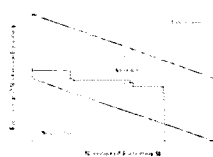


Fig. 6. Flow chart for QRA procedures

대상인 두 터널 모두 경제성의 이유로 방재안전상 성능이 가장 우수한 '연결통로가 적정한 간격으로 배치된 단선 병렬터널'이 아닌 복선터널로 계획되었으며, 터널 내 인접공구와 공구분할이 이루어진 공통점을 가진다. 본 검토의 대상터널의 주요현황은 Table 2에 나타내었다.

철도터널에 대한 QRA분석을 하기 위하여 열차화재 사고 및 승객의 대피상황에 대한 기본적인 적용조건을 설정할 필요가 있으며, Table 3은 QRA분석 적용 조건 및 가정 사항을 나타낸다.

본 검토에서는 갱외탈출로 접속부에 차단구역이 설치

Table 2. The outline of studied tunnels

구 분	A 터널	B 터널	비 고
터널형식	복선터널	복선터널	
운행차량	전동차 (여객전용)	전동차/기관차 (여객 및 화물수송)	
설치지역	준도시지역	도시지역	
연 장	4.1 km	3.6 km	
과업연장	3.5 km	2.1 km	터널내 공구분할
최대중단경사	6.0‰	5.8‰	
공사용 작업구	1개소(사갱)	-	공기 검토후 적용
소요환기구	-	2개소(수직환기구)	소요환기량 검토후 적용

Table 3. The condition of application for QRA

구 분	조 건	비 고
화재위치	구간별 중심	■ 양방향 피난 시 피난거리를 동일기준으로 적용
	열차 중앙	■ 양방향 대피를 동시에 고려
화재열량	15 MW	■ 철재차량(IC), 약 20분 후 최대치에 도달
피난방향	양방향	■ 화원을 중심으로 양방향 대피
열차방향	양방향	■ 상행 및 하행 진행시 위험을 동시에 고려

※ 피난대피 가정사항

- 1) 화재 발생과 동시에 기차가 정지하며 승객의 피난이 이루어짐
- 2) 열차로부터 대피는 운전실의 비상출입문과 객실 좌우의 출입문을 이용함
- 3) 피난시 열차와 선로바닥의 높이차에 의한 피난속도의 감소는 고려하지 않음
- 4) 승객은 비상 조명등이 설치된 선로의 양쪽 대피로를 이용하는 것으로 가정함

Table 4. The outline of isolation zone in tunnel

구분	개 요 도	특 징
차 단 구역 있음		<ul style="list-style-type: none"> ■ 갱외탈출로 접속부에 차단구역설치 ■ 방화문과 가압송풍기(차압팬)를 설치하여 본선으로부터의 유독가스 침입을 차단
차 단 구역 없음		<ul style="list-style-type: none"> ■ 방화문(차단구역)이 없는 경우 갱외탈출로를 통한 대피시 위험성이 높음

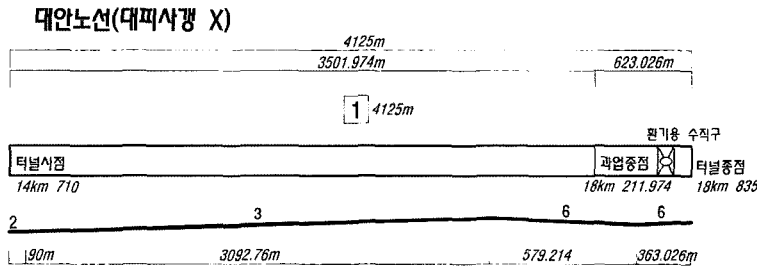
되어 있는 것으로 계획하였으며(Table 4), 이는 갱외탈출로에 연기 침투를 억제하여 사갱 전구간이 안전한 구역으로 확보하기 위한 시설이다. 차단구역은 2중 방화문과 연기침투 방지를 위하여 가압송풍기(차압팬)설비로 구성된 안전지역이다.

4.1 철도터널의 방재 안전성 평가사례 1

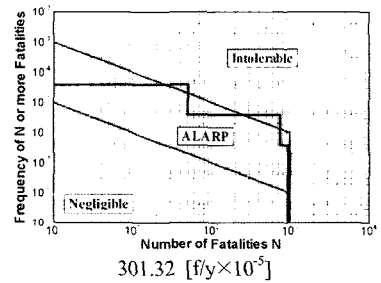
A 터널의 경우 공기내 터널굴착을 완료하기 위하여 반드시 공사용 작업구(사갱)가 1개소 이상 설치되어야 하는 상황이며, 터널 약 2/3부근의 저토퍼 구간에 공사

용 작업차량의 교행이 가능한 공사용 사갱을 계획하였다. 이는 공사중에는 굴착 및 버력반출로로 이용되지만, 공용 후 갱외탈출로로 이용이 가능한 터널내 안전구조물이다. QRA분석은 인접공구에 설치 계획된 환기용 수직구는 분석대상에서 제외 하였으며, 기본적인 Way Finding System(비상조명등, 피난유도등, 유도표지판 등)은 터널 전연장에 적용하였다. 갱외 탈출로 개소 수에 따라 3가지 경우에 대하여 분석을 실시하였으며 결과는 다음과 같다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 갱외탈출로가 없

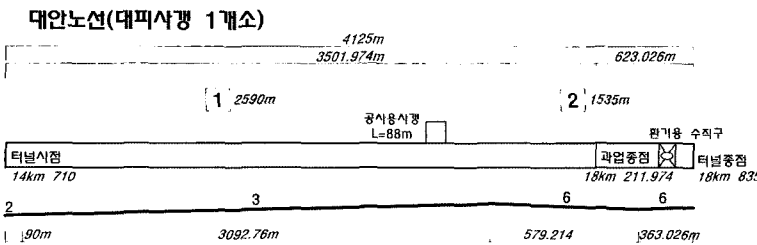


(a) 터널개요

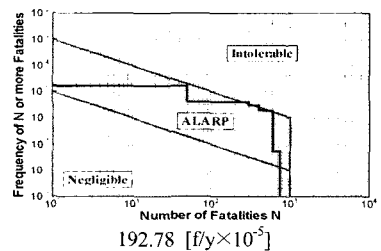


(b) QRA

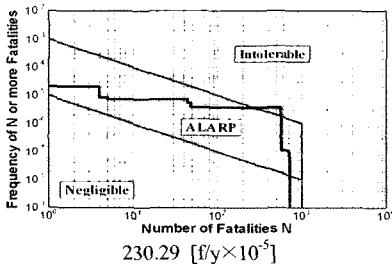
Fig. 7. The QRA result for case I in A-tunnel



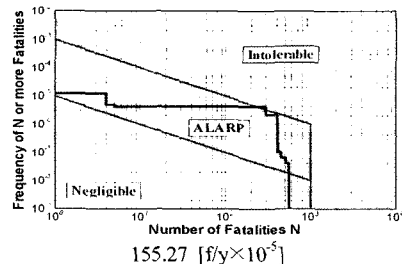
(a) 터널 개요



(b) 전구간에 대한 QRA 결과



(c) 1구간에 대한 QRA 결과



(c) 2구간에 대한 QRA 결과

Fig. 8. The QRA result for case II in A-tunnel

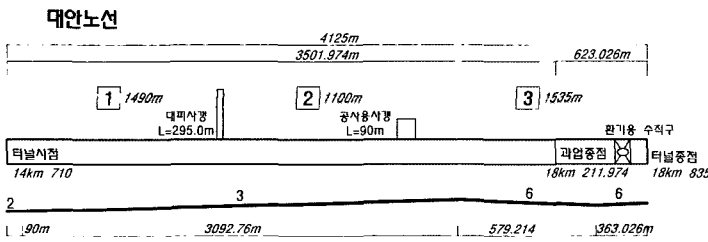
는 경우인 Case I과 1개소인 Case II 경우 전체 위험도는 ALARP기준에 만족하지 못하는 위험도를 나타내었다. 이는 정량적인 수치로 약 30%의 위험 감소 효과를 볼 수 있지만 안전한 터널로써의 기능을 수행할 수 없음을 나타낸다. 따라서 공사용 사갱 외에 별도의 비상차량 통행이 가능한 대피용 사갱 1개소를 추가적으로 설치하는 방안을 수립하여 이에 대한 위험도 분석을 수행하였다.

Fig. 9는 갱외탈출로가 2개소인 경우에 대한 QRA 분석 결과이다. 여기서 1구간과 상대적으로 구간연장이 짧은 2구간의 위험도는 ALARP 기준에 만족하며, 3구간에서는 부분적으로 ALARP기준에 접하는 분석결과를 나타내어 상대적으로 위험도가 높은 것을 알 수 있다. 또한 전구간에 대한 평가에서 ALARP구역 이내의 분포를 나타내므로 갱외탈출로 2개소를 설치할 경우 ALARP기준

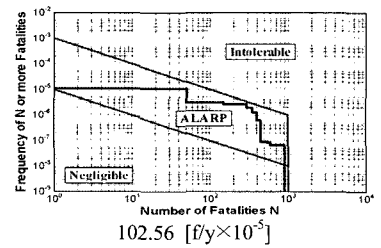
에 만족하는 적정 수준의 안전성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

여기서, 1구간과 3구간은 비슷한 피난대피거리임에도 불구하고 3구간의 위험수준이 약 2배에 이르는 것은 3구간에 상·하향 종단경사가 바뀌는 종단 변환점이 있어 화재발생시 유독가스의 배출속도가 느려 상대적으로 위험도가 높게 평가된 것으로 판단된다.

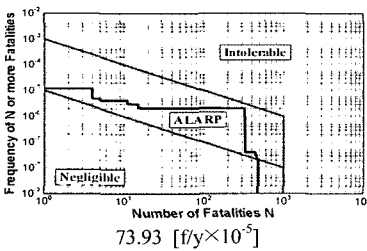
A 터널에 대한 정량적 위험도 분석결과, 대피사갱의 개수에 따라 위험도 변화가 뚜렷하게 나타나며 갱외탈출로(사갱)수가 많을수록 피난거리의 감소로 인하여 위험도 수치의 정량적 감소효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 즉, 터널내 화재발생시 가장 큰 위험요소는 피난대피거리이며, 종단경사 조건에 따라 화재연기 전파에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



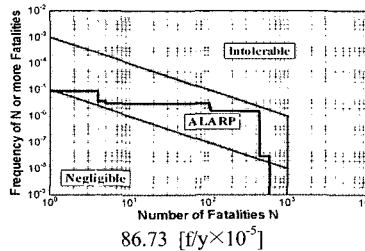
(a) 터널 개요



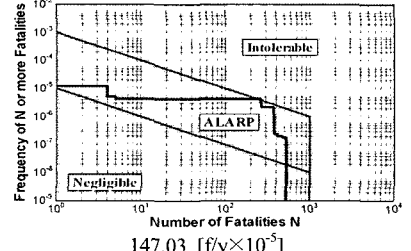
(b) 전구간에 대한 QRA 결과



(c) 1구간에 대한 QRA 결과



(d) 2구간에 대한 QRA 결과



(e) 3구간에 대한 QRA 결과

Fig. 9. The QRA result for case III in A-tunnel

Table 5. The QRA results for A-tunnel

구 분	Case I	Case II	Case III
대피탈출로	없음	1개소(사갱)	2개소(사갱)
최대피난거리	2,067.5 m	1,295 m	767.5 m
리스크(R) $\times 10^{-5}$ f/yr	301.32	192.78	102.56
위험감소율	기준	36% 감소	66% 감소
ALARP기준	만족 못함	만족 못함	만족

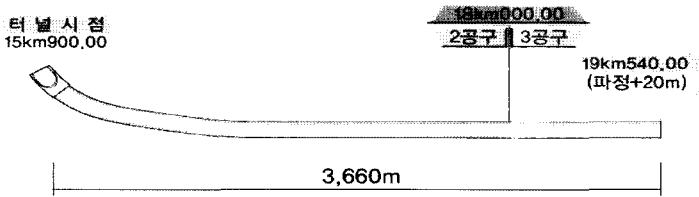
4.2 철도터널의 방재 안전성 평가사례 2

B 터널의 경우 전동차와 기관차의 병행 통과구간으로써 터널 굴착공기뿐만 아니라 기관차 운행시 터널내 오염물질 제거(회석)를 위한 적정 소요환기량을 확보할 필요성이 대두 되었다. 이에 따라 터널방재안전설계는 터널굴착을 위한 작업구계획 및 환기구설계를 고려하여 수직구(갱외탈출로)를 계획하는 것으로 설계하였다. QRA 분석은 A 터널과 달리 인접공구에 설치 계획된 환기용 수직구는 분석대상에 포함하였으며, 이는 자연환기방식에 의한 환기설계를 위하여 인접공구의 환기수직구가

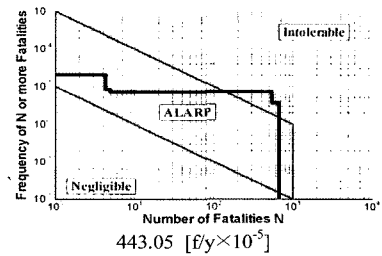
필수적이기 때문이다. 갱외탈출로 개소 수에 따른 QRA 분석 결과는 다음과 같다.

갱외탈출로가 없는 경우(Fig. 8), 결과곡선이 'ALARP' 범위를 초과 'Intolerable' 구역에 위치하여 위험허용범위를 초과한다. 이는 터널내 화재사고시 피난거리가 과도하게 길어 위험이 크게 나타났으며 대량의 사상자를 발생시킬 확률이 크므로 추가적인 안전조치가 필요하다.

갱외탈출로를 1개소 설치할 경우(Fig. 9), 1구간의 경우 위험도가 'ALARP'의 범위에 드는 것으로 나타났으나, 2구간의 위험도가 상대적으로 높게 형성되어 전체적

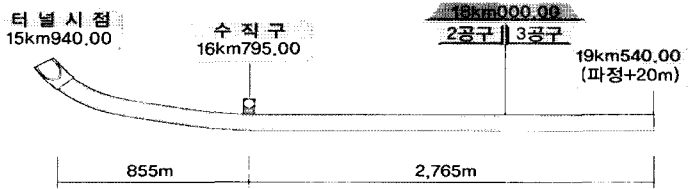


(a) 터널 개요

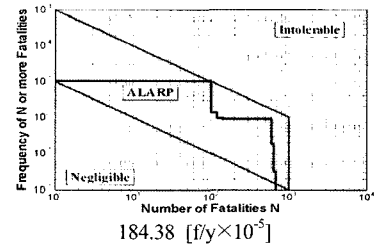


(b) 전구간에 대한 QRA 결과

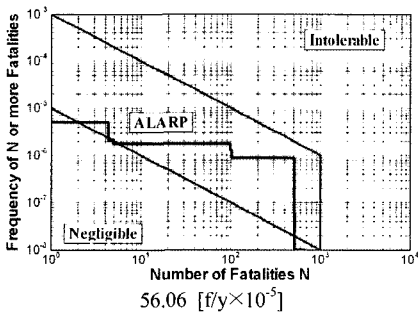
Fig. 10. The QRA result for case I in B-tunnel



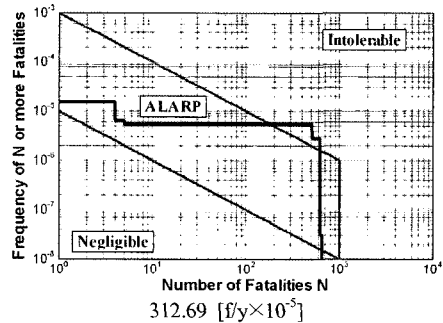
(a) 터널 개요



(b) 전구간에 대한 QRA 결과



(c) 1구간에 대한 QRA 결과



(c) 2구간에 대한 QRA 결과

Fig. 11. The QRA result for case II in B-tunnel

인 위험도가 수용할 수 있는 범위를 벗어나는 것으로 나타났다. 과업구간의 위험도를 감소시키기 위하여 인접공구에 갱외탈출로를 설치할 필요성이 있으며, 이는 방재성능 뿐만 아니라 환기성능확보를 위하여 필수적인 사항으로 판단되었다.

갱의 탈출로를 2개소 설치한 경우(Fig. 12), 터널 전연장에 대한 안전기준은 만족하지만, 2구간의 위험도가 'Intolerable' 범위에 해당해 상대적으로 긴 피난거리의 영향으로 인하여 터널의 방재안전기준을 충족시키지 못하는 결과를 나타내었다.

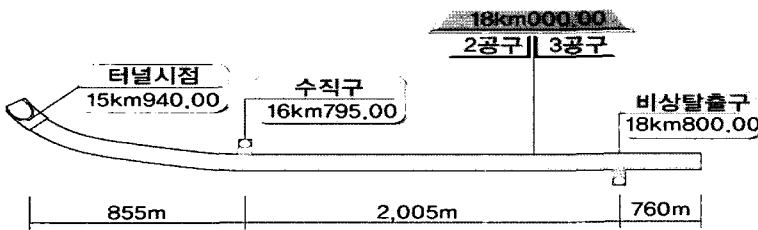
방재안전성능 향상을 위한 추가적인 대책이 필요하였고, 피난대피거리가 약 2.0 km에 이르는 2구간의 대피거리를 줄일 수 있는 2가지 방안이 검토 되었다.

첫 번째 대책은 터널내 대피소를 설치하는 방안으로 위험도 감소효과는 기대되지만, 화재 초기 진압이 불가능한 경우 대피소내 피난인의 대량 참사가 예상 되었으며, 또한, UN 경제사회위원회(도로터널 방재안전 전문가 집단)에서는 폐쇄적인 갱내대피소는 더 이상 설치하지 말 것을 권고하고 있으므로 갱내대피소 설치는 적절한 대책이 아니라고 판단하였다.

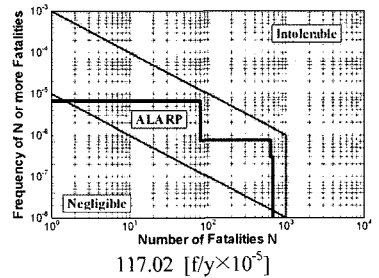
두 번째 대책은 2구간의 대피거리를 줄일 수 있도록 접속부를 종점측으로 약 305 m 이격한 사갱을 설치하는 방안을 고려하였다. 사갱은 수직구에 비하여 대피인원의 탈출이 용이하고, 비상차량 및 중소형 소방차 진입이 가능하여 화재상황에 신속하게 대응할 수 있는 장점이 있다. B 터널에서 사갱을 설치할 경우 2구간의 피난대피거리가 2.0 km에서 1.7 km로 줄어 'ALARP' 기준을 만족할 것으로 기대되었지만, QRA 분석 전에 실시한 적용성 평가에서 매우 불리한 결과를 나타내었다. 경제성 측면에서 수직구에 비하여 약 3배의 공사비와 굴착공기가 소요되며 사갱선형에 편토압 지형이 연속적으로 발생하여 터널안정성 측면에서도 매우 불리하게 평가 되었다.

또한 접속부 상부에 사찰이 있어 터널 굴착시 대규모 민원이 예상되어 사갱 설치안은 적용되지 않았다.

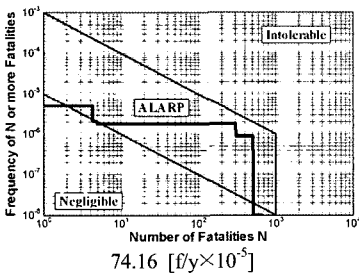
QRA 분석 결과, B 터널의 방재안전 구조물계획으로 'ALARP' 기준을 만족하는 것은 막대한 추가소요비용이 필요하고, 이는 현실적으로 실현 불가능한 것으로 판단 되었다. 따라서 터널완공 시기에 관계없이 구조물계획 보다 상대적으로 적은 비용으로 설치가 가능한 터널 안



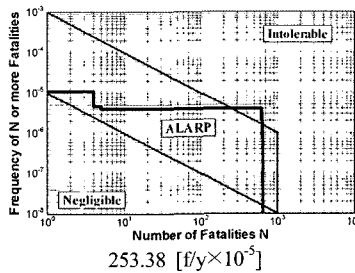
(a) 터널 개요



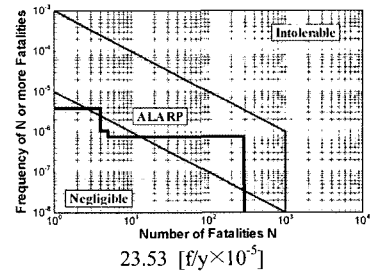
(b) 전구간에 대한 QRA 결과



(c) 1구간에 대한 QRA 결과



(d) 2구간에 대한 QRA 결과



(e) 3구간에 대한 QRA 결과

Fig. 12. The QRA result for case III in B-tunnel

전시설에 대하여 살펴보았다. 자기구난(Self rescue)에 바탕을 둔 피난대피가 이루어 질수 있는 터널을 설계하기 위하여 기본적인 Way Finding 설비(피난유도등, 비상조명등, 유도표지판 등등)는 이미 QRA분석의 기본설정상항으로 적용되었다. 이러한 터널내 설비시설 이외에 '위험'을 저감시킬 수 있는 요소는 차량의 방재성능, 방재시나리오에 따른 훈련정도, 구난 및 대피를 위한 응급기재 등이 있으며, 기재물 중에서 비상마스크는 대피자의 생존시간을 증가시키는 기능을 하므로 비교적 쉽게 QRA분석에 적용 가능하다. 따라서 터널내 비상마스크를 설치한 경우에 대하여 위험분석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 13과 같다.

2구간은 연장이 상대적으로 가장 길어 다른 구간에 비해 위험도가 높지만 비상용마스크를 설치함으로써 'ALARP' 범위내에 FN-curve가 형성되며 전구간에 대한 위험도가 'ALARP' 범위에 만족하게 나타났다. 터널내 화재발생시 위험도는 피난인원, 중단경사, 안전시설, 피난거리 등의 다양한 요소들에 의해 분석되어지며 특히 피난거리가 많은 비중을 차지하는 것으로 분석되었다.

긴 피난거리를 갱외탈출로 설치를 통하여 감소시킬 수 있으며, 이는 터널 전체적인 위험도를 낮추는데 큰 역할을 하다. 또한, 위험도를 낮추는데 있어 구조적인 문제에 직면할 경우 비상용마스크 등과 같은 피난용 안전시설물을 설치하여 구조적 방법 외에 추가적인 방법으로 안전을 확보할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널의 방재설계에 정량적 위험도 분석기법을 도입하였으며, 경제성 및 사회적 요구수준을 고려하여 실행 가능한 합리적인 수준으로 터널방재 안전계획을 수립하고, 각각의 경우에 대하여 QRA분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 장대터널에서의 방재 특성을 고려할 수 있는 정량적 위험도 분석기법인 QRA를 적용한 결과, 방재 계획에 따른 터널내 위험도를 정량적으로 평가할 수 있었으며, 이는 장대터널의 방재계획 수립시 때

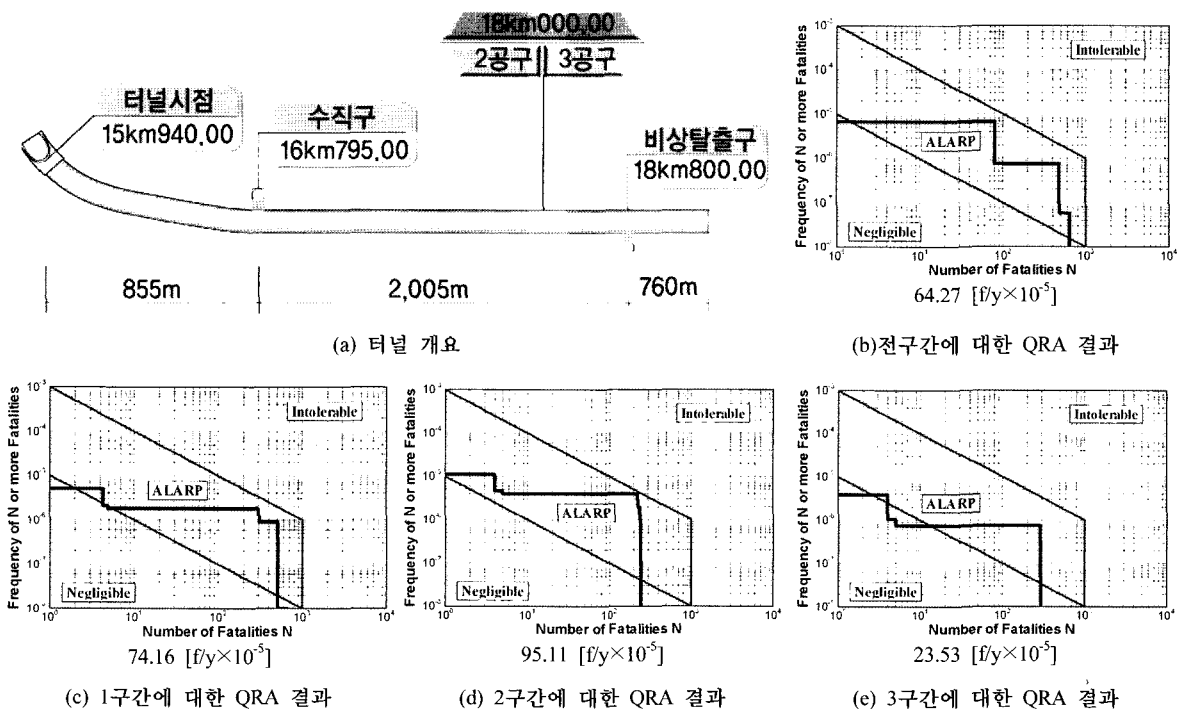


Fig. 13. The QRA result for case IV in B-tunnel

- 우 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.
2. 장대터널내 화재발생시 가장 큰 위험요소는 피난 대피거리와 종단경사 변화점으로 분석되었으며, 터널내 구간별 위험도 분석결과를 고려하여 갱외 탈출구의 위치선정 및 추가적인 방재설비설치 여부 등을 종합적으로 판단하여야 한다.
 3. 터널내 방재시설물 계획으로 위험도를 낮추는데 있어 한계가 나타날 경우, 실현가능한 방재설비를 설치하여 보다 안전한 터널방재계획을 수립하여야 한다. 즉 ‘ALARP’ 범위에 해당하는 결과는 ‘실행할 수 있는 한 위험도를 낮게’ 하는 권고에 의해 기술적 또는 경제적 제반사항을 고려하여야 한다.
 4. 장대터널에서의 방재문제는 매우 중요한 설계요소로 다루어지고 있다. 장대터널에서의 방재성능을 극대화하기 위하여 터널 특성에 적합한 실행 가능한 구조물계획과 안전시설을 계획하는 것이 가장 중요하다고 판단되며, 또한 국내실정에 적합한 터

널 방재안전기준이 정립되어 합리적인 수준에서 장대터널 방재설계 및 시공이 이루어 질 수 있도록 하여야 한다.

참고문헌

1. 김원국 (2003), “터널방재설계 최적화에 관한 연구”, 대한토목학회, 터널시공기술향상 대토론회 논문집.
2. 전덕찬 (2004), “정량적 화재위험성평가(QRA)기법을 적용한 터널방재 설계사례”, 한국지반공학회 창립20주년 기념 지반구조물 설계·시공 사례집.
3. Frantzich, H. (1998), Uncertainty and risk analysis in fire safety engineering, Ph.D. Dissertation, Lund University.
4. ISO/TS 13571 (2002), “Life-threatening components of fire: Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data”.
5. Jonkman, S.N., Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J.K. (2003), “Flood risk calculated with different risk measures”, European Safety and Reliability Conference.



김 영 군

삼성물산(주)
건설부문 토목ENG팀
부장

E-mail: babokyg@hanmail.net



김 동 현

한국철도기술연구원
환경화재연구팀
책임연구원

E-mail: dhkim@krri.re.kr