

효율적 방재시설을 위한 정량적 위험도 분석

An effective prevention facilities for railway tunnel design by using Quantitative Risk Analysis

권순섭* · 신화철** · 정지승*** · 민대홍****

Kwon, Soon Sub · Shin, Hwa Cheol · Jung, Ji Seung · Min Dae Hing

ABSTRACT

Recently, as demands of new railway and the relocation of existing line, a number of tunnel structures have been constructed. Tunnel structures contribute to minimize the cost and time of transport, but in case of railway fire accident bring serious damages of human life caused by narrowness of shelter, smoke and high temperature, difficulty in rescue. For that reason, at the beginning of plan of tunnel, the optimum design of safety facility in tunnel for minimizing the risks and satisfying the safety standard is needed.

In this study, QRA(Quantitative Risk Analysis) technique is applied to design of railway tunnel for assuring the safety function and estimating the risk of safety. The case study is carried out to verify the QRA technique for railway tunnels in Iksan-Sili.

1. 서론

최근 철도노선의 신설과 노선 개량사업이 증가함에 따라 산악지형이 많은 국내 지형 여건상 터널구조물의 개소수가 증가하고 있는 추세이다. 터널구조물은 운송시간과 거리를 최소화 시켜주는 장점이 있지만 열차화재사고가 발생할 경우, 외부연결(대피)통로가 한정되어 있고 공기가 밀폐되어 있어 많은 양의 연기와 열이 생성 될 수 있기 때문에 외부 또는 지상에서의 상황 파악, 탈출, 진화, 방어 및 구조활동을 취하는데 큰 어려움을 가지고 있어 적절한 대응조치가 실패할 경우 인명안전에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 터널방재시설은 방재기준에 맞춰 최대한 안전성을 확보하도록 설계되어야 하며 아울러 방재시설설계에 대한 검증을 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 전라선 복선전철 익산-신리간에 위치한 터널을 모델로 하여 터널 설계시 화재로 인한 인명피해를 줄이기 위해 구비된 방재설비 설계에 대해 정량적 위험도 평가(QRA)를 통해 검증하여 방재설비 계획에 대한 적정성을 검토하였다.

2. 정량적 위험도 분석방법(QRA)

2.1 위험도 분석기법

일반적으로 위험도 평가 (Risk Assessment)는 법률적인 안전의무사항을 준수하거나 요건에 부합됨을 증명하는데 중점을 두고 있으며, 인간에 대한 피해의 관점으로 표현된다. 시스템의 고장과 같은 부적합한 사건들의 고장률 또는 빈도(Frequency)의 추정에 중점을 두는 것이 신뢰성 공학인 반면, 리스크 분석은 고장이 유발할 수 있는 결과(Consequence)까지 고려한다. 그리하여, 소규모의 시스템에서부터 원자력 발전소와 같은 대형시스템에 이르기까지 위험도 분석기법을 근간으로 그 시스템의 안정성을 분석한다.

위험도 분석은 1950년도 원자력 산업 및 항공 산업 분야에서 개발되어 이후에 화학공정 산업분야로 확대되었다. 이때에는 결함수(Fault Tree Analysis) 및 사건수분석(Event Tree Analysis)기법이 근간을 이루었

* 정회원·남광토건(주) 토목사업본부 상무이사·E-mail : 20064885@namkwang.co.kr

** 정회원·남광토건(주) 토목사업본부 토목기술팀 과장·E-mail : shinyou@namkwang.co.kr

*** 정회원·동양대학교 철도토목공학과 교수 ·E-mail : jsjung@dyu.ac.kr

**** 정회원·유니콘스 대표이사·E-mail : dh_min@hotmail.com

고 원인/결과분석 및 정량적 위험도 분석에 크게 유용되었다. 위험도 분석은 적용분야에 따라 포함하는 범위 또는 내용에 있어서 약간의 차이는 있지만 위험분석(Hazard Analysis)과 사고발생빈도추정의 두 요소가 근간이 된다. 위험은 두 가지 속성을 가지는데 심각도(Severity)와 위험발생빈도(Likelihood of occurrence)이다. 심각도는 위험이 주어진 환경에서 야기할 수 있는 최악의 사고로 정의된다. 위험발생빈도는 정량적 또는 정성적으로 평가되는데 몇몇의 표준화된 시스템에 대해 많은 과거 자료가 존재하는 경우를 제외하고는 대개의 경우 정성적으로 평가된다. 위험의 심각도와 위험발생빈도를 결합한 것을 위험수준(Hazard Level)이라 한다. 또한 위험도(Risk)는 위험수준과 두 가지의 다른 인자인 위험노출정도(Exposure)와 사고발생빈도가 결합한 것으로 정의된다.

위험도 분석은 종종 위험분석과 비슷한 의미로 사용하기도 하는데 위험분석은 단지 위험규명 및 위험수준분석을 포함하고 있는 반면에 위험도 분석은 위험노출(지속)정도 등과 같은 환경적 조건의 규명 및 분석을 포함한다. 따라서 위험분석은 위험도분석의 부분집합이다. 철도의 정량적 위험도 분석의 경우 위험규명, 원인발생확률 및 빈도추정, 결과분석, 위험도평가 등의 과정이 필요하다.

2.2 분석절차

정량적 위험도 평가분석은 그림 1과 같이 6단계의 절차를 통해 이루어진다. 사전조사를 통해 화재발생 확률 등을 조사 검토한 후 방재설비의 유무 등에 따른 발생 가능한 모든 사건수 시나리오를 작성한다. 각 시나리오별 1, 3차원 시뮬레이션을 통해 검토된 자료를 바탕으로 사망자수를 평가하며 평가된 사망자수가 안전기준에 적합하다면 분석 종료(종료)가 가능하지만, 적합하지 않다면 설비가 가능한 대안을 선정하여 대안에 대한 안정성 분석을 통해 분석이 종료된다.

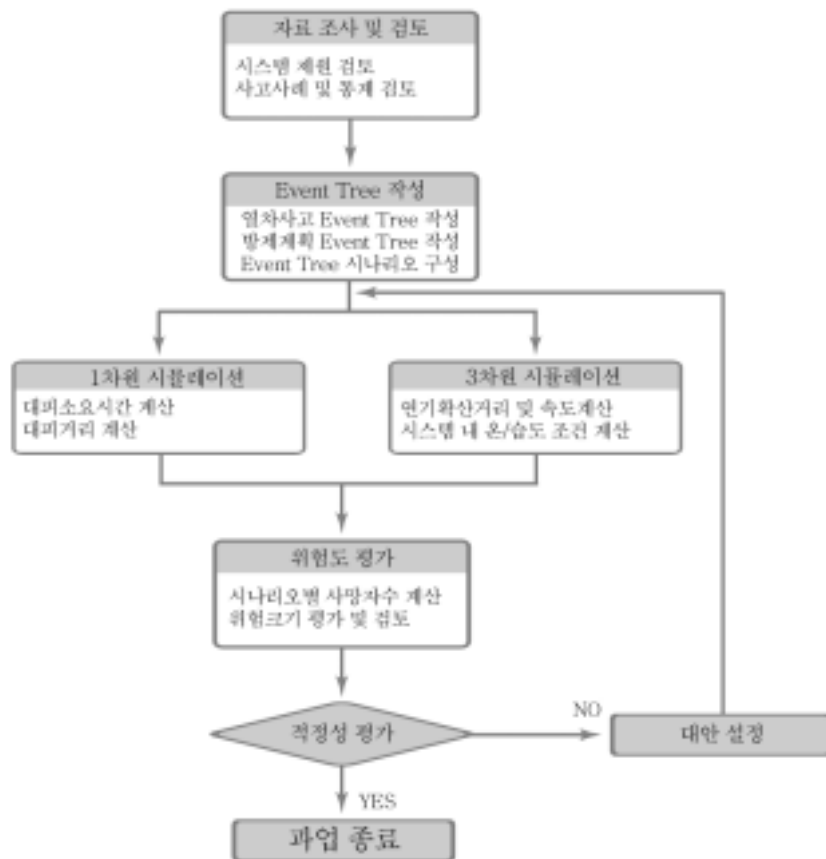


그림 1. 위험도분석 수행흐름도

2.3 평가기준

(1) F-N curve

사건수에 의해 선정된 시나리오의 위험을 수치적인 방법에 의해서 정량화하여 특정수의 사망자 (Number of Fatality per year)를 발생시키는 사고가 일어날 확률(Frequency of Fatality)을 그림 2과 같이 도시한 그래프로 사회적위험기준을 적용하여 위험도(사고발생확률×사고발생피해)를 판별한다.

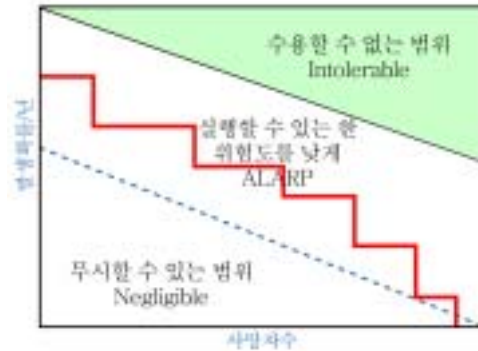


그림 2. F-N Curve

(2) ALARP (As Low As Reasonable Practicable)

실행할 수 있는 한 위험도를 낮게하는 것으로 경제성 원칙에 입각하여 위험도를 낮추는 개념으로 영국에서 확립되었다. 각 시나리오에서 계산된 위험도들이 F-N Curve에서 ALARP영역에 해당하는 범위에 포함될 수 있도록 최대한 위험도를 낮추는 노력을 하여야 한다는 의미이다.

(3) 각국의 사회적 위험도 기준 범위

각국의 위험도 기준범위는 도표 1과 같이 다소 차이가 있다. 현행 국내 철도터널 방재기준은 장대터널의 증가, 환기 및 방재 시스템의 다양화 및 복잡화, 관련 사회적 여건의 변화 등을 반영하지 못하고 최소안전기준을 제시하는 수준이며 현재 발생된 철도설계기준(노반편)과 방재시설 설치기준(안)은 최소한의 안전기준 및 5km 이상의 산악터널에 대한 기준만을 언급하므로 중소규모 터널에 대한 안전기준은 마련되지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 선진외국의 사회적 위험도 기준을 조사하여 홍콩의 사회적 위험도 기준을 적용하였다.

도표 1. 각국의 사회적 위험도 기준 범위

년도	국가	기준		위험범위 구분
		사망자수	ALARP	
1993	영국	10	$10^{-2} \sim 10^{-5}$	Intolerable - ALARP - Negligible
1993	홍콩	10	$10^{-4} \sim 10^{-6}$	Intolerable - ALARP - Negligible
1996	네덜란드	10	10^{-5}	Societal risk to be reduced - ALARP

3. 적용 예

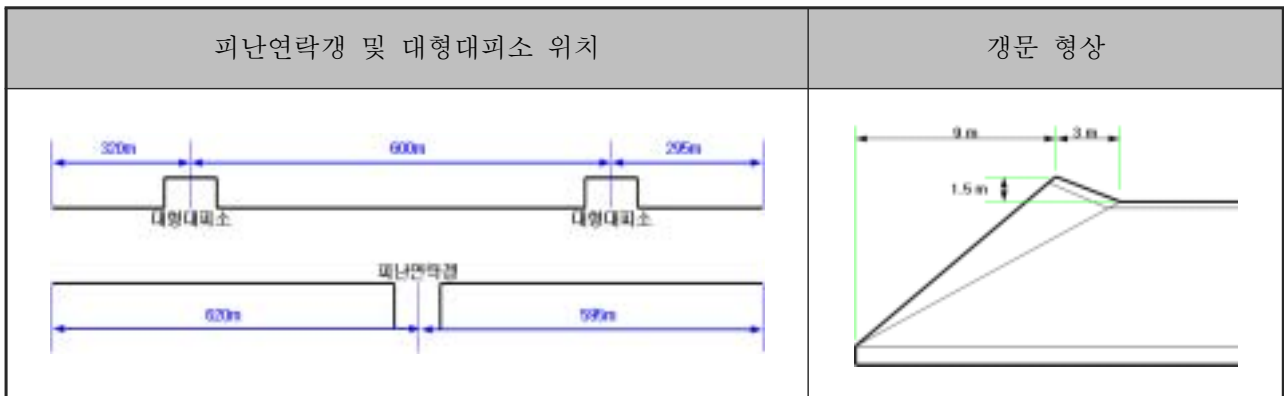
3.1 적용대상 터널의 일반사항

본 연구에서는 전라선 복선전철 익산-신리간의 위치한 터널을 모델로 하여 터널 설계시 화재로 인한 인명피해를 줄이기 위해 구비된 방재설비 설계에 대해 정량적 위험도 평가(QRA)를 통해 검증하여 방재설비 계획에 대한 적정성을 검토하였으며 적용대상 터널에 대한 제원은 도표 2, 3과 같다.

도표 2. 터널제원

터널명	연장 [m]	구배 [%]	단면적 [m ²]	둘레길이 [m]	대표직경 [m]	갱문형상	
						시점부	종점부
○○터널	2,145	-0.9	75.8	43.17	7.02	벨마우스형	벨마우스형

도표 3. 장대터널(○○터널) 피난연락갱, 대형대피소 위치 및 갱문 형상



3.4 해석조건

위험도 분석을 수행하기 위한 해석조건은 도표 4와 같이 3개의 경우에 대한 대안을 분석하였다. 1차원 시뮬레이션 해석은 Simulex를 사용하였고, 3차원 시뮬레이션은 Fluent를 사용하였다.

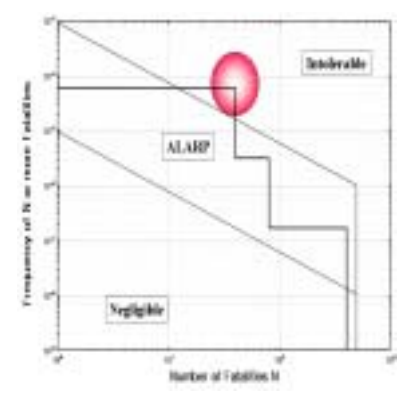
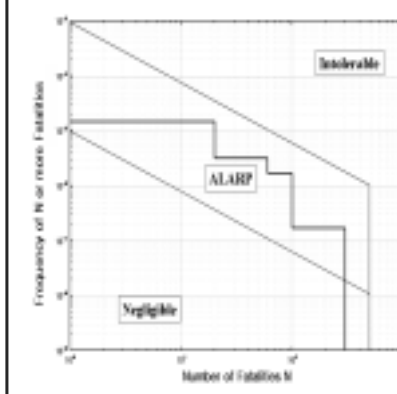
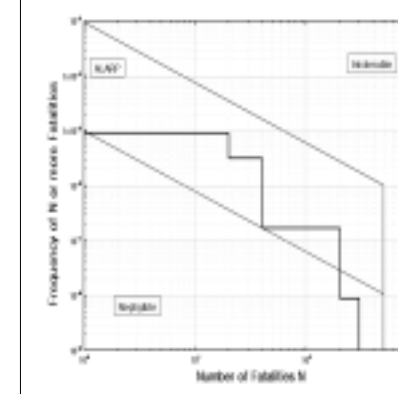
도표 4. QRA분석 해석 조건 및 가정

해석조건	<ul style="list-style-type: none"> ·홍콩 ALARP를 기준 (10명사망 - 10^{-4}~10^{-6}) ·대안 1 : 본선터널 1개소 - 본선터널중앙 화재발생 ·대안 2 : 피난연락갱1개소, 연결송수관 설비 추가 - 본선터널중앙 화재발생 ·대안 3 : 피난연락갱2개소, 연결송수관 설비 추가 - 본선터널중앙 화재발생 		
차량 종류	최고 열방출량	최고열방출량도달시간	적용
철제 IC객차 1량	12MW	20분	
철제 IC객차 10량	40MW	-	
철도터널방재기준	15MW	-	○
화재강도의 경우 철도터널방재기준에 따라 15[MW] 선정후 최고 열방출 도달시간을 20분으로 선정			

4. 분석결과

해석조건 및 가정에 따라 각각의 대안별로 분석을 수행하고, 이에 대한 결과를 도표 5와 같이 정리하였다. 대안 1의 경우 위험도가 6.40×10^{-4} 에 Intolerable 구간이 발생하여 불만족스런 결과가 나타났다. 대안 2의 경우 위험도는 1.96×10^{-4} , 대안 3의 경우 1.63×10^{-4} 로 홍콩의 ALARP기준을 만족하고 있다. ALARP는 실행할 수 있는 한 위험도를 낮게 하는 안으로서 경제적인 측면을 고려할 때 피난연락갱 1개소와 연결 송수관 설비를 추가한 대안 2가 가장 합리적인 방재설비 방안으로 판단된다.

도표 5. 대안별 분석 결과

대안 1	대안 2	대안 3
		
<ul style="list-style-type: none"> · Risk = 6.40×10^{-4} · Intolerable 구간 발생 	<ul style="list-style-type: none"> · Risk = 1.96×10^{-4} · 전구간 ALARP 만족 	<ul style="list-style-type: none"> · Risk = 1.63×10^{-4} · 전구간 ALARP 만족

5. 결론

기존 철도의 직선화 및 복선화로 인한 터널구조물 증가에 따라 보다 합리적인 방재대책이 필요하다. 이에 본 논문에서는 설계단계에서 효율적으로 사용할 수 있는 정량적 위험도 분석에 의한 터널방재시설 방안을 제시하였다.

적용 예와 같은 1.2km터널의 경우 피난연락갱 1개소와 연결 송수관 설비를 갖춘 형식이 실행할 수 있는 한 위험도를 낮게하는 안으로 선정되었다. 이는 중소규모(5.0km이하)에 대한 기준이 없는 국내 사정을 고려해 볼 때 중소규모의 터널방재설비의 향후 유사 설계에서 모범적인 사례라 판단된다.

참고문헌

1. 홍선호 외 3명(2003), “철도안전관리를 위한 사고자료관리 D/B구조에 관한 기초연구”, (한국철도학회 03 추계학술대회 논문집(II), pp.241-246
2. 왕중배 외 2명(2003), “철도화재 안전개선대책수립을 위한 위기관리프로그램 개발 연구”, 한국철도학회 03 추계학술대회 논문집(II), pp.235-240
3. 리스크매니지먼트서포트(2003), "철도터널 정량적 화재 위험성 평가"
4. 박찬우 외 3명(2005), “철도사고 위험분류 및 원인분석에 관한 연구”, 한국철도학회 05 추계학술대회 논문집, pp.599-604
5. 곽상록 외 3명(2003), “철도시스템의 확률론적 위험평가 모델 개발 연구 - 터널화재 위험도 평가에의 적용”, 한국철도학회 03 추계학술대회 논문집(II), pp.265-270
6. 곽상록 외 3명(2004), “확률론적 기법을 활용한 철도터널의 화재사고 시나리오의 구성”, 한국철도학회논문집, 1738-6225, 제7권4호, pp.302-306
7. 미 NFPA(2005), “SFPE handbook of Fire Protection Engineering 3rd”
8. 왕중배 외 3명(2003), “철도터널 및 지하구간에서의 화재사고 위험성 분석 연구”, 한국철도학회 03 추계학술대회 논문집(II), pp.271-276