

호남고속철도터널의 정량적 위험도 분석(QRA)을 위한 세부기준수립 및 적용사례

Case Study on the detailed standard setting and Application for QRA in Honam high speed railway tunnel

김선홍, 문연오, 석진호, 김기림, 김찬동, 유호식 ((주)유신코퍼레이션)
Kim, Seon-Hong Moon, Yeon-Oh Seok, Jin-Ho Kim, Ki-Lim Kim, chan-Dong Yoo, Ho-Sik

ABSTRACT

Although the accident rate is lower than the road tunnel, fire in railway tunnel can bring large damage of human life. In the high speed railway tunnel, the possibility of the railway-disaster (fire) is growing in consideration of the speedy railway and the tunnel length.

For that reason, MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) published "Rules about the Safety Standard of Railroad (2005.10.27)" and "The Detailed Safety Standard of Railroad (2006.9.22)". According to those, QRA(Quantitative Risk Analysis) technique is recommended to be applied to railway tunnel design which is longer than 1km for assuring the safety function and estimating the risk.

However, it is difficult to perform the disaster prevention design due to lack of the detailed standards about event scenario, fire intensity, incidence rate of accidents etc.

Therefore, This paper introduces the case of tunnel design for disaster prevention of the Honam high speed railway including the detailed standards of QRA and reasonable safety facilities.

Key words : Q.R.A, the disaster prevention design, Honam high speed railway tunnel

초록

철도터널에서의 화재사고는 도로터널에 비하여 사고발생률은 낮지만, 일단 터널내에서 화재사고가 발생하면 대형 참사로 이어질 가능성이 높다. 특히, 고속철도터널은 일반철도터널에 비하여 선형 등의 제약조건으로 인한 터널의 장대화로 터널내 화재사고 발생시 대피승객의 이동거리가 증대될 수 있다.

터널내 화재사고 발생시 승객의 대피안전성을 증대시키고자 국토해양부에서는 철도시설 안전기준에 관한 규칙(2005년 10월 27일)과 『철도시설 안전세부기준(2006년 9월 22일)』을 고시, 연장 1km 이상의 모든 신규터널에 대하여 안전성분석을 수행하여 방재계획을 수립토록 하였으며, 이후 모든 철도터널 설계시에 정량적 위험도 분석(Quantitative Risk

Analysis)에 의한 안전성 분석을 수행하고 있다.

그러나, 정량적 위험도 분석에 필수적인 사고시나리오, 화재강도, 사고빈도 추출, 분기비 등에 대한 세부 기준이 아직 미비하여 철도터널방재설계에 어려움이 있어 기존 법규의 요구 사항을 우선 만족시키고, 추가로 안전을 향상시키기는 방향으로 진행되고 있다.

이에 본 논문에서는 호남고속철도 터널방재설계를 위한 정량적 위험도 분석 세부기준 수립 및 실행가능한 합리적인 수준의 터널방재설계 방안을 제시하고자 한다.

1. 서론

터널내에서의 방재는 공간적인 특성상 사고대응이 용이하지 않으므로, 사전예방이 가장 바람직하며, 화재열차의 터널내 정차상황을 대비하여 적절한 안전시스템을 강구해야한다.

안전시스템을 구축하기 위해서는 크게 두 가지 부분으로 나눌 수 있다. 첫째는 막대한 비용이 요구되는 구조물 필요공간의 확보 및 방재시설의 설치에 대한 투자가 필요하고 둘째로 관련 인력의 확보와 정비, 재해예방활동과 사고초기 신속대응 대책부터 유관기관과의 협조 체제 및 사후 운행재개까지 대응 시나리오를 구축하는 방재 시스템의 수립이 필요하다.

방재시설의 설치는 터널 특성을 고려하여 최적의 방재시설을 선정하여야 하며, 고속철도의 경우, 운행속도가 빠르기 때문에 이에 상응하는 안전시설의 고려가 필요하다.

국토해양부에서는 2003년 11월에 고속철도 터널방재기준을 제정한 이후, 철도시설 안전기준에 관한 규칙(2005년 10월 27일)과 『철도시설 안전세부기준(2006년 9월 22일)』을 고시, 연장 1km 이상의 모든 신규터널에 대하여 안전성분석을 수행하여 방재계획을 수립토록 하였으며, 이후 모든 철도터널 설계시에 정량적 위험도 분석(Quantitative Risk Analysis)에 의한 안전성 분석을 수행하고 있다.

따라서, 호남고속철도 기본설계에서는 철도시설안전기준에 관한 규칙에 근거한 호남고속철도 설계지침에 따라 안전성분석을 수행하여 방재계획을 수립하였으나, 안전성 분석시 사고시나리오, 화재강도, 사고빈도 추출, 분기비 등에 대한 세부 기준의 미정리로 인하여 터널방재설계시 곤란하였다.

이에, 본 논문을 통하여 호남고속철도 터널의 운영중 위험수준을 평가하기 위한 정량적 위험성 분석 수행기준(안)을 제시하여 향후 호남고속철도 터널의 정량적 위험성 분석을 수행함에 있어 분석결과의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 방재계획을 위한 기준 검토

외국에서 몽블랑 도로터널의 화재 및 영불해저 철도터널의 화재사고와 국내에서는 2003년 2월에 발생한 대구지하철 화재사고와 그해 6월에 발생한 홍지문 도로터널 화재사고로 방재 대책에 대한 인식제고와 함께 국가 안전정책의 일환으로 2003.11. 고속철도 터널방재기준 제정되었으며, 이후 방재기준에 대한 제정 및 개정경과는 표 1.과 같다.

철도시설 안전기준에 관한 규칙과 세부기준의 “제3장 터널 방재기준”은 연장 1km 이상의 일반철도와 고속철도 터널에 적용되며, 설계하고자 하는 철도시설은 다른 법령에서 규정하고 있는 특별규정을 제외하고는 이 규칙과 세부기준에 의하여 설계가 이루어지도록 마련되었다.

이러한 규칙 및 기준의 특징은 표 2.에서 같이 주요방재시설을 안전성분석 결과에 따라 설치하도록 하여 많은 비용과 시간이 들어가는 방재시설에 대하여 합리적인 설치방안을 제시한 것이다. 그러나, 안정성 분석을 수행하기 위한 세부기준의 미정리로 인하여 안전성 분석결과와의 차이가 크므로, 현행 관련법규에서 정하지 못한 정량적 안정성 분석을 수행하기 위한 세부 분석 방안 제시 필요하다.

〈표 1.〉 터널방재기준 제정 및 개정경과

구 분	방재기준	비 고
2003.11	고속철도 터널방재기준 제정	·대구지하철 화재(2003.2.18)후 국가 안전정책의 일환으로 수행
2005.09.	고속철도 터널방재기준 개정	·당초기준에 대한 감사원 기술감사에서 보완 권고 (2005.2.) ·주요개정사항 - 대피거리 2.5km로 단축(당초 5km), 구난대피소 성능 개선 - 터널연장 2.5km 초과시 연결 송수관 설비 설치 (당초 "소화·구조 차량 실효성 없음"으로 판단)
2005.10.	철도시설 안전기준에 관한 규칙 제정	·1 km이상 터널에 대해서 안전성분석결과에 따라 터널 방재 시설 설치
2006.09.	철도시설 안전세부기준 제정	·철도시설 안전기준에 관한 규칙 제4조의 규정에 의거 철도시설 안전에 관한 세부기준 제정

〈표 2.〉 주요 방재시설 기준 비교

구 분	경부고속철도 설계기준	철도시설안전기준
대피통로	2.5km 이내 간격으로 설치 구난대피소는 0.5~1km 이상 이격	안전성 분석 결과에 따라 설치
방재구호지역	2.5km 이상 터널에 설치	1km 이상 터널에 설치
연결송수관 설비	2.5km 이상 터널에 설치	안전성 분석 결과에 따라 설치
제연시설	대피통로 접속부에 설치	안전성 분석 결과에 따라 설치
배연설비	대피통로 간격 2.5km 초과시, 필요에 따라	안전성 분석 결과에 따라 설치

3. 안전성 분석(QRA) 적용의 세부기준

QRA란 위험의 상대적인 크기를 파악하기 위한 방법으로 위험 크기를 정량화시켜 사회적 위험기준과의 비교를 통하여 주요시설물의 안전성을 평가하는 방법이다.

이러한 정량화된 위험의 크기를 사회적 위험기준과 비교하여 방재설비의 적정성을 평가할 수 있으며, 위험의 크기는 다음의 식을 통해 정량화할 수 있다.

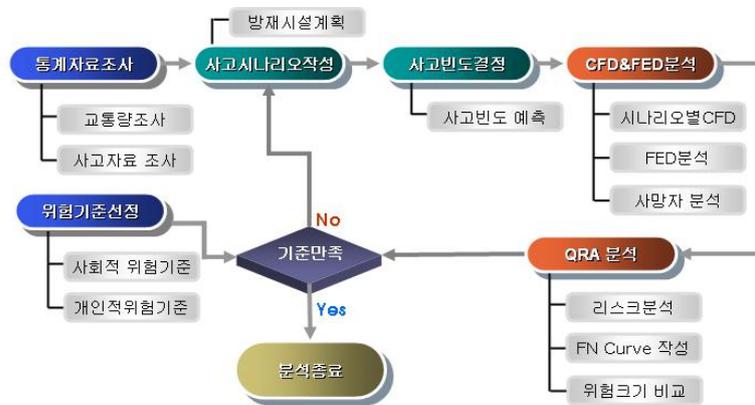
$$\text{위험(Risk)} = \text{사고발생확률(Frequency)} \times \text{손실(Fatalities)}$$

철도안전세부기준에서는 QRA 수행기준을 표 3.에서와 같이 사고시나리오 작성, 사고발생확률 계산, 사고영향분석, 안전성 분석, 안전대책 수립의 순서로 단계별로 수행하게 되어 있으며, 상세기준은 아직 정립되어있지 않다.

〈표 3.〉 철도안전세부기준 안전성 분석 수행 절차 및 문제점

구분	내용	문제점
1. 잠재위험 확인	·사고발생시 전개될 수 있는 가능한 시나리오 작성	
2. 사고발생확률계산	·각각의 시나리오 단계별 사건발생 가능성 산정	·국내 고속철도에 대한 사고자료 부족
3. 사고영향 분석	·각각의 시나리오 단계별 사고 영향에 의한 결과분석	·각 시나리오 단계별 안전시설의 사고 피해영향 감소 적용 기준 없음
4. 안전성 분석	·각각의 시나리오 단계별 피해 정도 산출	
5. 안전대책 수립	·안전성 분석결과 사회적 위험기준을 만족하지 못하는 경우, 요구수준에 부합하는 안전대책 수립	·안전수준(사회적 위험기준)에 대한 기준 없음

따라서, 호남고속철도 방재설계에서는 철도안전세부기준에 근거하여 그림 1.과 같이 QRA를 수행하였으며, 정량적 위험성 분석에 적용된 사고시나리오, 화재강도, 사고빈도 추출, 분기비 등은“호남고속철도 기본설계”시에 수행된 방재 자문회의를 통해 결정된 값을 적용하였다.



〈그림 1.〉 호남고속철도 QRA 수행절차

3.1 사회적 위험기준

호남고속철도의 정량적 위험성 분석을 수행하기 위한 사회적 위험기준은 타 교통수단에 비해 상대적으로 안전한 철도터널의 기대수준을 반영하여, 건설교통부에서 수행한 도로터널 정량적 위험성 분석 연구과제에서 제시하고 있는 영국 HSE 기준을 국내 실정에 맞는 사회적 위험기준이 제시될 때까지 상기 기준을 사회적 위험기준으로 선정하였다.

또한, HSE 기준보다 안전목표가 높은 홍콩 PHI 기준과의 비교를 통해 위험수용여부를 다각적으로 검토하였다.

〈표 4.〉 사회적 위험기준

구분	영국 HSE 기준	홍콩 PHI 기준
사회적 위험기준		
위험구분	·Intolerable ·ALARP (As low as reasonably possible) ·Negligible	·Unacceptable ·ALARP (As low as reasonably possible) ·Acceptable
위험빈도	·1명 사망확률 : $10^{-1} \sim 10^{-4}$ ·1000명 사망확률 : $10^{-4} \sim 10^{-7}$	·1명 사망확률 : $10^{-3} \sim 10^{-5}$ ·1000명 사망확률 : $10^{-6} \sim 10^{-8}$
비고	·ASDS 기준과 유사함 ·국내 도로터널의 위험성평가에 인용됨	·잠재적 위험시설에 적용함 ·엄격한 기준으로 국내 QRA에 인용됨

3.2 화재 강도

화재강도는 실제 사고사례나 실차실험 등의 자료를 적용해야 되나, 국내의 경우 고속철도 화재사고 사례는 없었으며, 일반철도 화재사고 발생 사례도 터널내 화재사고는 발생되지 않아, 철도안전세부기준에서는 화재강도를 10 MW 이상 적용할 것을 규정하였다.

이에, 호남고속철도에서는 고속열차 화재강도 기준을 선정하기 위해 Eureka 499 fire test 자료, FIT 보고서 및 기타 국외 발표논문을 참고하였다.

Eureka 499 fire test 중 독일 ICE 열차 화재는 화재 초반부의 최대 화재강도가 약 8MW 정도로 관찰되었으며, FIT 보고서에는 DIN5510 및 EN45545 기준을 만족하는 신규 열차의 경우 화재강도를 6MW의 화재강도를 제안하고 있어, 화재강도의 불확실성을 고려하여 10MW의 화재강도를 선정하였다.

〈표 5.〉 객차 및 기관차 화재강도

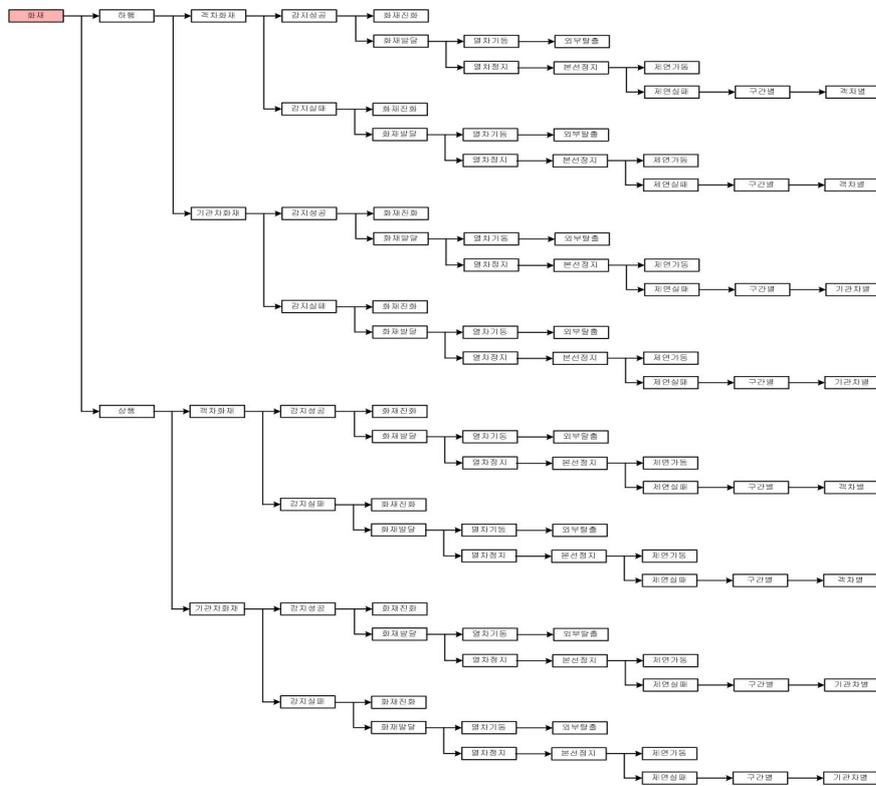
구분	객차 화재강도	기관차 화재강도
화재곡선		
최대강도	·10 MW	·10 MW
화재성장율	·0.025 MW/min ²	·0.1 MW/min ²
비고	·Eureka 499 fire test 자료 인용	·TGV 기관차 변압기 오일 1000kg

3.3 사고시나리오 구성

사고시나리오의 구성은 화재열차가 터널내부에 정차할 경우 피난객의 탈출 및 화재연기 확산의 다양한 조합을 고려하기 위해 사고수법(ETA)을 적용하였으며, 구성된 사고시나리오의 단계별 진행과정은 다음과 같다.

- 1단계 : 상행 또는 하행으로 주행중인 열차의 객차 또는 기관차에 화재가 발생하게 되어 이 상황을 열차에 설치된 화재감지기 또는 승객에 의해 감지하게 됨.
- 2단계 : 감지 후 승객 또는 승무원에 의해 초기소화가 진행되며, 초기소화가 완료될 경우 화재시나리오는 종료되게 함.
- 3단계 : 그러나 초기소화 실패할 경우, 열차가 기동을 지속할 경우에는 터널 외부로 탈출하게 되지만, 열차의 기동고장으로 연결되면, 터널내에 정차하여 탈출을 개시하게 함.
- 4단계 : 이때 터널내에 설치된 배연설비의 가동유무 및 가동시의 운전방향 오류 등에 따라 시나리오가 분기되나, 검토단계에서는 배연설비의 설치는 고려하지 않음.

사고시나리오 구성시 비상조명은 일반적으로 일반조명과 는 별도로 비상조명이 추가적으로 60분 동안 작동할 수 있는 성능을 확보하도록 요구하고 있으므로 작동 및 고장여부는 고려하지 않았으며, 열차 화재 및 충돌, 탈선에 의한 화재도 포함한 것으로 고려하였다. 또한, 연결송수관설비는 화재사고 후 투입된 소방대에 의해 가동되는 설비로 대피승객의 피해 경감보다는 연소확대방지에 적합한 방재시설로 판단되어 이의 고려는 제외하였다.



〈그림 2.〉 사고시나리오

3.4 시나리오 분기비율

사고 시나리오는 구성상 분기시 분기비율은 정량성 위험성 분석 결과의 신뢰성에 중요한 영향을 미치며, 호남고속철도에서는 각종 국내외 자료를 참고하여 결정하였다.

〈표 6.〉 분기비율

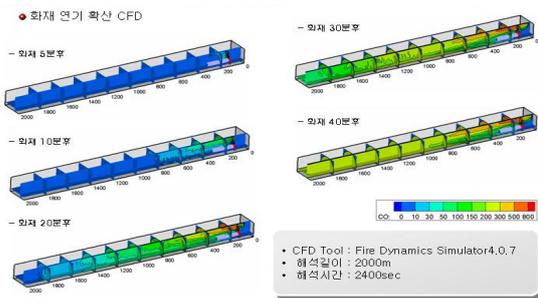
구분	분기비 적용	비고
화재분기	·객차 : 기관차 = 0.7 : 0.3	·영국 RSSB(Rail Safety and Standards Board) 2004 자료 참고
감지성공	·성공 : 실패 = 0.9 : 0.1(0.8:0.2)	·장비의 일반적인 실패율 고려 ·불확실성을 고려하여 0.9~0.8 적용
화재진화	·성공 : 실패 = 0.9 : 0.1(0.8:0.2)	·6.5 kg ABC 소화기 소화능력 고려 ·불확실성을 고려하여 0.9~0.8 적용
열차기동	·성공 : 실패 = 0.99 : 0.01	·AREMA 자료의 0.98 값 참고 ·신뢰도 향상을 고려하여 0.99 적용

3.5 사망위험 평가

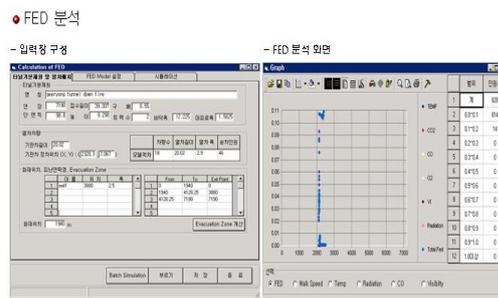
사망위험평가는 각 시나리오별 수행한 화재연기 확산 CFD 를 통해 계산된 각 지점별 독성가스의 확산 정도와 피난자의 위치를 비교 분석하여 화재연기의 흡입정도를 계산, 피난자의 사망위험을 분석하였다.

분석모델은 가시거리 감소에 따른 피난속도 감소를 고려하여 보다 사실적인 피난상황 고려 가능하고 열에 의한 복사 위험, CO2에 의한 CO 호흡량 증가를 반영할 수 있는 Purser의 FED(Fractional Effective Dose) 모델을 적용하였다.

사망위험기준은 ISO/DTS 13571의 규정에 있는 사망위험기준 및 부상자에 대한 등가사망 기준을 적용하여 사망위험인 $FED > 0.3$ 을 유독가스 흡입의 불확실성을 고려하여 이론적 사망으로, $0.1 < FED < 0.3$ 을 중상으로 처리하여 등가사망자를 평가하였다.



〈그림 3.〉 CFD 분석결과



〈그림 4.〉 FED 분석결과

4. 호남고속철도의 안전성 분석 결과

호남고속철도 터널은 내공단면적 96.7 m²의 복선단면으로 양방향 대피로와 Way finding system이 설치되어 있어 이를 기본적인 방재설비로 고려하였다.

안전성 분석은 호남고속철도 노선중 연장 3,325m의 장재터널과 6,340m의 영곡터널에 대하여 사회적 위험기준, 화재강도, 사고시나리오 등의 세부방안을 적용하여 방재시설의 적정규모를 분석하였다.

안전성 분석결과, 연장 3,325m의 장재터널의 경우 위험크기가 2.4587×10^{-5} 으로 HSE기준 및 PHI 기준 고려시 ALARP 구간(허용가능구간)에 포함되어 추가적인 방재시설은 고려하지 않는 것으로 나타났으며, 연장 6,340m의 영곡터널은 대피통로(사갱1개소)를 설치할 경우에 허용가능구간에 포함되는 것으로 분석되었다.

장재터널과 영곡터널의 안정성 분석결과 및 이용한 방재시설 설치 개요도는 표 7. ~ 표 10.에 상세히 나타나 있다.

〈표 7.〉 장재터널의 안전성 분석 결과

구 분	결 과	비 고
연장 및 구배		·총연장 : 3325m
피난 시나리오	·선두부 화재 : 후미방향 대피 ·중양부 화재 : 양방향 대피 ·후미부 화재 : 선두방향 대피	·화재열차는 터널 중앙에 정차함
방재설비 고려사항	·대피로 : 대피로를 통한 승객의 하차 ·Way finding system : 비상조명 및 유도표지 설비는 기본적으로 작동하는 것으로 고려함	·전원의 이중화 및 비상전원고려
분석결과		<ul style="list-style-type: none"> ·위험의 크기는 2.4587×10^{-5} 임 ·HSE 기준 고려시 기준 하부에 위치하여 적절한 방재시설이 계획된 것으로 분석됨 ·PHI 기준 고려시에도 ALARP 구간에 포함되어 적절한 방재시설이 계획된 것으로 분석됨 ·따라서, 추가적인 방재시설 계획은 고려하지 않음

참고문헌

1. 김원국, 송범, 전덕찬, 2003, “QRA를 이용한 철도터널 방재설계에 관한 연구”, 대학토목학회 정기학술대회, pp 4705~4790
2. RSSB(Rail Safety and Standards Board), 2004, "Profiles of Safety Risk on the UK Mainline Railway", Report
3. Det Norske Veritas Ltd, 2002, "Application of QRA in operational safety issues", Health and safety executive
4. Mattias Persson, 2002, "Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel", Lund University
5. Yoav Arkin, 2002, "Using quantitative risk assessment(QRA) and cost benefit analysis(CBA) to prioritize fire and life safety risk reduction measures in old railway tunnels", AREMA Annual conference
6. Haukur Ingason and Anders, 2004, "Recent achievement regarding measuring of time-heat and time-temperature development in tunnels", ITA-AITES first conference, pp 87-96
7. Boon Hui Chiam, 2005, "Numerical simulation of a metro train fire", Canterbury university
8. E Casale, E Cesmat, J.P Vantelon, M Legrant, E Verbesselt, 2006, "Influence of longitudinal ventilation on the heat release rate of a TGV engine fire", BHR Group AVVT 12, pp 95-109
9. E.Ruffin, A Carrau & C Cwinklinski, 1999, "Numerical Simulation of Locomotive Fires in the Lyon-Turin Tunnel", International Conference, pp 235-244
10. 왕종배, 홍선호, 김상암, 박옥정, 2003, “철도터널 및 지하구간에서의 화재사고 위험성 분석연구”, 한국철도학회 추계학술대회, pp 271-276
11. American National Standards Organization, “ISO/DTS 13571 Life threat from fires-Guidance on the estimation of time available for escape using fire data“
12. 건설교통부, “철도시설 안전기준에 관한 규칙”, 건설교통부령 제 476호
13. 건설교통부, “철도시설 안전세부기준”, 건설교통부 고시 제 2006 - 395호
14. Boras, “Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels”, Sweden
15. Subway Environmental Simulation 4 User Guide
16. National Institute of Standard and Technology, 2006, "Fire Dynamics Simulator and Smokeview User Guide", BFRl
17. "SFPE 방화공학 핸드북 제3판 1권, 2권“, 한국화재보험협회
18. 임재현, 김영근, 김동현, 정찬목, 한국철도학회, 2006, “QRA에 의한 철도터널 방재안 전성 평가”, 한국철도학회 추계학술대회, pp 21-31
19. Louise C.Speitel, 1995, “Toxicity Assessment of Combustion Gases and Development of a Survival Model”, FAA
20. Palsson, 2004, "Risk Management in Hvalfjordur Tunnel", Lund University
21. David J Bell, Peter J Floyd, "Societal Risks", Middlesex University and Risk

- & Policy Analysts Limited
22. M.Rausand, 2005, "Some basic risk concepts", Norwegian University
 23. S.N.Jonkman and J.K.Vrijling, P.H.A.J.M van Gelder B.Arends, 2003, "Evaluation of tunnel safety and cost effectiveness of measures", Safety and Reliability
 24. Det Norske veritas ltd, 2002, "Application of QRA in operational safety issues", HSE
 25. Fathi Tarada, Rudolf Bopp, Samuel Nyfeler, Kwang-soo Jegal, Deog-Su Kim, 2000, "Ventilation and Risk Control of the Young Dong Rail Tunnel in Korea", International conference on majot tunnel and Infrastructure Project
 26. Knoflacher H, Pfaffenbichler P.C, "A comparative risk analysis for selected austrian tunnels", Vienna University
 27. Hakan Frantzych, 1998, "Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering", Lund University
 28. Bouissou Charlotte, Ruffin Emmanuel, Defert Raphael, Prats Franck, Dannin Eric, "A new QRA model for rail transportation of hazadous goods", INERIS
 29. Dan Modi, "Application of Risk Analysis to Product Safety", Alcon Research Ltd
 30. Stanford University, 2007, "Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication"
 31. Tara Barden, Jason Bro-wn and et al, "Modeling Train Fires in Fire Dynamics Simulator", WPI
 32. IT, final reports of the FIT network, "Annex1~Annex4"
 33. 김성찬, 유홍선, 최영기, 김동현, 2004, "화재성장 모델이 객차내 화재 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구“, 한국 철도학회지, 제7권 제3호, pp 180-185
 34. 홍선호, 왕종배, 곽상록, 이우준, 2003, “철도안전관리를 위한 사고자료관리 D/B구조에 관한 기초연구”, 한국철도학회 추계학술대회, pp 214-246
 35. 신제영, 1996, “누구나 알아야 할 화재진압요령”, 한국소방안전협회 통권 91호
 36. IES, SIMULEX, User manual
 37. 건설교통부, 2006, “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발”, pp 141-143
 38. Bjorn Hedskog et al, 1998, "Deterministic analysis of a fire in Stenungsbaden Yacht Club", Lund University
 39. 철도기술연구원, 2006, “철도터널 안전성 분석 평가절차서(감리용)”
 40. M Molaq & L Slutis, "Quantitative Risk Analysis to Optimise Fire Safety During Basic HSL South Tunnel Design", TNO