

QRA 분석을 이용한 철도터널 방재설계 사례

김도식, 김우성, 김영근, 이두화 ((주)삼보기술단),
이호석 ((주)비엔텍)

1. 서 론

정량적 위험도분석(Quantitative Risk Assessment)은 ‘위험’에 대한 추상적인 접근법에서 탈피하여 각각의 설계요소를 평가하고 정량적인 수치를 산출하는 위험분석법으로써 사회시설물 설계 시 실행할 수 있는 한 위험도를 낮게 하는 기법으로 경제성 원칙에 입각한다.

표1은 국내외 주요 철도관련 방재기준을 나타내었다. 철도터널의 경우 지하철, 고속철도설계기준과 달리 터널방재기준이 명확하게 설정 되어 있지 않은 실정이며, 그 기준 또한 최소 안전기준을 제시하거나, 터널연장 5km 이상인 산악터널의 경우에 적용하도록 하고 있다.

본 사례연구의 대상터널은 동남부 수도권에 위치한 연장 약 4.1km의 산악터널로써 철도터널 관련 방재기준보다 향상된 터널방재성능이 요구되었다. 따라서 정량적 위험도분석을 수행하여 도시지역 안전기준에 만족하는 경제적인 터널 내 방재구조물 계획을 실시하였다.

표 1. 국내외 주요 철도터널 방재기준

구 분	방 재 기 준	발 행 기 관	발 행 년 도	주 요 내 용
국 내 기 준	철도 설계기준 (노반편 : 방재시설)	건설교통부	2004. 12	원활한 대피·구조 활동을 위한 최소기준 제시
	고속철도 설계기준 (노반편 : 터널방재)	고속철도 건설공단	2003. 11	터널연장별 구체적인 세부 설치기준을 제시
	철도터널 방재시설 설치기준(안)	한국철도 시설공단	2004. 02	5km 이상의 산악터널에 대한 방재기준 제시
	철도터널 안전기준(안)	건설교통부	2005. 예정	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

2. 정량적 위험도 분석

2.1 QRA적용 분야

정량적 위험도 분석은 통계데이터를 기반으로 위험을 수치적으로 계산할 수 있는 모든 분야에 적용가능하며 여러 분야에서 적용되고 있다. 건설, 교통, 환경, 산업공정, 경제분야 등에서 위험을 관리하고 예측하여 피해를 감소시키는 목적으로 이용되고 있으며 경제적 피해와 더불어 인명피해를 발생시킬 수 있는 다양한 사회분야에 적용되고 있다.

- 1) 토목, 건축 : 병원, 아파트 및 고층건물 등의 화재, 공항, 터널 등
- 2) 자연환경 : 하천 및 해수 범람, 산림화재, 어업 등
- 3) 운송 : 지하철, 도로, 철도, 항공, 해운 등
- 4) 플랜트 : 화학공정, 원자력 발전공정 등

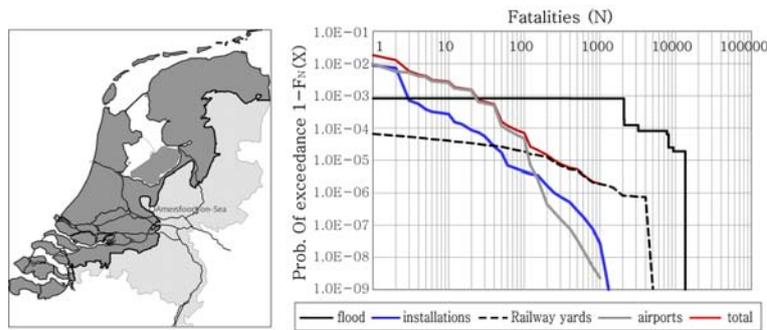


그림 1. 네덜란드의 해수범람에 대한 위험분석 예시

다양한 분야에 적용할 수 있는 위험분석기법을 시행하는 국가 또는 기관에서는 그 기준을 제정하여 권고하고 있다. 국내에서는 산업재해를 예방하기 위해 산업안전관리공단의 KOSHA Code를 통해 위험평가에 대한 기술적 사항을 제공하고 있다.

표 2. 각국의 위험분석에 대한 기준

구 분	기 준	내 용
노르웨이	Norwegian Standard NS 5814	Requirements for risk analysis
덴마크	DS-Information DS/INF 85	Risk Analysis
유럽	European Standard EN 1050	Safety of Machinery
국제기준	IEC International Standard nr 60300-3-9	Risk Analysis of technological system
영국	British Standard BS 8444	Guide to analysis of technological systems
호주/ 뉴질랜드	Australian/New Zealand Standard AS/NZS 3931, AS/NZS 4360	Risk analysis of technological systems
캐나다	Canadian Standard CAN/CSA-Q850	Risk management
국 내	KOSHA CODE G-4-2003	위험성 평가

2.2 QRA를 이용한 사회시설물의 설계흐름

QRA는 특정한 분석기법을 이용하여 위험을 분석하고 그 결과를 평가기준에 견주어 적절한 수준의 위험도를 만드는 과정이기 때문에 적용하는 대상 분야에 상관없이 일반적인 분석흐름을 가지고 있다. 이러한 분석과정 중 QRA의 근간을 이루는 부분은 위험을 계산하여 결과를 예측하는 부분으로 분석대상의 특성에 따라 다양한 방법론들이 연구되고 있으며 또한 실행되고 있다.

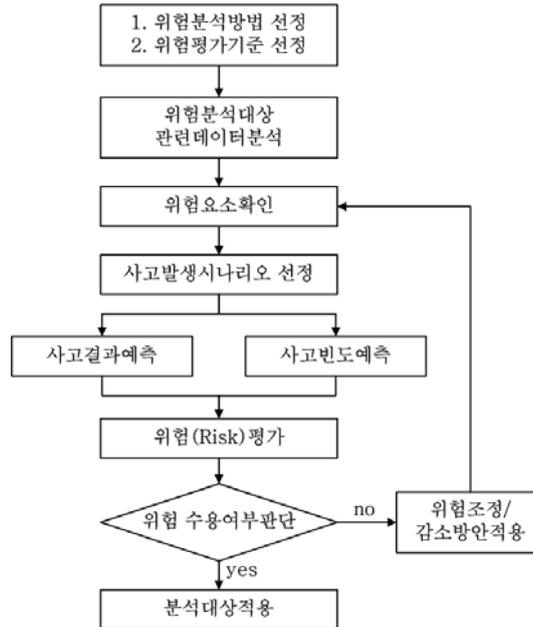


그림 2. QRA설계흐름

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

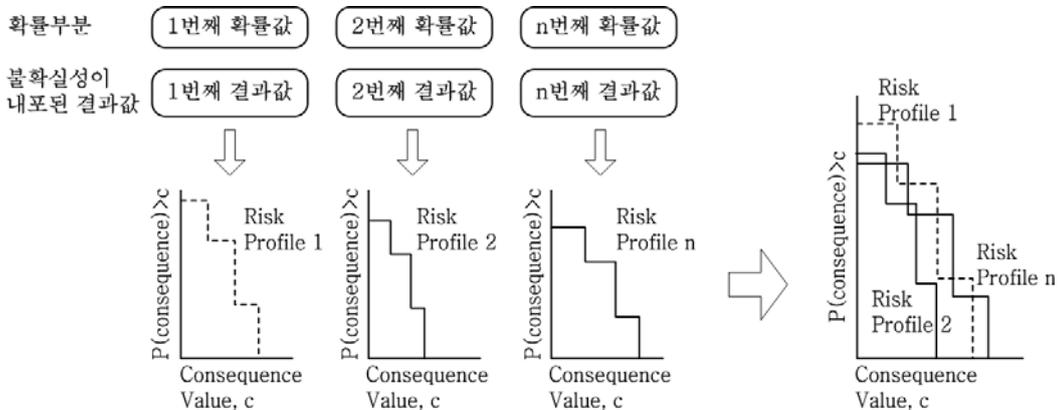


그림 3. 불확실성에 대한 Monte-Carlo Simulation 적용

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.

2.3 철도터널에 적용하기 위한 검토항목

열차 운행중 철도터널에서 발생할 수 있는 위험에 대한 평가를 인명피해로 가정했을 때 철도터널의 위험요소는 터널붕괴에 의한 피해, 열차충돌 및 탈선 시 충격에너지에 의한 피해, 화재사고에 의한 피해 등이 있을 수 있다. 이중 국내외 사고통계를 볼 때 터널 내 화재사고에 의한 인명피해가 가장 크게 발생한다.

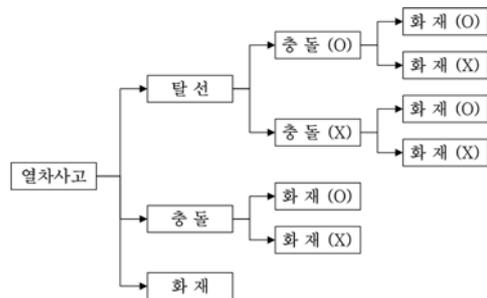
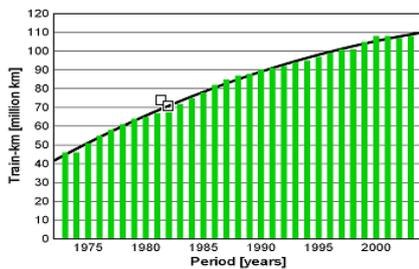
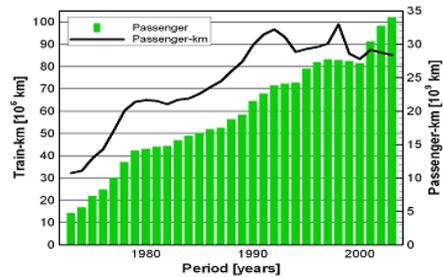


그림 4. 열차사고 시나리오

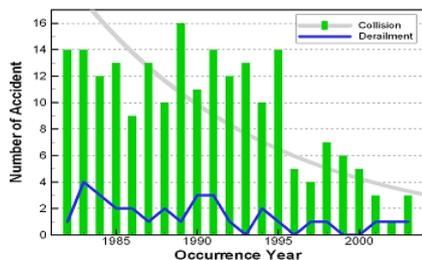
QRA분석에서는 그림5에 나타난 국내 철도통계를 이용한 확률적인 사고분석과 그림4의 열차사고 시나리오에 따라 철도의 3대사고인 탈선/충돌/화재를 모두 감안하여 산출할 필요가 있다.



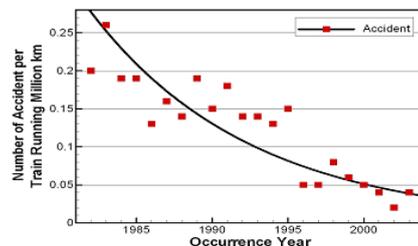
(a) 열차-주행거리(Train-km)



(b) 여객수송실적



(c) 열차사고



(d) 백만키로당 열차사고

그림 5. 국내 열차사고 통계

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

화재로 인한 위험요소의 발생은 다양한 실험과 연구 활동을 통해 유추된 방법, 즉 컴퓨터를 이용한 모사나 수치식으로 도출할 수 있다. 더욱이 화재로부터 발생하는 다양한 위험요소들을 통합하여 정량적인 위험데이터를 추출할 수 있는 방법들이 연구되고 제안되고 있는데 대표적인 방법이 국제표준화기구(ISO)에서 제안하는 ISO/TS 13571이다. ISO/TS 13571에서는 소방안전공학(Fire Safety Engineering)에 사용되는 화재위험성 분석방법의 하나인 FED(Fractional Effective Doses)를 통해 화재의 위험성을 정량적으로 산출한다.

FED는 시간변화에 따른 유독가스 및 열에 의한 인체반응을 누적하여 계산할 수 있기 때문에 터널 내에서 개별적으로 이동하는 승객을 대상으로 시간변화와 이동위치에 따라 독립적으로 계산하였을 경우 정상적인 상태에서 일률적으로 계산하는 방법에 비해 상당히 현실적인 분석이라 할 수 있을 것이다.

철도터널의 위험분석을 통해 도출한 정량적인 위험은 평가기준을 적용하여 그 적정여부를 판단하게 되는데 적정한도를 넘어서는 위험크기를 나타낼 때에는 다양한 위험감소방안을 모색하여 위험크기를 적정수준으로 낮춰야한다. 터널내 화재사고에 대한 궁극적인 위험감소 방법은 화재발생을 예방하는 것이 최우선이며, 화재사고 발생시 초기에 진화하여 위험요소를 제거하는 것이 다음이라 할 수 있다. 하지만 초기진화가 실패하였을 경우 신속하고 안전한 승객의 대피에 초점을 맞춰야 하며, 이를 위해서 외부 대피통로, 대피로 공간확대 등과 같은 구조적 방법이나 제연팬, 이중방화문 등과 같은 기계적인 방법을 위험감소를 위한 시나리오에 도입하여 보다 다양한 방법과 위험감소효과를 분석하는 것이 필요하다.

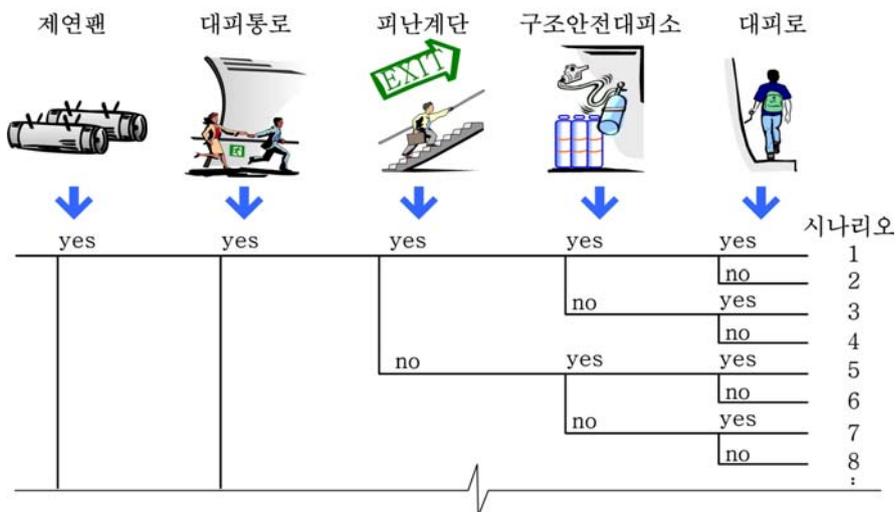


그림 6. 터널내 적용시설에 대한 시나리오

열차사고 시나리오, 사고통계 분석자료, 화재·피난시물레이션 등의 분석과정을 거쳐 철도 터널의 정량적 위험 평가는 F-N curve로 나타낼 수 있다. 이는 위험을 정량적인 수치인 “사고확률×사망자수”의 관계로 표현한 도표이며, 위험의 적정(관리)수준인 ALARP영역을 함께 나타낸다. ALARP(As Low As Reasonable Practicable)는 ‘실행할 수 있는 한 위험도를 낮게’하는 것으로 경제성 원칙에 입각하여 위험도를 낮추는 개념이며,

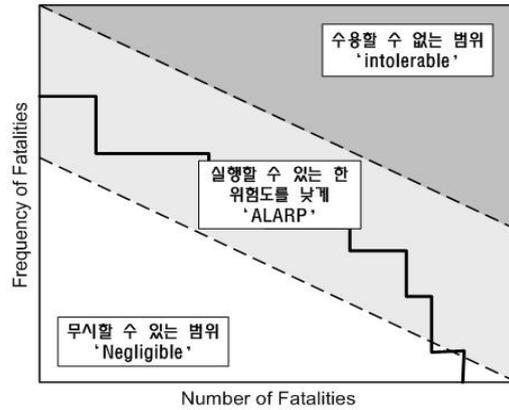


그림 7. F-N curve 개요

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.

3. 정량적 위험도 분석기법에 의한 터널 방재설계

3.1 개요

본 과업구간에 대한 위험도 분석은 적정수준의 방재안전 성능 확보를 위하여 기본계획 선형과 대안노선 선형에 대한 총 6가지 경우에 대하여 비교검토를 실시하였고, 각 선형 상에서 방재시설물 설치에 따른 위험도 산출 및 ALARP 준수여부를 중점적으로 검토하였다.

표 3. QRA분석 적용 검토안

구 분		방재안전시설
기본계획노선 (최대중단 10%)	탈출구 없음	대피로, 핸드레일, 비상조명
	탈출구 2개소	대피로, 핸드레일, 비상조명, 접속부 차단구역
대안노선 (최대중단 6%)	탈출구 없음	대피로, 핸드레일, 비상조명
	탈출구 1개소	대피로, 핸드레일, 비상조명, 접속부 차단구역
	탈출구 2개소	대피로, 핸드레일, 비상조명, 접속부 차단구역
	탈출구 2개소 +갱내대피소	대피로, 핸드레일, 비상조명, 접속부 차단구역 갱내안전대피소

표3는 각 검토안에 대한 주요특징을 나타낸 것이며 대피로, 핸드레일, 비상조명 등은 원활한 대피유도를 위한 기본적인 방재안전시설로 설정하였다.

QRA분석 시 기본가정 사항은 다음과 같이 설정하였으며, 적용 조건은 표4에 나타내었다.

- 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

표 4. QRA분석 적용 조건

구분	조건	비고
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
승차인원	2,362[명]	▪ 2020년 혼잡율 150% (교통영향평가)
피난방향	양방향	▪ 화원을 중심으로 양방향 대피
열차방향	양방향	▪ 상행 및 하행 진행시 위험을 동시에 고려

대피로 폭의 경우에는 대피로 폭에 따른 열차통과 대피시간을 산출하여 대피로 폭을 결정하였다. 그림8은 대피로 폭에 따른 열차대피시간을 나타낸 것으로 폭 1.2m이하에서는 대피로 폭이 넓어지더라도 대피시간 단축효율이 좋지 않은 것을 보여주므로 경제성을 고려하여 철도터널 최소 대피로 폭인 0.8m로 적용하였다.

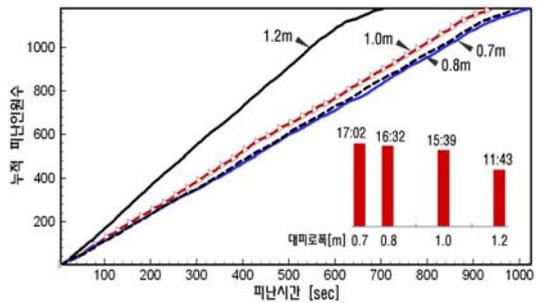


그림 8. 대피로 폭에 따른 대피시간

본 검토에서는 사갱접속부에 차단구역이 설치되어 있는 것으로 계획하였다. 이는 갱외탈출로인 사갱으로 연기 침투를 억제하여 사갱 전구간이 안전한 구역으로 확보하기 위한 시설이다. 차단구역은 2중 방화문과 연기침투 방지를 위하여 가압송풍기(차압팬)설비로 구성된 안전지역이다.

표 5. 접속부 차단구역 개요

구분	개요도	특징
차단구역 있음		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 사갱접속부에 차단구역설치 ▪ 방화문과 가압송풍기(차압팬)을 설치하여 본선으로부터의 유독가스 침투를 차단
차단구역 없음		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 방화문(차단구역)이 없는 경우 사갱으로의 대피시 위험성이 높음

3.2 기본계획 노선 분석결과

터널 전체 연장이 4,135m인 기본계획안(1)은 홍콩기준에서 ALARP기준에 만족하지 못하는 높은 위험도를 나타내고, 위험도가 Intolerable구역에 존재하는 부분이 많으므로 ALARP을 만족 시킬 수 있도록 위험도를 경감시키기 위한 방안이 필요하게 되었다.

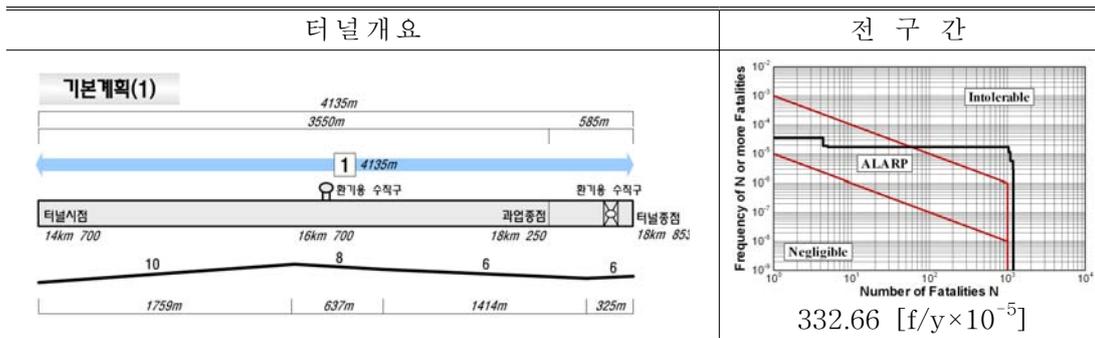


그림 9. 기본계획안(1) 분석결과

기본계획(2)는 2구간에서 가장 큰 위험도를 나타내고 있다. 2구간은 상향구배에서 하향구배로의 변곡점이 위치하며 화재 초기 8~10%의 종단경사의 영향으로 유독가스의 전파속도가 빠르며 화재 지속 시 종단경사 변곡점부근에서 유독가스의 정체가 예상돼 피난에 큰 위험요소로 작용하므로 전체 위험도는 ALARP 기준에 일부분 만족하지 못하는 안전도가 평가되었다.

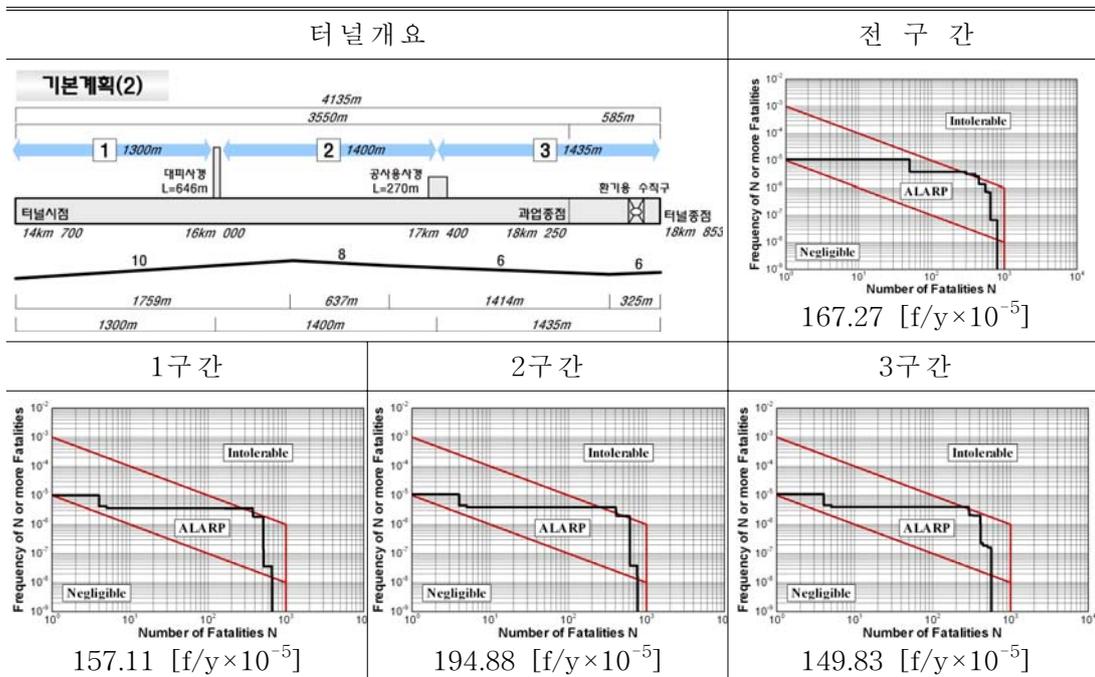


그림 10. 기본계획안(2) 분석결과

기본계획선형에 대한 위험도 분석결과 초기 피난거리 감소에 의한 열차진행방향으로 대피하는 승객은 화재 초기의 위험도가 급격히 증가하여 많은 사상자가 발생할 것으로 예상된다. 기본계획 선형은 중단경사가 높은 선형으로 화재 시 위험도가 증가되며, 빠른 유독연기 전파와 번곡점에서의 기류정체로 인한 피해가 위험도 증가의 주요 요인인 것으로 판단된다.

3.3 대안노선 분석결과

기본계획 노선보다 터널전체 연장이 약 10m정도 짧아지고, 최대 중단경사가 6 %로 낮아진 대안노선의 경우 대피사갱이 없을 경우 피난거리의 증가에 의해 위험도가 높게 산출되었다. 피난거리의 증가는 역류를 포함한 유독가스의 확산에 의해서 대피중인 피난인원에게 높은 위험요소로 작용한다. 대피탈출로가 없을 경우의 전체 위험도는 ALARP기준에 만족하지 못하는 위험도를 나타내었다.

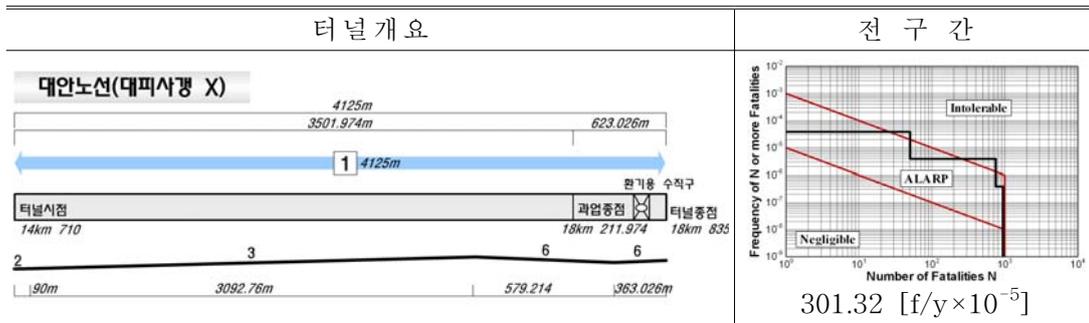


그림 11. 대안노선(1) 분석결과

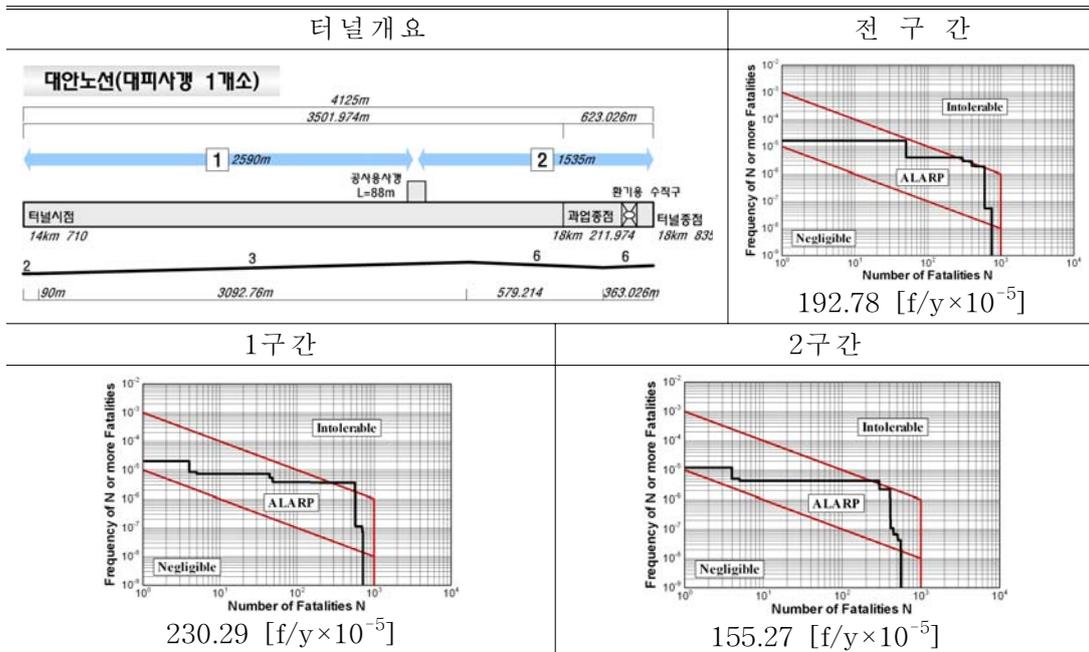


그림 12. 대안노선(2) 분석결과

대안노선의 선형에 대피탈출로가 없는 경우와 탈출로 1개소를 설치하는 경우에 대하여 위험도분석을 수행하였으나, ALARP기준을 만족시키지 못하는 결과를 나타내었다. 따라서 공사용 사갱 외에 별도의 대피용 사갱 1개소를 추가적으로 설치하는 방안을 수립하여 이에 대한 위험도 분석을 수행하였다.

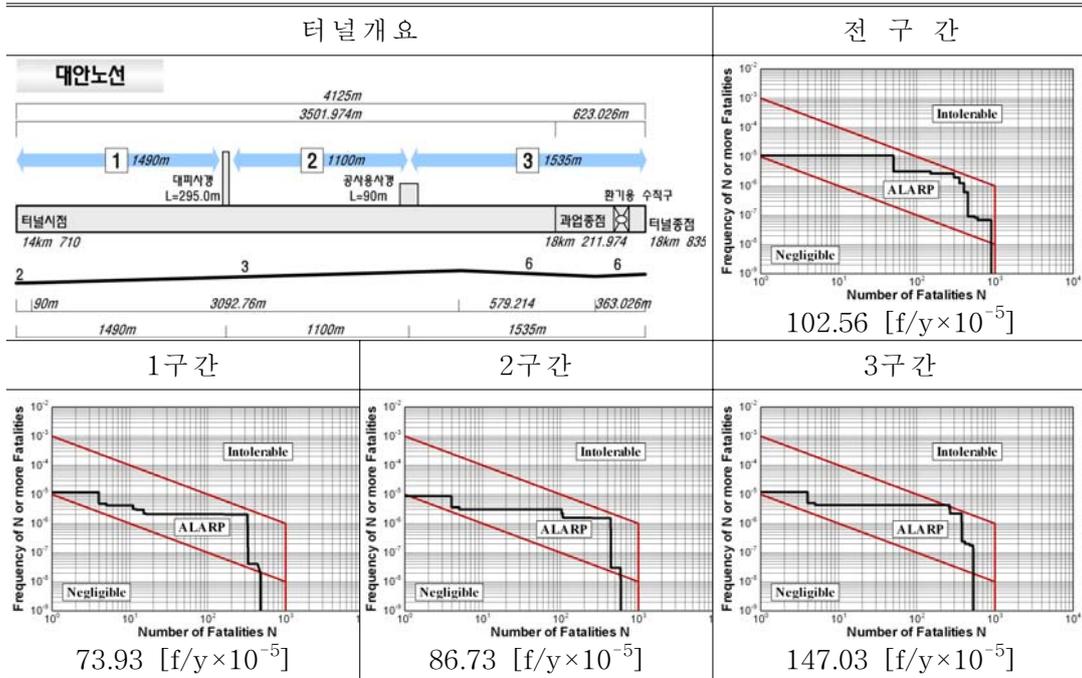


그림 13. 대안노선(3) 분석결과

1구간과 상대적으로 구간연장이 짧은 2구간의 위험도는 ALARP 기준에 만족하며, 3구간은 상·하향 중단경사가 바뀌는 변곡점이 있어 화재발생시 유독가스의 배출속도가 느려 상대적으로 위험도가 높게 평가되었다.

3구간에서 부분적으로 ALARP기준을 초과하는 구역이 발생되나, 전구간에 대한 평가에서 ALARP구역 이내의 분포를 나타내므로 기준치 이하의 안전도 확보가 가능할 것으로 판단되어 ALARP기준에 만족하는 적정 수준의 안전성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

대안노선(4)는 갱내구난대피소가 있는 경우에 대한 위험 분석이다. 구난대피소는 터널 밖으로 탈출이 어려운 노약자나 부상자의 안전 확보를 위한 시설이나 수용인원이 대형 참사에 직면 할 수 있으므로, 터널내 설치에 관하여 의견이 분분한 실정이다.

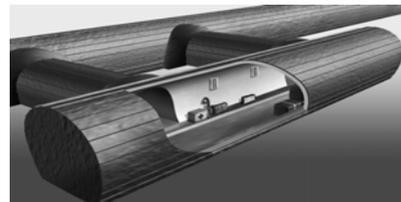


그림 14. 갱내구난대피소 개요

그림 15은 대안노선(4)에 대한 위험도 분석 결과이다. 대피소를 설치함으로써 전구간에 ALARP기준에 만족해 적정 수준의 안전도를 유지할 것으로 평가되지만, 피난인원 중 50명의 안전은 보장하나, 이는 전체인원(2,362명)의 약 2.12%에 해당하는 인원으로서 추가 소요비용에 비하여 전체 위험도를 큰 폭으로 감소시키지 못하는 것으로 나타났다.

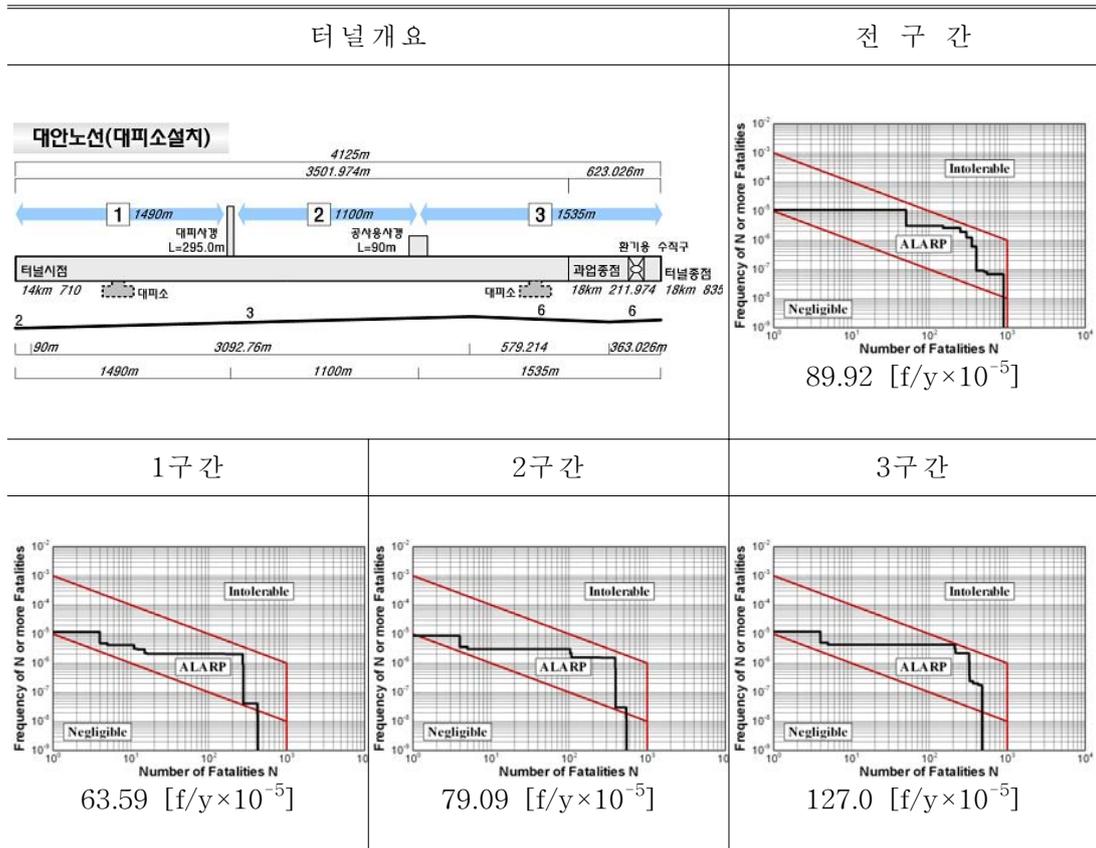


그림 15. 대안노선(4) 분석결과

3.4 위험도분석결론

기본계획(1), 기본계획(2) 및 대안노선(1)~(4)에 대한 정량적 위험도 분석결과 터널 내 화재발생시 가장 큰 위험요소는 피난거리이며, 종단경사 조건에 따라 화재연기 전파에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

표 6. 정량적 위험도 분석결과

구 분	기본계획(1)	기본계획(2)	대안(1)
대피탈출로	없음	2개소	없음
최대피난거리	2,067.5m	717.5m	2,067.5m
최대중단경사	10%		6%
리스크(R) f/yr × 10 ⁻⁵	332.664	167.27	301.32
위험감소율	비교기준	49.72% 감소	9.42% 감소
ALARP기준	만족 못함	만족 못함	만족 못함
구 분	대안(2)	대안(3)	대안(4)
대피탈출로	1개소	2개소	2개소+갱내대피소
최대피난거리	1,295m	767.5m	767.5m
최대중단경사	6%		
리스크(R) f/yr × 10 ⁻⁵	192.78	102.56	89.92
위험감소율	42.05% 감소	69.17% 감소	72.97% 감소
ALARP기준	만족 못함	만족함	만족함

분석결과 기본계획노선보다 대안노선 터널의 방재안전성이 우수했으며, 대안설계의 사갱이 2개소 일 경우 ALARP 기준에 만족하는 결과를 나타내었다. 대피사갱의 개수에 따라 위험도 변화가 뚜렷하게 나타나며(그림16 참고) 탈출로(사갱)수가 많을수록 피난거리의 감소로 인하여 위험도 수치의 정량적 감소효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

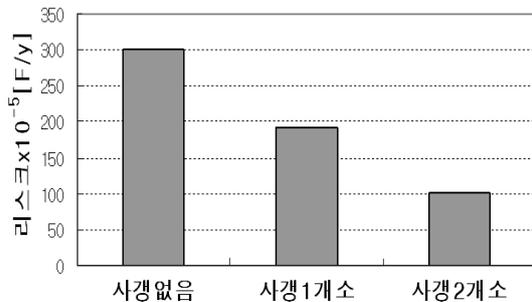


그림 16. 사갱개소에 따른 위험도

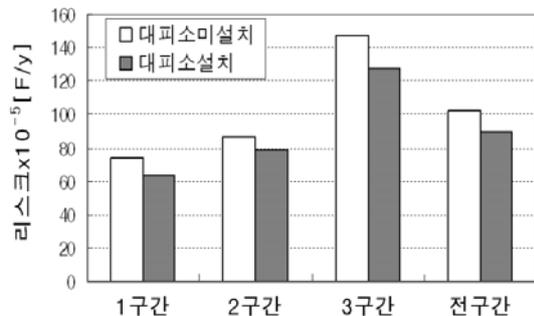


그림 17. 갱내대피소 설치에 따른 위험도

ALARP의 권고에 따라 가능한 한 위험도를 낮추는 방안으로 갱내 대피소를 설치할 경우 12.32%의 위험도 감소효과(그림17 참고)를 나타내지만, 갱내구간대피소 설치에 따른 안전효율이 사갱보다 낮은 것으로 판단되었다. 또한, UN 경제사회위원회(도로터널 방재안전 전문가 집단)에서는 폐쇄적인 갱내대피소는 더 이상 설치하지 말 것을 권고하고 있다. 따라서 터널내 방재안전을 고려한 구조물계획 및 방재안전설비에 대하여 ALARP기준을 만족하며 가장 큰 안전효율을 나타내는 대피 탈출로(사갱) 2개소를 확보하는 대안(3)을 설계안으로 적용하였다.

4. 결 론

본 사례연구에서는 터널의 방재설계에 정량적 위험도 분석기법을 도입하였으며, 경제성 및 사회적 요구수준을 고려하여 실행 가능한 합리적인 수준으로 터널 내 방재 구조물계획을 실행하였다.

기본계획노선과 대안노선에 대하여 본선터널의 평면선형, 종단경사, 주변지형을 이용하여 실현 가능한 갱의 탈출로(사갱, 수직구)계획을 수립하고, 이를 토대로 6가지 갱의 탈출로 계획에 대하여 QRA분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 동일한 개소의 탈출로가 있을 경우 기본계획안보다 대안노선의 터널 방재안전성이 우수했으며, 이는 기본계획안의 종단경사가 상대적으로 급하여, 화재연기의 역류속도가 빠르게 산정되어 위험도가 높게 평가되었기 때문이다.
- 2) 기본계획노선의 경우 탈출로(사갱) 2개소를 설치하더라도 도시지역 방재안전기준이라 할 수 있는 홍콩기준에서 제시하는 ALARP 기준을 만족하지 않는 것으로 평가되었다.
- 3) 대안노선인 경우 탈출로의 수가 늘어날수록 정량적 위험 값이 선형적인 감소경향을 보이며, 사갱 2개소를 설치할 때 기준에 만족하는 결과를 보였다.
- 4) 터널내 구난 대피소를 설치할 경우 위험도 감소효과가 있는 것으로 검토 되었지만, 경제적 측면에서 효율성이 떨어지는 것으로 판단된다.
- 5) 정량적위험도 분석을 이용한 결과 대안(3)의 경우가 실행 가능한 가장 합리적인 수준으로 판단되었다. 이에 따라 사갱 2개소를 설치하는 것으로 터널 내 방재구조물을 계획하였다.

본고에서 언급되지 않은 여러 방재시설물은 사고예방, 피해감소, 대피촉진 및 구조촉진 등으로 분류하였으며, 세부설치는 철도설계기준(노반편 : 방재시설)을 기준으로 하고 발간 예정인 철도터널 안전기준(안)을 준용하여 전체터널의 방계설계를 수립하였다.

■ 참고문헌 ■

1. 전덕찬 외, 2004, “정량적 화재위험성평가(QRA)기법을 적용한 터널방재 설계사례”, 한국지반공학회 창립20주년 기념 지반구조물 설계·시공 사례집
2. 김원국, 2003, “터널방재설계 최적화에 관한 연구”, 대한토목학회, 터널시공기술향상 대토론회 논문집
3. S.N.Jonkman, P.H.A.J.M. van Gelder, J.K. Vrijling, 2003, “Flood Risk Calculated with Different Risk Measures”, European Safety and Reliability Conference
4. ISO/TS 13571, 2002, “Life-threatening components of fire Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data”
5. Hakan Frantzich, 1998, “Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering”, Lund University