

# 대심도지하공간의 정량적위험성 평가기법

이 창 옥 (한방유비스(주), 방재연구소장)

## **Quantitative Risk Assessment Method for Deep Placed Underground Spaces**

Lee, Chang-wook

## Abstract

As the necessity to utilize deep-placed underground spaces is increasing, we have to seriously consider the safety problems arising from the U/G spaces which is a restricted environment.

Due to the higher cost of land compensation for above ground area and environmental issues, the plan to utilize deep-placed U/G spaces is currently only being established for the construction of U/G road network and GTX. However it is also expected that the U/G spaces are to be used as a living space because of the growing desires to change the above ground areas into the environmentally green spaces.

Accordingly it is necessary to protect the U/G environments which is vulnerable against disasters caused by fire, explosion, flooding,, terrorism, electric power failure, etc. properly.

We want to introduce the principles of the Quantitative Risk Assessment(QRA) method for preparedness against the disasters arising from U/G environments, and also want to introduce an example of QRA which was implemented for the GOTTHARD tunnel which is the longest one in Europe.

Key word : Deep-placed U/G space, Quantitative Risk Assessment, ETA, FTA, Probability

## I. 서론

현대사회와 같이 생활 양상이 점점 다양해지고 복잡화되어가는 상황에서는 사람들은 환경적으로 보다 신선하고 안락한 주변 환경을 추구하게 되고, 또한 환경적으로 유리한 넓게 분산된 지역에 기거하면서 도심지로 모여들어 일상의 업무를 처리하는 양상으로 변화되어 가게 된다. 따라서 신속한 이동수단이 필요하게 되고 이를 위해 광역급행열차 시스템의 건설이 요구되고 있다.

복잡한 대도시의 도심은 차량이동의 신속성을 확보하고 지상부분의 녹지공간 확보를 위하여 대심도지하도로망 또한 계획되고 있다. 이러한 철도나 도로망을 지하 40m 이하의 대심도로

건설하는 것은 지하의 각종 시설물의 장애를 피하는 것뿐만 아니라 토지보상비의 절감을 피하기 위한 목적도 있는 것이다.

지상공간의 환경오염문제를 해결하기 위한 녹색환경운동이 인류가 추구해야 하는 궁극적 목표의 하나라고 한다면, 머지않은 장래에 지하공간의 활용시도가 점점 늘어갈 것으로 예상해 볼 수 있을 것이다. 지상을 녹색화하기 위해 지하공간을 활용하는 데는 또 다른 문제점인 방재문제가 대두될 수 밖에 없을 것이다. 따라서 이러한 서로 상충되는 목적을 충족시키기 위해 대심도지하공간의 안전문제에 보다 많은 관심을 기울이고 기술적인 해결방안을 모색하려는 노력이 필요할 것이다.

이러한 수요에 부응하기 위해 서울시에서는 대심도지하도로망 건설을 계획하고 있으며, 경기도와 서울시는 함께 양지역을 연결하는 대심도광역급행철도망 건설을 계획하고 있다. 이렇게 시설이 지하화하고 그 깊이가 깊어 질수록 방재 상 문제가 되는 잉여자유도가 감소되어 위험도는 더욱 높아질 것이므로 예상되는 위험도를 정량적으로 분석하여 사전에 대책을 세우는 것이 절실히 필요한 상황이다.

대심도지하공간의 위험성은 화재·폭발 관련 위험성을 필두로 그 외에 지진, 침수, 정전, 테러 등의 위험성을 예상해 볼 수 있으며, 이들 각각의 위험요소에 대해 방재계획을 수립하고 사전적 조치로서 대응해야 할 것이다.

본고에서는 대심도지하공간의 위험요소 중 화재·폭발 위험에 대해 이를 정량적으로 평가하는 기법을 논의하면서, 기본적인 평가방법에 대해 설명하고 국내에서 이미 지침으로 정해진 부분을 간단히 소개 및 보완하면서 마지막으로 외국에서 이러한 정량적 위험도 평가를 실시한 예에 대해 기술해 보고자 한다.

## II. 정량적위험성평가(QRA)의 개요

정량적위험성평가는 잠재하고 있는 위험(Risk)의 형태를 발견하기 위한 정성적위험성평가(Quantitative Hazard Analysis)와 정성적 평가에 의해 발견된 위험요소들이 사고로 전이할 가능성을 확률적으로 산출하고 사고의 결과를 사전에 예측하기 위한 평가방법이다. 이러한 정량적 방법을 통해 사고 발생 시 예상되는 피해범위 등을 예측하여 전체시설의 위험을 최종적으로 결정하고 결정된 위험이 관리하고자 하는 목표수준보다 작은 경우에는 이를 토대로 비상조치계획을 수립하여 시행하여야 한다.

정량적위험성평가를 실시하기 위해서는 대상시설의 위험을 도출할 수 있는 정성적위험성평가가 선행되어야 하지만 도로나 철도시설 등과 같이 일반적으로 위험성에 대한 판단이 잘

알려져 있는 경우에는 곧바로 정량적위험성평가를 시행할 수 있으며 이를 위해서는 사고빈도분석기법인 결함수분석(FTA: Fault Tree Analysis)나 사건수분석(ETA: Event Tree Analysis)를 실시하여 사고발생 빈도나 전체적인 위험도를 정량적인 값으로 산출하여야 한다. 이렇게 정량적위험성평가를 통해 얻을 수 있는 정보는 다음과 같다.

- 위험요소의 확인 및 사고 파급효과에 대한 규명
- 사고의 파급범위 및 결과에 대한 정량적 추정
- 사건사고의 상대적 위험순위
- 위험확률 감소를 위한 개선대책

이러한 대응 조치에 의해 모든 위험에 대응할 수 있을 것으로 기대해서는 안되며 근원적으로 위험을 제거하거나 아니면 위험확률을 받아들일 수 있는 어떤 수준 이하로 완화시킬 수 있는 조치가 되어야 한다. 대표적인 정량적위험성평가 방법은 다음과 같이 분류된다.

#### 1. 빈도분석방법(Frequency Analysis)

- 1) 결함수분석(FTA)
- 2) 사건수분석(ETA)
- 3) 인간에러분석(HEA)

#### 2. 사고결과영향분석방법(Consequence Analysis)

#### 3. 위험도분석방법(Risk Analysis)

- 1) 위험도 매트릭스(Risk Matrix)
- 2) F-N 커브(Frequency-Number Curve)
- 3) 리스크 프로파일(Risk Profile)
- 4) 위험도 밀도커브(Risk Density Curve)

### III. 정량적화재위험성평가 기법의 종류

정량적 화재 위험성 평가는 화재 위험요소 또는 화재 시나리오의 발생 확률 뿐만 아니라, 화재 위험요소 또는 시나리오 발생의 결과들에 대한 수치적 정량화를 포함한 평가를 말한다. 각 화재 시나리오의 확률 및 결과의 수치 값을 곱함으로써 화재 위험성에 대한 양적 값을 얻을 수 있다. 모든 가능한 화재 시나리오로부터의 위험성 값의 합을 더함으로써 전체적인 화재 위험성 값을 구할

수 있으며, 전체적인 화재 위험성 값은 대안설계나 규정 위주 화재 안전 설계 값과의 비교에 사용될 수 있다.

일반적으로 체계적인 정량적 화재 위험성 평가의 수행에는 다음과 같은 방법들이 있다.

- 잠재적 화재 위험요소의 목록 및 그 화재 위험성의 정량적 평가를 검토하기 위해 체크리스트 방법을 사용한다.
- 잠재적 화재 시나리오와 이에 대한 정량적 화재 위험성 평가를 검토하기 위해 사건수(Event tree)분석 방법을 사용한다.
- 화재시나리오 중 정상사상을 연역적으로 분석하여 위험성을 평가하는 결함수(Fault tree) 분석 방법을 사용한다.

이러한 방식 모두에서, 확률 및 결과와 같은 변수 값들이 가능하다면 통계 자료로부터 얻어질 수 있겠지만 통계 자료가 없을 때는 주관적인 판단으로부터 구할 수도 있다. 이러한 주관적 판단을 위해서는 공학적 근거가 마련되어야 하므로 가상의 시나리오에 대한 시뮬레이션을 통해 구하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

## 1. 위험지수 방법

위험지수 방법은 특정한 적용을 위해 개발된 잘 정의된 위험관련 변수들의 조합을 사용하는 것과 연관된다. 이 매개변수들은 위험과 관계되는 위험성 변수와 안전과 관계되는 안전성 변수가 될 수 있다. 각 매개변수 값들은 그 특징에 근거하여, 이러한 적용을 위해 특별히 전문가에 의해 개발된 잘 정리된 표들로부터 구해질 수 있다. 평가된 값(인덱스)들은 필수 조건들의 평가 값 또는 대체 방화수단들의 평가 값과의 비교를 위해 사용된다. 위험지수 방법에서는 확률과 결과를 분리하여 취급하지는 않는다. 각 매개변수는 평가 값이 주어져 있고, 이러한 값들의 합이 합치성 또는 동등성의 비교를 위해 사용된다.

이러한 대표적인 위험지수 방법 중 하나로서 의료 시설을 위해 NFPA(미국방화협회)에 의해 개발된 것이 있다(NFPA 101A, 2004). NFPA 방식에서 워크시트는 어떤 시설이 네 가지 분야에서 기본적인 안전 요건을 만족시킬 수 있는 지에 대한 평가를 위해 사용된다. 이들 분야에는 (1) 농성, (2) 소화, (3) 피난 이동, (4) 일반적인 안전이 있으며, <표 3-1>은 이들 워크시트 중 하나가 어떠한 형태인지 보여주는 사례이다. 워크시트 4.7.7에는 이 네 가지 안전 분야에 대해 평가될 13개의 안전 매개변수의 목록을 보여주고 있다. 각각의 13가지 안전 매개변수의 값은 사실 별도의 워크시트를 통해 계산된다. 그 후 이러한 값들은 이 워크시트 4.7.7에 입력된다. 한 열(하나의 안전 분야)에 있

는 모든 값들의 합은 그 안전 분야의 평가된 전체 값을 나타낸다. 예를 들어, S값은열에 있는 모든 값의 합은 농성 안전에 대해 평가된 전체 값을 나타낸다. 각 안전 분야의 전체 값은 이제 그 안전 분야에 대한 요구되는 값과 비교된다. 평가된 전체 값들이 모든 네 분야의 요구 값을 만족시키면 그 시설은 안전한 것으로 간주된다. 이 방법에 대해 더 자세한 사항은 NFPA 101A, 2004을 참조하는 것이 바람직하다.

<표 3-1> NFPA 안전성평가 워크시트(출처 : NFPA 101A, 2004, “인명안전에 대한 대안적 접근, 4장 워크시트 4.7.7)

워크시트 4.7.7 개인별 안전성평가				
안전 요소	농성안전( $S_1$ )	소화안전( $S_2$ )	피난안전( $S_3$ )	일반안전( $S_4$ )
1. 건축	-	-	NA	-
2. 내장재(복도,출구)	-	NA	-	-
3. 내장재(실내)	-	NA	NA	-
4. 복도칸막이/벽	-	NA	NA	-
5. 복도로 향한 문	-	NA	-	-
6. 구역 크기	NA	NA	-	-
7. 수직개구부	-	NA	-	-
8. 위험구역	-	-	NA	-
9. 연기 제어	NA	NA	-	-
10. 비상 이동경로	NA	NA	-	-
11. 수동화재경보	NA	-	NA	-
12. 연기감지 및 경보	NA	-	-	-
13. 자동식 스프링클러	-	-	/2=	-
총 합	$S_1 =$	$S_2 =$	$S_3 =$	$S_4 =$

## 2. 체크리스트(Check List) 방법

체크리스트 방법은 화재 위험성 평가를 수행하기 위해, 잠재 화재위험요소들에 대한 체크리스트나 이미 상존하거나 추가적인 방화수단들의 고려에 대한 체크리스트를 적용하는 방법이다. 잠재 화재 위험요소들의 체크리스트를 만듦으로써 상존하는 잠재 화재 위험요소들에 대한 체계적인 확인이 가능하게 된다. 잠재 화재 위험요소들과 함께 방화수단들을 나열해봄으로써 어떤 안전상 결함이나, 위험성을 최소화하기 위한 추가적 방화수단들의 필요성에 대한 신속한 확인이 가능하게 된다. 따라서 체크리스트 방법은 상존 또는 추가적 잠재 화재 위험요소와 방화수단들, 그리고 잔존 화재 위험성의 평가를 위한 기술적 문제의 나열이라 할 수 있다. 이것은 화재 위험성을 최소화 하기 위해 필요한 어떠한 결함이나 교정 수단들을 파악하는 데에 사용된다. 그러나 이는 화재 사상들의 논리적인 전개는 고려하지는 않고 있는데, 논리적 전개에 대해서는 사건수분석 방법을

사용하여 논의될 수 있다.

<표 3-2>에서는 정량적 화재 위험성 평가에 이용되는 체크리스트 방식의 한 예를 보여주고 있다. 이 예에서는 한 주택의 거실에 존재하는 어떤 잠재 화재 위험요소와 위험성을 최소화하기 위한 다수의 추가적인 방화 수단들에 대한 고려사항들을 살펴보게 된다. 분명히 한 주택에는 많은 잠재 화재 위험요소들이 있을 것이다. 완벽한 화재 위험성 평가에서는 모든 잠재 화재 위험요소의 파악과 위험성을 최소화할 수 있는 다양한 방화수단들의 고려를 포함해야 할 것이다.

전형적인 주택에는 일반적으로 연기 경보기와 같은 방화수단 들이 있을 것이다. 그리고 추가적인 방화수단들에 의해 위험성은 더욱 낮아질 수 있게 된다. 이 예에서는 세 가지의 추가 방화 수단에 대한 여섯 가지 다른 조합을 고려하고 있다. 이 세 가지 추가 방화 수단들에는 (1) 거실에는 발연성 물질(담배와 같은)이 없을 것, (2) 스프링클러설비, (3) 정기 대피 훈련이 있다. 세 가지 방화 수단들 각각은 화재 발생의 확률 또는 화재 발생의 결과에 영향을 미친다. 예를 들어, '거실에는 발연성 물질이 없을 것'은 화재 발생의 확률을 낮추는 효과를 가져올 것이고, 반면에 '스프링클러설비'와 '정기 대피 훈련'과 같은 수단들은 화재를 진압 또는 통제하여 화재 발생의 결과를 줄이거나 거주자들을 더욱 빠르게 대피시킴으로써 영향을 미칠 것이다.

이것은 정량적 화재 위험성 평가가 체크리스트를 사용하여 어떻게 실행되는 지를 보여주는 단순한 예라는 것이 강조되어야 하며 화재 위험성 평가의 표준이 되는 체크리스트 방법은 존재하지 않는다는 것을 이해할 필요가 있다.

<표 3-2>에서의 본질적인 화재 위험성 값(어떠한 방화수단들의 도움이 없는)은 통계자료로부터 얻어진 값으로 1996년 캐나다 주택의 화재발생 확률은  $1.75 \times 10^{-3}$  화재/주택/년 이었고, 주 거실지역에서 발생한 이러한 주택화재의 비율은 8.5%였다는 것을 보여준다. 이 수치들을 사용하면, 1996년 캐나다 주택의 주 거실지역에서의 화재발생 확률은 따라서,  $1.75 \times 10^{-3} \times 8.5\%$  또는  $1.49 \times 10^{-4}$  화재/주택/년 이 된다. 통계자료에서는 또한, 1996년 주 거실지역에서 발화한 화재의 결과는  $43.2 \times 10^{-3}$  사망자/화재 이었고, 이들 화재로부터의 결과적인 인명에 대한 위험성은  $6.43 \times 10^{-6}$  사망/주택/년 이었다는 것을 보여준다. 이와 같이 이전에 구한 통계로부터의 본질적 위험성 값이 현재의 예에 사용되며, <표3-2>에 나타나 있다.

<표 3-2>의 본질적 위험성 값은 범규에 의해 요구되는 연기 감지기 경보와 같은 일부 방화 수단들을 포함하는 화재 통계에 기초한 것이다. 만약 추가적인 방화 수단들이 준비되어 있다면, 본질적 화재 위험성 값들은 더욱 줄어들 것이다. <표3-2>에서 여섯 가지의 방화 관련 조합 각각의 영향은 확률 또는 결과의 본질적 값에 대한 잔존 곱셈(승수) 요소를 사용하여 평가한다. 이것은 방화엔지

니어 및 규제자들에게 본질적 값의 감소에 대한 평가에 근거한 이러한 방화 수단들의 영향을 평가할 수 있게 해준다.

방화 수단의 영향을 평가하는 하나의 방법은 이용 가능한 통계정보를 이용하는 것이다. 불행하게도 그러한 통계정보는 항상 유용한 것은 아니다. 그 정보는 정보 수집회사의 데이터 베이스에 의존하므로 통상적이고 일반적인 정보를 보여 주지만, 반드시 화재 위험성 평가에 필요한 구체적 정보를 나타내는 것은 아니므로 그들의 출간된 보고서이어야 하는 것은 아니다. 그러한 정보가 유용하지 않다면, 주관적인 판단이 필요할 수도 있다. 그렇지 않으면, 화재의 발달과 거주자 피난에 대한 수학적 모델링의 사용을 포함하는 정량화에 대한 근본적이고 합리적인 접근의 사용이 필요한데, 이에 관해서는 뒤의 여러 장들에서 다시 논의될 것이다.

예로서 발연성 물질의 제한이나 스프링클러 설치에 따른 혜택에 대한 통계적 정보들은 있으나, 정기적인 대피 훈련 수행에 따른 혜택에 대한 정보는 많지 않다는 것을 들 수 있다. NFPA 통계는 개략적으로 가정에서 발생하는 화재의 7%가 발연성 물질에 의한 것이며 (NFPA 화재통계, 2006) 이러한 화재 중 개략적으로 14%가 주 거실지역에서 발생한다 (Hall, 2006)는 것을 보여준다. 그러므로 가정에서의 화재 중  $0.7 \times 0.14$  혹은 개략적으로 1%는 주 거실지역이 발화부가 되며 발연성 물질이 화재원인이라는 것을 나타낸다. 이러한 화재 통계들을 캐나다의 가정에도 적용한다면, 주 거실지역에서 발연성 물질을 제한함으로써 가정화재의 주 거실지역에서 발생하는 화재 건수를 8.5%에서 7.5%까지 줄일 수 있을 것이다. 발연성 물질의 제한에 의한 본질적 확률 값(inherent probability value)에 대한 해당 잔존 곱셈 요소(residual multiplication factor)는 따라서 0.88이 되며, 이는 <표3-2>에 나타나 있다.

1989-1998년 데이터에 근거한 NFPA 통계에 의하면, 스프링클러를 설치한 1인 및 2인 가정 주택과 스프링클러를 설치하지 않은 유사한 주택과 비교했을 때 사망률 감소는 51%에 달한다고 하였다. (Kimberly and Hall, 2005). 따라서 스프링클러 설치에 따른 본질적 결과 값의 해당 잔존 곱셈요소는 0.49가 되며 이는 <표 3-2>에서 볼 수 있다.

정기적인 대피 훈련 수행의 혜택에 대해서는 아주 유용한 사망률 감소에 관한 정보는 없다. 이러한 예에 대해서는 가정을 하는 수 밖에 없을 것이다. 만약 정기적인 대피훈련이 실시되고 있다면, 대피가 빨라져서 사망률이 낮아질 것이라는 것은 알 수 있다. 이 예시에서 사망률이 60%까지 낮아진다고 가정해 보자. 정기적 대피훈련의 수행으로 본질적 결과 값(Inherent consequence value)에 대한 잔존 곱셈요소는 따라서 0.40이 되며 이것도 <표3-2>에 나타나 있다. 실제의 화재 위험성 평가에서는 이 값은 방화엔지니어와 규제자 간에 판단되고 합의를 이루어야 할 필요가 있다.

<표 3-2>는 또한 스프링클러의 설치와 정기대피훈련 수행을 함께 곱했을 때의 결과에 대

한 영향을 보여주고 있다. 즉, 스프링클러와 정규대피훈련 수행의 혜택은  $0.49 \times 0.40$  또는 0.20라는 결합된 잔존결과요소를 나타내게 된다. 잔존요소들을 곱하는 것은 각각의 방화 수단이 계속적으로 어떤 비율만큼 잔존사망률을 감소시킨다는 논의에 근거하고 있다. 사망률은 첫째는 화재심도를 억제하는 스프링클러에 의해 감소되고, 나아가 거주자들의 빠른 대피에 의해 더욱 감소된다.

추가 방화수단의 6가지 조합에 대한 위험성 값의 감소를 <표3-2>에서 보여준다. 잔존 위험성 곱셈요소의 범위는 0.88에서 0.20이다. 위험성 값들의 정량화는 다양한 방화대안들의 수치적 비교를 가능하게 한다. 정성적 화재위험성 평가의 경우에는 이러한 것이 가능하지 않게 된다.

<표 3-2>에서의 값들은 이러한 체크리스트의 방법이 어떻게 실행될 수 있는 지를 예로서 보여주기 위해 임의로 선택된 것임을 이해할 필요가 있다. 이 값들은 심도 있는 연구 없이 이용가능한 통계적 정보로부터 선택된 것들이다. 더 많은 통계적 정보들이 이용가능해 짐에 따라 정확한 값들을 찾기 위해서는 더 광범위하고 세밀한 조사 및 분석이 필요하다. 실제 화재 위험성 평가에서는 이러한 값들은 주의 깊게 선택되고, 이해관계자들에 의한 합의를 얻어낼 필요가 있다. 확률과 결과에 대한 주관적인 판단은 잠재 화재 위험성에 대한 빠른 평가가 가능하게 한다. 화재의 전개 및 거주자 대피에 대한 수학적 모델링의 사용을 포함한 정량화에 대한 더 근본적이고 이성적인 접근은 다음에 논의될 것이다.

<표 3-2> 잠재화재위험요소 및 방화수단의 체크리스트에 기초한 정량적 화재위험성 평가

번호	화재 위험요소	기존 방화수단	본질적 화재위험성			추가 방화수단	잔존 화재위험성		
			P (연간 화재건수)	(화재건당 사망자수)	위험성 (연간 사망자수)		P (본질값 승수요소)	C (본질값 승수요소)	위험성 (본질값 승수요소)
1	거실내 화재	연기경보	$1.49 \times 10^{-4}$	$43.2 \times 10^{-3}$	$6.43 \times 10^{-6}$	거실내 발연물질 없음	0.88	1.00	0.88
2	거실내 화재	연기경보	$1.49 \times 10^{-4}$	$43.2 \times 10^{-3}$	$6.43 \times 10^{-6}$	스프링클러	1.00	0.49	0.49
3	거실내 화재	연기경보	$1.49 \times 10^{-4}$	$43.2 \times 10^{-3}$	$6.43 \times 10^{-6}$	대피훈련	1.00	0.40	0.40
4	거실내 화재	연기경보	$1.49 \times 10^{-4}$	$43.2 \times 10^{-3}$	$6.43 \times 10^{-6}$	거실내 발연물질 없음 +	0.88	0.49	0.43

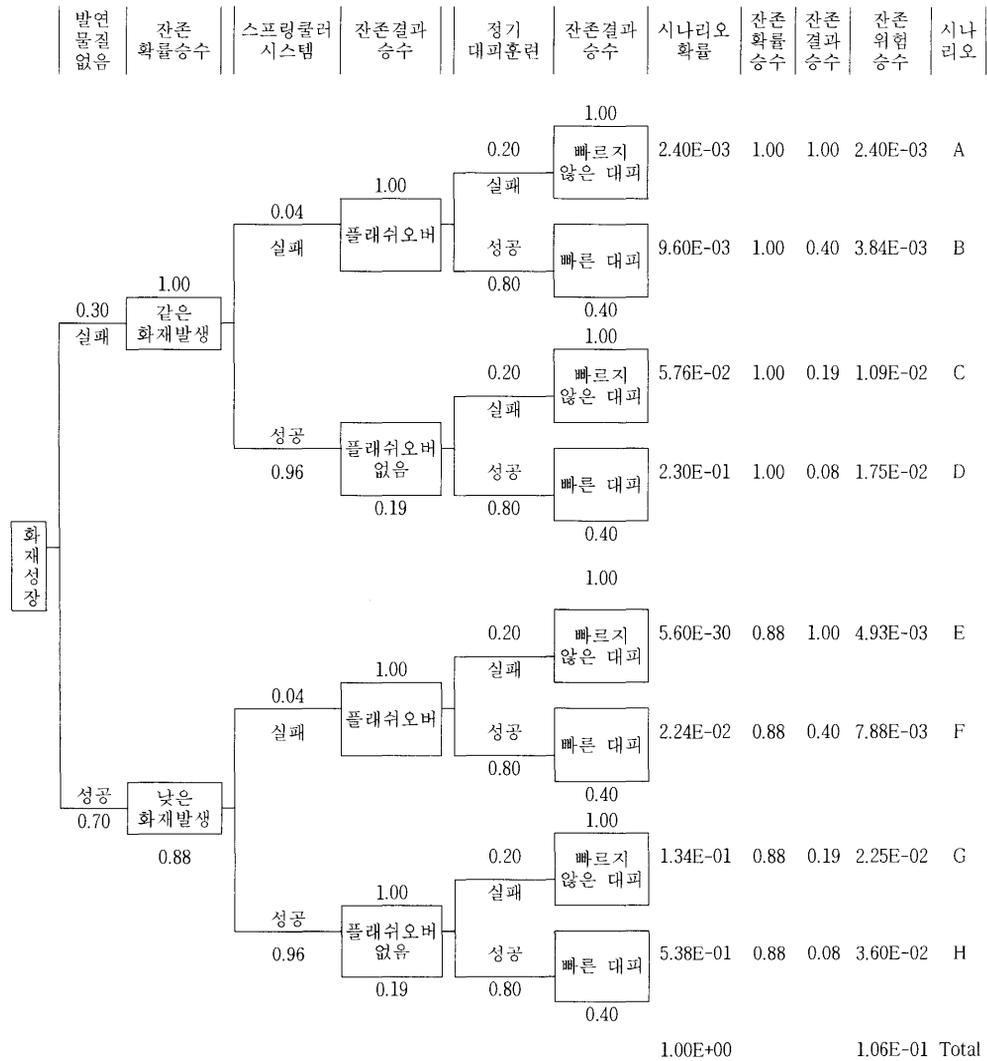
						스프링클러			
5	거실내 화재	연기경보	$1.49 \times 10^{-4}$	$43.2 \times 10^{-3}$	$6.43 \times 10^{-6}$	거실내 발연물질 없음 + 대피훈련	0.88	0.40	0.35
6	거실내 화재	연기경보	$1.49 \times 10^{-4}$	$43.2 \times 10^{-3}$	$6.43 \times 10^{-6}$	스프링클러 + 대피훈련	1.00	0.20	0.20

(주) 이 표에서 P는 화재위험요소의 확률이고, C는 화재위험요소의 결과이다. 거실내 발연물질 없음만이 거실내 화재 발생의 확률에 영향을 끼친다. 다른 방화 수단은 결과에 영향을 미친다.

### 3. 사건수(Event-Tree) 분석방법

사건수 분석방법은 잠재적 화재 위험요소를 확인하고 그들의 확률과 결과들을 평가하여 화재 위험성 값을 산출하는 또다른 방법이다. 체크리스트 방법과는 달리 사건수 방법에서는 가능성과 결과들, 궁극적으로는 위험성 값에 대한 평가를 위한 하나 이상의 잠재 화재위험 요소들과 방화수단들의 리스트를 보여 준다. 사건수 방법에는 하나의 화재 위험요소의 개시로부터 잇달아 일어나는 다양한 화재 시나리오의 사건수를 만들어 내는 것이 포함된다. 화재 시나리오는 확률, 결과 및 위험성 값들의 판단을 위한 더욱 논리적인 정보를 제공하게 된다. 정량적 화재위험성 평가를 채택하는 사건수 방법의 예를 <그림 3-1>에서 보여준다.

<그림 3-1>에서, 다른 사상들로의 분기는 해당장소의 방화수단이 작용했는지 또는 실패했는지에 의존된다. 이 예에서는 가정된 아파트 건물에서의 하나의 화재위험요소와 위험성을 최소화 시키기 위한 수많은 추가적인 방화수단들에 대한 고려를 나타내고 있다. 많은 다른 위험요소들과 방화수단들에 대해서도 동일한 방법의 사건수가 만들어 질 수 있는 것이다. 완전한 화재 위험성 평가는 모든 잠재적 화재 위험요소들의 확인과 위험성을 최소화할 수 있는 다양한 방화수단에 대한 고려를 포함해야 할 것이다.



<그림 3-1> 아파트 건물에서 여러 화재시나리오에 대한 확률, 결과 및 잔존위험성값의 평가를 위한 사건수 방법의 예시

전형적인 아파트 건물은 일반적으로 내화구조나 화재경보설비와 같은 방화수단을 갖고 있다. 추가적인 방화수단은 위험성을 더 낮출 수 있게 될 것이다. 이 예에서도 2절의 체크리스트 방법에서 고려된 바와 동일하게 세가지 추가 방화수단에 대한 여섯가지의 다른 조합을 고려하고 있다. 세가지 추가적인 방화수단은 (1) 아파트에서 발연성(담배같은) 물질의 금지 (2) 스프링클러설비 (3) 정기적인 대피 훈련 이다. 각각의 세가지 방화수단은 화재 발생 확률이나 화재 발생의 결과에 대해 영향을 미친다. 예를 들어 아파트에서 발연성 물질을 금지함으로써 화재발생 확률을 낮추는데 영향을 미칠 수 있고, 반면에 스프링클러나 정기적인

대피훈련은 화재의 진압이나 제어를 통해 화재발생의 결과 값을 낮추는데 영향을 줄 수 있고, 거주자가 더욱 빠르게 대피할 수 있게 하므로 결과 값에 영향을 미칠 수 있다.

체크리스트 방법에서 논의되었던 것처럼, <그림 3-1>의 사건수는 단지 사건수가 정량적 화재 위험성 평가에 어떻게 사용될 수 있는가에 대한 예일 뿐이다. 각 사상에 대한 서술은 단지 이 예시에 대해서만 임의적인 판단에 의한 것이다. 다른 적용들에서는 또다른 서술이 될 수 있다. 이러한 서술들은 이해 관계자들 사이에서 더 명확한 논의를 거쳐 동의를 구할 수 있어야 한다.

사건수 방법에서 각 화재 시나리오의 확률은 시나리오와 연관된 방화수단의 수행이 성공 또는 실패하였는지의 확률 값을 사용하여 계산된다. 이러한 확률 값의 어떤 것은 가능하다면 통계자료로부터 구할 수 있다. 예를 들어 1999-2002데이터에 근거한 NFPA의 통계에 따르면, 아파트 건물의 스프링클러는 스프링클러가 작동되게 하는 큰 화재에서 이러한 작동과 화재제어에 대한 신뢰도가 96%나 된다.(Kimberly and Hall,2005)고 하였다. 혼소화재나 작은 화재에서는 스프링클러가 작동하지 않을 것이라는 점을 주목해야 한다. 이러한 정보가 이용가능하지 않다면 주관적인 판단이 필요할 것이다. 예를 들면 화재발생률이 낮도록 하기 위한 비발연성 물질 사용 계획일 경우의 성공 또는 실패 확률 값을 쉽게 찾을 수 있는 통계자료 정보는 잘 없을 것이다. 그러한 통계정보가 없다면 가정을 해야만 한다. 이 예에서 비발연성 물질 사용계획의 성공 확률이 70%라고 가정해 보자. 이와 유사하게 아파트에서 정기대피훈련 계획 수행의 성공 혹은 실패 확률에 대한 통계정보도 쉽게 찾을 수 없으므로, 거주자들로 하여금 화재 경보 발생시 어떻게 해야 하는지를 알게 하면 그러한 훈련이 없을 때보다도 더 빨리 대피하게 되는 경우도 있을 것이다. 이 예에서 정기적 대피 훈련 계획 수행의 성공 확률이 80%라고 가정을 해보자. 실제 위험성 평가에서 이러한 값들은 방화엔지니어들이나 규제자들에 의해 신중하게 분석되고 합의가 이루어져야 한다. 성공은 방화수단이 실제로 작동하는 것으로 정의된다.

시나리오의 확률들은 <그림 3-1>에서 보여준다. 예를 들어 시나리오 A는  $2.40 \times 10^{-3}$ 의 확률을 갖고 있으며, 이는  $0.30 \times 0.04 \times 0.20$  의 결과이다. 여기서 0.30(비발연성 물질 계획 수행의 실패 확률), 0.04(스프링클러시스템의 실패 확률), 0.20(정기적 대피훈련계획 수행의 실패 확률)이다.

사건수 방법에서 각각의 화재 시나리오에 대한 화재 발생 확률은 화재 발생의 본질적 비율과 이러한 본질적 비율을 최소화할 다양한 방화수단의 영향에 근거하여 평가된다. <그림 3-1>에서 화재 발생의 본질적 비율에 대한 각각의 방화수단의 영향은 잔존확률승수를 사용하여 평가된다. 이는 방화엔지니어와 규제자들에게 화재 발생 확률의 감소에 대한 그들의 평가에 기초하여 이러한 방화수단의 영향을 평가할 수 있도록 한다. 이러한 잔존확률승수는 이용 가능할 경우 통계자료로부터 구할 수 있다. 이용 가능한 정보가 없다면, 주관적인 판단

이 필요하다. 예를 들어 아파트 건물에 대한 비발연성 물질 계획의 실행으로 화재발생 확률을 낮출 수 있는 통계자료를 쉽게 찾을 수가 없다고 하자. 그러면 우리는 가정을 해야 하는데 이 예에서와 같이 아파트 건물에서 비발연성 물질 계획의 잔존확률승수가 주택화재에 대한 경우<표 3-2>에서와 같이 0.88이라고 가정해 보자. 즉, 이는 비발연성 물질 계획의 성공 결과로서 화재 발생 비율의 감소가 그의 본질적 값의 0.88까지 된다는 것을 의미한다.

이러한 각 화재 시나리오에 대한 잔존확률승수는 <그림 3-1>에 나타나 있다. 예를 들어 비발연성 물질 계획 수행이 모두 실패한 시나리오 A,B,C,D의 경우 잔존확률승수는 1(감소 없음)이 된다. 반면 비발연성 물질 계획의 수행이 성공한 시나리오 E,F,G,H의 경우 모두가 잔존확률승수 0.88을 갖는다. 그것은 비발연성 물질 계획의 결과로서 화재발생율의 감소가 본질적 값의 0.88까지 된다는 것을 의미한다.

또한 사건수 방법에서는 각 화재시나리오의 결과는 화재의 본질적 결과와 그 결과를 최소화할 다양한 방화수단의 영향에 근거하여 평가된다. <그림 3-1>에서와 같이 그 결과에 대한 각 방화수단의 영향은 잔존결과승수를 이용하여 평가된다. 이는 방화엔지니어와 규제자들에게 결과의 감량에 대한 평가에 기초하여 이러한 방화수단들의 영향을 평가할 수 있도록 한다. 이러한 잔존결과승수의 일부는 이용가능하다면 통계자료를 통해 구해질 수 있다. 예를 들어 1989-1998 데이터에 근거한 NFPA 통계는 스프링클러가 있는 아파트 건물에서 사망자의 감소가 스프링클러가 없는 유사 빌딩과 비교할 때 81%에 이른다고 하였다. (Kimberly and Hall, 2005). 따라서 스프링클러 시스템의 잔존결과승수는 0.19가 된다. 즉, 스프링클러 시스템 설치의 결과가 화재 건당 그 본질적 값의 0.19까지 사망률을 감소시킨다는 것을 말한다. 이러한 정보가 이용가능하지 않다면, 주관적 판단이 필요할 수도 있다. 예를 들어 정기적 대피 훈련계획 수행의 사망감소와 관련된 혜택에 대한 통계적 자료를 쉽게 찾을 수 없는 것이 현실이다. 그러한 통계 정보가 없다면 우리는 또다시 여기서도 가정을 해야 한다. 이러한 예에서 정기적 대피훈련 계획의 잔존결과승수가 0.40이라고 가정해 보자. 이는 정기적 대피훈련 계획의 결과가 화재 건당 그 본질적 값의 0.40까지 사망률을 감소시킨다는 것을 의미한다.

이러한 각 시나리오에 대한 잔존결과승수는 <그림 3-1>에 나타나 있다. 예를 들어 시나리오 B가 0.40의 잔존결과승수를 갖는다고 하면, 이는  $1.00 \times 0.40$ 의 계산 결과가 된다. 여기서 1.00(스프링클러시스템 실패의 잔존결과승수), 0.40(정기대피훈련계획의 성공에 대한 잔존결과승수)이다.

<그림 3-1>에서는 세가지 방화수단의 성공 또는 실패에 근거한 모든 화재 시나리오의 잔존위험성 값들을 보여주고 있다. 각 화재시나리오의 확률 값은 그 시나리오와 연관된 모든 가지들의 개별적 확률 값들의 곱을 계산한 결과이다. 각 시나리오의 잔존확률승수는 그 시나리오와 연관된 모든 방화수단의 개별적 확률승수들의 곱을 계산한 결과가 된다. 각 시나

리오의 잔존결과승수는 그 시나리오와 연관된 모든 방화수단의 개별적 결과승수들의 곱을 계산한 결과이다. 최종적으로 각 시나리오에 대한 잔존위험성승수는 (시나리오의 확률) $\times$ (잔존확률승수) $\times$ (잔존결과승수)와 같이 위의 세가지 승수들의 곱이 된다. 예를 들어 시나리오 E는 시나리오의 잔존위험성승수가  $4.93 \times 10^{-03}$ 이 되는데 이는  $5.60 \times 10^{-03}$ (시나리오의 확률)  $\times$  0.88 (잔존확률승수)  $\times$  1.00 (잔존결과승수)와 같이 세가지 승수 값들의 곱이 되는 셈이다.

<그림 3-1>에서 잔존승수들의 곱셈은 2절에서 논의된 것처럼 모든 방화수단들은 화재 건당 화재 발생율, 혹은 화재의 심도, 혹은 사망률을 어떤 퍼센트로 연속적으로 감소시킨다는 논의에 근거 하고 있다.

예시에서의 값들은 이러한 사건수방법이 어떻게 실행되는지를 보여주기 위한 예로서 임의로 선택된 것이라는 점이 다시 한번 강조되어야 할 것이다. 실제의 위험성평가에서는 이러한 값들은 방화엔지니어들과 규제자들에 의해 신중하게 분석되고 동의되어야 한다. 확률 값들과 결과 값들에 대한 주관적인 판단은 잠재적인 화재 위험성들에 대한 빠른 평가가 가능하게 한다. 화재 성장과 거주자 대피에 대한 수학적 모델링 방법을 포함한 정량화에 대한 보다 근본적이고 이성적인 접근은 뒤에서 논의될 것이다.

체크리스트 방법과는 다르게 사건수 방법은 모든 화재시나리오의 위험성 값의 합계를 전체 시스템에 대한 하나의 위험성 값으로 본다. 이는 범규위주설계를 포함한 다양한 화재 안전 설계 옵션의 위험성 값들을 직접적으로 비교할 수 있게 한다. <그림 3-1>은 이러한 세가지 방화 수단 수행의 결합된 잔존위험성승수가  $1.06 \times 10^{-1}$ 이라는 것을 보여 준다. 이는 잔존위험성 값이 그 본질적 값의 10.6%로 감소된다는 것을 의미한다.

아파트 건물들에 대한 본질적 화재 위험성 값은 통계자료로부터 구할 수 있다. 예를 들어 캐나다에서 1996년 캐나다 화재 통계(캐나다 소방서장 및 감독관 위원회,1996)에 의하면 그 해에 아파트 건물에서의 화재 사망자 수가 88명이었다. 또한 1996년 캐나다 인구조사 데이터 (캐나다 통계, 1996)에서는 5층 이상 범주의 아파트 단위 총 숫자가 979,470이었다. 따라서 아파트 단위당 사망 위험성은 88을 979,470으로 나누면  $8.98 \times 10^{-5}$  사망자/아파트/년이 된다. 이 위험성 값을  $1.954 \times 10^{-5}$  사망자/주택/년 인 주택화재와 비교해 보면 아파트 화재의 위험성이 훨씬 높다는 것을 알 수 있다. 주택 화재의 위험성은 동일 주택 내에서 발화한 화재에 의한 것인 반면, 아파트 단위에서의 화재 위험성은 건물의 모든 아파트 단위에서부터 기인한 화재에 의한다는 점에서 이를 일부 설명할 수 있을 것이다.

#### 4. 정량적평가를 위한 자료

##### 1) 화재성장 시나리오 (Fire Growth Scenarios)

###### (1) 입력변수

① 결정론적 변수

- 연료종류 - 연료하중 - 구획구조 - 환기조건

② 임의변수

- 점화원 - 발화부 - 연료배치

③ 임의변수의 특성 때문에 다양한 형태의 많은 수의 화재시나리오를 상정할 수 있다.

④ 과거경험에 근거하여 임의변수로부터 발생화재시나리오를 일반적으로 다음과 같이 세가지 부류로 줄일 수 있다.

- 혼소화재
- 플래시오버전 화염화재
- 플래시오버 화재

⑤ 추가로 자동진압시스템(스프링클러 등)의 설치에 의한 성공/실패 확률을 고려할 수 있다.

(2) 출력변수

① 화재모델링 이용

- 온도 - CO농도 - CO<sub>2</sub> 농도 - 매연농도

2) 화재확산 확률(Fire Spread Probabilities)

(1) 개요

- ① 내화도(FRR : Fire Resistance Rating)의 고려
- ② 건물 구성요소의 내화도 수준은 표준화재저항시험으로 측정한다.
- ③ 구획화재의 성장은 반드시 표준화재의 성상을 따르지는 않는다.
- ④ 따라서 평가방법으로 실화재의 심도(severity)를 상당하는 표준화재와 같게 놓는 방법이 개발되어 화재저항 실패에 대한 평가가 가능하고, 또한 확률의 분포도 추정이 가능하게 된다.
- ⑤ 표준화재의 평균 또는 표준편차 확률에 대한 FRR값에 근거하여 실패확률을 계산한다.
- ⑥ 각 경로의 화재확산확률은 완전성장화재의 확률과 경로의 모든 경계요소의 실패확률에 의존된다.
- ⑦ 화재확산확률 계산은 거주자의 안전보다는 재산손실확률에 대한 비시간 종속의 평가를 위해 통상적으로 이용된다.

3) 연기확산 시나리오(Smoke Spread Scenario)

- (1) 연기확산(Smoke Spread) : 연기입자, 독성가스, 열의 확산을 포함
    - 연기확산의 지배요소
    - Boundary force
    - Stack effect
    - Wind effect
  - (2) 세가지형태의 제연전략
    - 도어 크로저 및 기계적 환기의 자동폐쇄
    - 화재층의 자동연기배출 및 직상층과 직하층의 가압(샌드위치 가압)
    - 계단실 및 엘리베이터 샤프트의 가압
  - (3) 제연전략의 성공/실패에 따라 연기확산 시나리오를 구축해야 한다.
  - (4) 연기확산 시나리오의 확률과 연기확산변수값(온도, CO,CO<sub>2</sub>,매연농도)을 이용하여 거주자의 인명위험과 재산손실위험을 평가해야 한다.
  - (5) 제연시스템의 성공/실패 확률은 적절한 설계와 보전에 상당히 의존된다.
- 4) 대피 시나리오(Occupant Evacuation Scenario)
- (1) 피난의 목표
    - 소요피난시간의 최소화 :  $RSET < ASET$
  - (2) 피난에 도움이 되는 주요 방화수단들
    - 자동연기경보기
    - 실시간 방송 시스템
    - 피난계획, 훈련 및 연습
  - (3) 기타 방화수단
    - 중간 대피 거점공간
    - 피난용 비상승강기
    - \* 이들 방화수단은 특히 장애 거주자들의 추가적 안전성에 역할을 하게된다.
  - (4) 방화수단들의 성공/실패 확률에 근거하여 거주자 대피 시나리오를 구축해야 한다.
  - (5) 거주자 대피 시나리오의 확률과 시간중속의 거주자 이동에 대한 계산으로 거주자의 인명 위험성을 평가해야 한다.
- 5) 소방대의 대응(Fire Department Response)
- (1) 갇힌 거주자의 인명손실 위험은 소방대에 의해 구출되기 까지의 화재나 연기에 의한 비거주조건에 노출된 시간에 좌우된다.
  - (2) 재산손실 위험은 소방대 진화까지 화재나 연기에 노출된 정도에 의존된다.

- (3) 출동시간(Intervention time)은 소방대가 거주자 구조나 진압작업을 시작할 시간을 의미한다.
- (4) 사상자수나 재산손실은 출동시간까지의 화재에 의한 비거주조건 노출 기간에 따라 평가해야 한다.
- (5) 소방대의 구조나 진압 효과는 출동대원 수, 장비나 수원 등의 진화자원에 의존된다.
- (6) 조기 출동과 효과적인 구조나 진압에 도움되는 방화수단들:
  - 현장의 security 요원
  - 자동통보시스템 : 화재감지시스템의 소방대와 연결
  - 소방대의 적절한 분포 : 빠른 이동시간에 기여
  - 구조나 진압장비
- (7) 방화수단들의 성공/실패에 따라 소방대 대응 시나리오를 구축해야 한다.
- (8) 소방대 대응 시나리오의 확률과 출동시간이나 구조와 진압의 효과에 대한 계산이 거주자 인명손실과 건물 재산손실 위험의 평가에 사용되어야 한다.

## IV. 정량적화재위험성평가 사례(고타드 터널)

### 1. 위험성평가의 방법

#### 1) 고타드 터널(Gotthard Base Tunnel)

길이 57km의 가장 길고, 가장 특징적인 알프스 횡단 터널 프로젝트(EUREKA Project)의 한 터널이며 유럽의 철도승객 수송과 화물운송을 위한 고속철도 네트워크의 한 부분으로 건설되었다.

#### 2) 장대터널의 복잡한 계획과정

안전성분석과 안전개념이 높은 수준의 안전을 보장할 수 있는 안전수단에 대한 계속적인 계획과 최적화의 도구로 많이 이용되고 있다.

#### 3) 안전에 대한 증명 절차

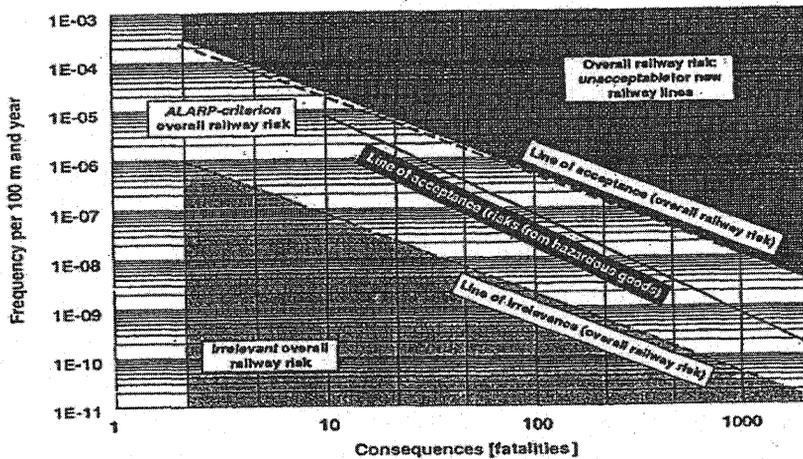
안전확보에 대한 확인절차가 모든 프로젝트 단계에서 적절한 수준으로 요구되는데 기본적으로 다음의 2가지 단계로 이루어진다.

##### (1) 정성적안전성분석

- 가능한 사고원인의 범위를 찾아내는 것이다.
- 적절한 안전수단을 확인하여 사상의 연결고리를 가능한 한 빨리 차단시키기 위한 것이다.

(2) 정량적위험도분석

- 정성적안전성분석에서 유도된 해당 위험요소 시나리오를 더욱 상세하게 분석하는 것이다.
- 통계 데이터의 활용과 안전수단의 효과를 고려하여 사상들이 FTA와 ETA에 의해 발생빈도와 사고결과의 정도를 이용하여 정량화 된다.
- 결과는 모든 필수적인 예방적이고 치치적인 안전수단을 취한 후의 남아있는 위험성이 어떤 것인지를 보여주며 이를 잔유위험도라 한다.
- 위험도의 정량화 표현인 빈도-다이아그램에 의해 안전수단의 최적화가 이루어질 수 있으며, 평가범주를 적용하여 위험도의 수용에 대한 가치도 판단할 수 있게 된다.



<그림 4-1> 고타드터널에서의 위험도 수용범주

2. 정량화에 대한 안전수단들의 영향

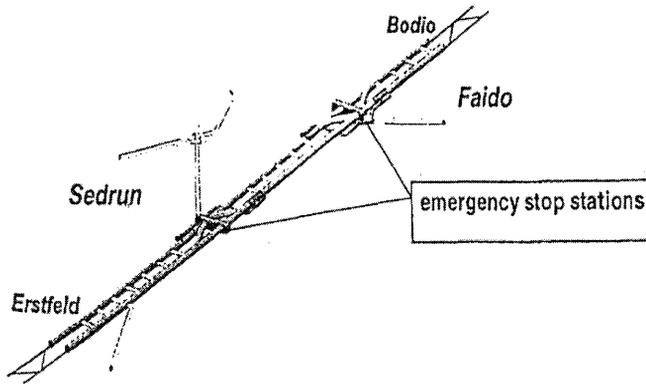
프로젝트의 최적화 과정동안, 몇 가지의 구조적, 안전상, 그리고 철도차량의 안전수단이 이들 터널의 안전수준에 대한 효과를 중심으로 검토되었다.

세계적인 가치의 인정을 위해 운전상 범주와 경제적 범주도 고려되었다.

다음과정으로 위험도 프로파일에 대한 핵심 안전관련 해당수단과 요소의 영향을 나타내는 방법으로 진행되었다.

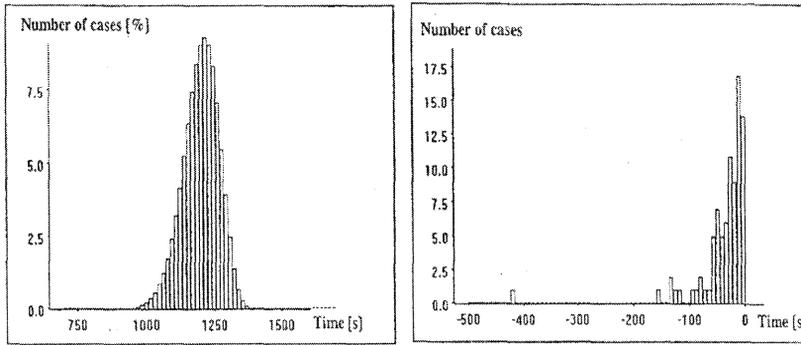
1) 비상정지지역간의 거리

- 비상정지지역의 개념은 터널을 주행 중인 객차화재의 경우 하나의 중심적인 처치수단이 된다.



<그림 4-2> 두 개의 비상정지지역

- 두 개의 비상정지지역에는 승객의 자체적 구난(대피거리, 배연)을 위한 조건들이 존재한다.
- 승객용기차가 비상정지지역에 도달 가능한지의 여부가 터널안전 표준의 매우 중요한 요소가 된다.
- 이러한 가능성을 결정하기 위해 기차의 위치에 대해 세밀하게 나누어진 통계적 분포를 시뮬레이션 하였으며 모든 중요한 요소들도 통계적 분포에 근거하였다.
- 계산에 의하면 객실내 화재 후의 승객용 기차가 터널의 다른 부분에서 정지하여 손상될 확률은 약 0.01%이었고, 이러한 낮은 확률은 철도차량의 잔유주행능력과 약 20km인 비상정지지역간의 거리에 의한 직접적인 결과 때문이라고 판단된다.
- 15~20분의 잔유주행능력으로 통상 기차는 20km거리를 달릴수 있다.(그 사상의 속도를 80km/h로 할 경우)



<그림4-3> 화재시의 잔유주행능력시간(좌측), 잔유주행능력시간의 부족 때문에 정지된 기차의 수(우측)(백만 개의 독립적 경우에 대한 Monte Carlo Simulation에 의함)

- 터널의 다른 부분에서 정지하고 손상될 확률은 비상정지역간의 거리에 민감하다.
- 4개의 비상정지역이 있는 것으로 가정한 터널 시스템에서는 다른 부분에서의 정지확률이 4배나 감소된다. 한편 한 개의 비상정지역이 있는 시스템의 경우에는 해당 확률이 3000배나 증가하게 된다.

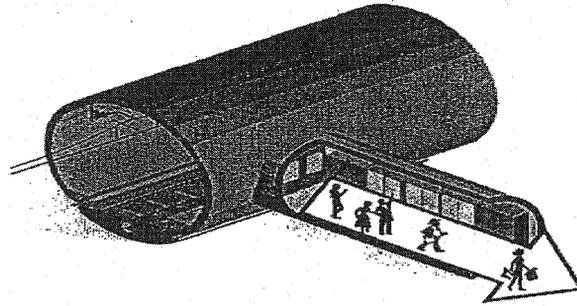
<표4-1> 비상정지역간 거리와 관련된 민감도 검토

가정한 시스템	기차가 터널내 다른부분에서 정지할 확률(%)
4개의 비상정지역	<0.01
1개의 비상정지역	~30
계획된 실제시스템	기차가 터널내 다른부분에서 정지할 확률(%)
2개의 비상정지역	~0.01

- 고타드 터널에서 비상정지역간 거리는 터널내 다른부분에서 정지될 확률이 비상정지역간 거리가 20km를 초과하면 거리에 비례하지 않고 증가하기 때문에 터널이 최적화된다는 결과를 나타내고 있다.

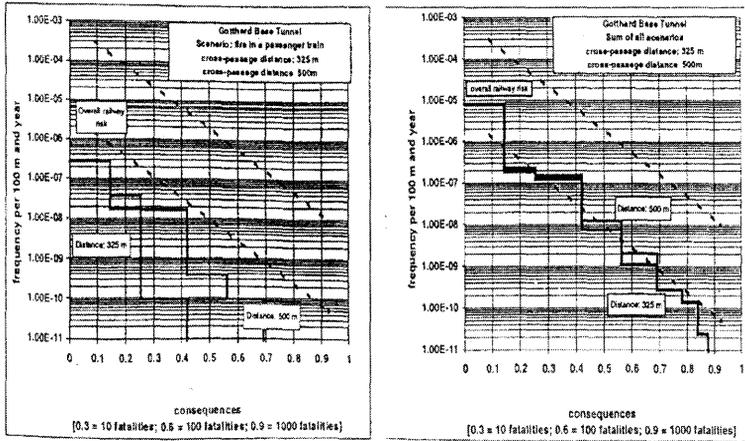
2) 교차통로간의 거리

- 터널내 어디엔가 하나만의 비상정지처가 있는 매우 드문 경우에 승객들은 325m 간격으로 두 터널 튜브를 연결하는 교차통로를 통해 대피해야만 한다.



<그림 4-4> 교차통로

- 이러한 교차통로들간의 거리가 자체구난 행동들과 승객들이 연기에 노출된 동안의 탈출시간에 영향을 미치게 된다.
- 교차통로간의 거리를 변화시켜(예, 500m로) 개인위험성에 대한 효과를 승객유동용의 시뮬레이션 모델에 의해 검토하였다.
- 시뮬레이션 결과에 의하면 교차통로의 위치와 관련된 기차의 위치에 따라, 그리고 기차내의 화재위치에 따라, 다음과 같은 요소들을 고려하면 승객의 대피시간이 분명하게 변함을 알 수 있다.
  - 긴 대피 경로
  - 연기가 찬 공기속에 긴 시간 머물음
  - 부분적인 좌충우돌에 의한 대피승객간의 상호 방해요소
- 위험도 프로파일에서 보면, 일어날 것 같지 않은 사상인 '객차내의 화재와 터널의 다른부분에서 정지'에 대한 결과 영향의 상당한 증가를 알 수 있다.
- 모든 시나리오에 대해서 보면, 교차통로간의 거리는 통합의 전체 위험도 프로파일에서는 매우 결정적인 요소가 되지 못하는 어떤 범위내에 있음을 알 수 있다.
- 이 사실을 통해 다른 예방적 수단(예로서 대부분의 객차화재에서 도달할 수 있는 환기가 구비된 비상정지역)이 안전개념에 의해 강구된다면 위험도 프로파일에 더 큰 효과를 미칠 수 있다는 것이 설명될 수 있을 것이다.
- 더욱이 고타드터널에서는 자체구난 조건이 실질적으로 안전함을 보장하는 325m거리를 유지하도록 결정하였다.



<그림 4-5> 교차통로간의 거리효과를 위험도프로파일에 표현

- a) 객차내 화재 시나리오(좌측)
- b) 모든 시나리오들의 총합(우측)

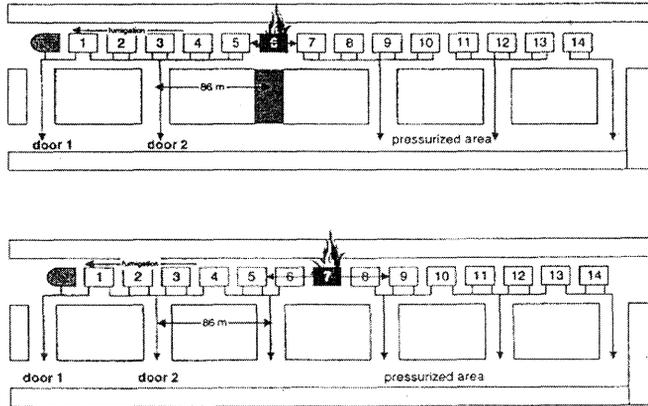
3) 자체구난 : 대피경로 능력의 효과

- 고타드터널에서 객차화재의 경우 자체구난 단계가 승객들의 생존을 위해 결정된다. 이 때에는 사상들의 시간적요소가 중요한 역할을 하게 된다.
- 자체구난 단계의 목표로서는 승객들이 수분내에 피난시까지 생존할 수 있는 대피처(비상정지역, 반대편 갱도)에 도달할 수 있는 것이다.
- 고타드터널 시스템과 적용된 안전수단들이 이러한 요구사항들을 만족하는 것을 증명하기 위해 자체구난 행동과 승객유동이 시간-유동 모델을 사용하여 시뮬레이션 되었다.
- 몇가지의 파라미터들(승객들의 공간요구, 문과 승강장 용량, 연기, 가시도, 피난속도)을 고려하여 기차를 떠나는 것부터 시작하여 피난처까지 도달하는데 필요한 시간이 결정되었다.
- 두가지의 주된 시나리오가 다른 조건들하에서 분석되었다.

(1) 화재발생 기차가 비상정지역에 정지하는 경우

- 비상정지역에서의 자체구난은 짧은 대피경로로서 최소한의 연기노출시간으로 특징된다.
- 승객들은 독립적으로 환기되는 피난처인 연결 갤러리를 통해 조명되고 2m 폭인 플랫폼으로 자체적으로 피난할 수 있게 된다.

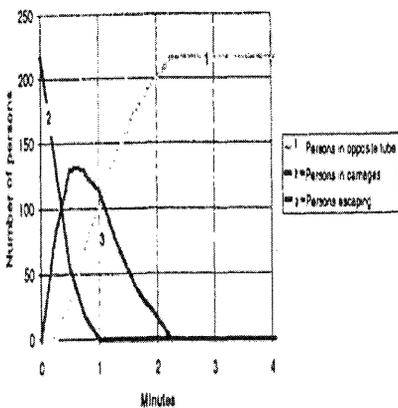
- 거기서는 적절한 기차를 이용하여 터널외부로 피난하게 된다.
- 승객유동에 대한 시뮬레이션을 통해 기차가 정지된후 2-4분 이내에 피난처 또는 비상 정지역에 도달함을 볼 수 있다.



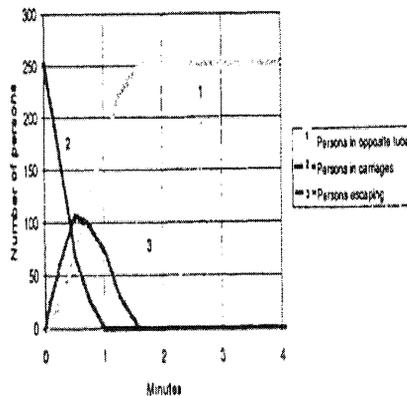
<그림 4-6> 비상정지역에서 화재발생 기차의 상황도

- a) Carriage in front of connecting gallery(above)
- b) Carriage between two connecting galleries(below)

Self rescue Fire in passenger train emergency stop station, case 1



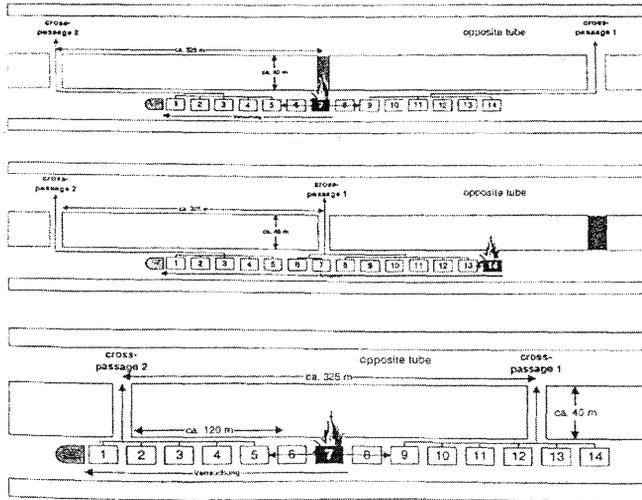
Self rescue Fire in passenger train emergency stop station, case 2



<그림 4-7> 화재발생 기차가 한 비상정지역에 정지한 후의 자체구난의 일시적 관계

(2) 화재발생 객차가 터널의 다른부분에 정지한 경우

- 기차가 비상정지역 도달에 실패할 경우 승객들은 325m간격으로 구비된 교차통로를 통해 반대편 경도의 피난처에 도달하기 위해 피난할 것이다.
- 피난시간은 터널내 기차의 상대적 위치와 함께 기차내 화원부의 위치에 민감하다.
- 따라서 다른 상황들에 대해 분석된 결과를 아래와 같이 보여준다.

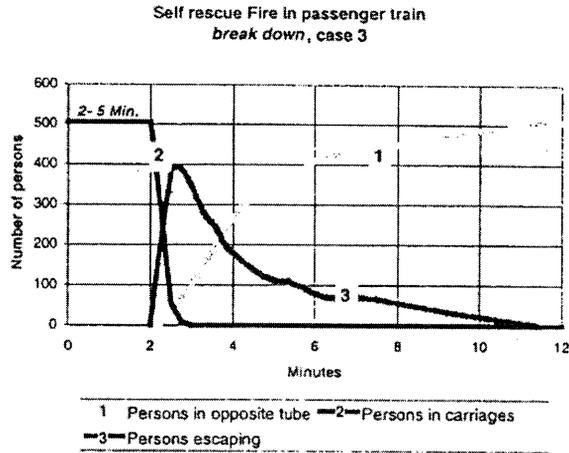


<그림 4-8> 터널의 다른 부분에 정지한 화재발생 기차의 상황도

- 화재객차가 교차통로 앞에 위치한 경우(위)
- 마지막 객차의 화재 경우(중간)
- 두 개의 교차통로사이에 있는 화재객차 경우(아래)

- 터널내에서 화재가 발생한 기차의 경우 연기가 찬 지역을 통한 더욱 긴 피난경로 때문에 자체구난이 방해 받으며 따라서 가시도 때문에 피난시간이 결정적으로 길어지게 된다.
- 시뮬레이션에서는 기차승무원들에 의해 승객들이 비상상황의 통보를 받는 것으로 생각했으며 따라서 기차가 정지하면 즉시 기차를 떠날 수 있는 것으로 상정하였다.
- 즉시 주행능력의 손실이 발생하거나 선로상 방해물에 의해 기대치 않은 정지가 일어나는 경우에는 기차로부터의 피난에 추가로 2-5분의 시간이 더 소요된다.
- 첫 번째 승객이 반대편 경도에 3-6분후에 도달할 수 있을 것이다. 상황에 따라 대부분의 승객들은 9-14분후에 반대편 경도의 피난처에 위치할 수 있었다.
- 자체구난 동안의 승객유동에 대한 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

- 비상정지역이 승객의 자체구난을 위해서는 최적의 조건임을 보여준다.
- 시뮬레이션을 통해 비상정지역의 개념이 확인된다.



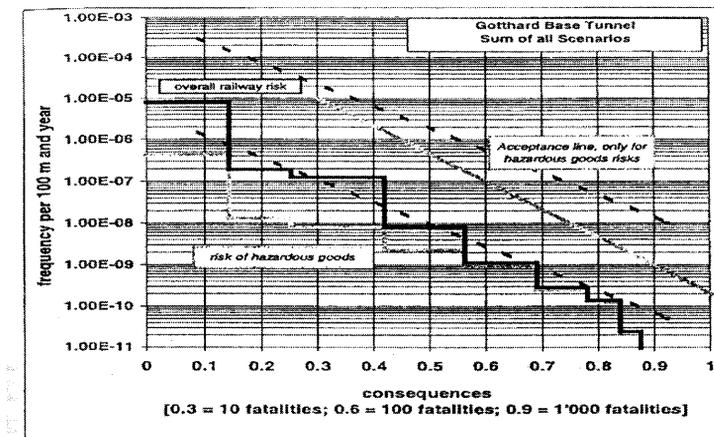
<그림 4-9> 기차에 화재가 발생한 후의 자체구난의 일시적 관계, case3

### 3. 위험도 결정과 민감도에 대한 결과

#### 1) 위험도의 결정

다양한 안전수단들 때문에 고타드터널의 위험도프로파일이 전체적 철도 위험도의 경우 무시할수 있는 범위에 놓이게 된다.

위험한 물질로부터의 위험도에 대해서도 위험도프로파일이 해당 수용가능선 아래에 위치하게 된다.



<그림 4-10> 고타드터널의 위험도 프로파일

고타드터널에서 취해진 안전수단들은 단순한 수단이지만 가능한 한 매우 효과적인 것으로서 매우 높은 안전수준으로 도달될 수 있게 한다.

제안된 안전수단들은 확인되고 실체화를 위해 적용되며 그 결과 정성적이고 정량적인 방호목적이 달성될 수 있다. 위험도는 수용가능하게 되고 따라서 안전에 대한 증명이 계획 단계에 따라 설정된다.

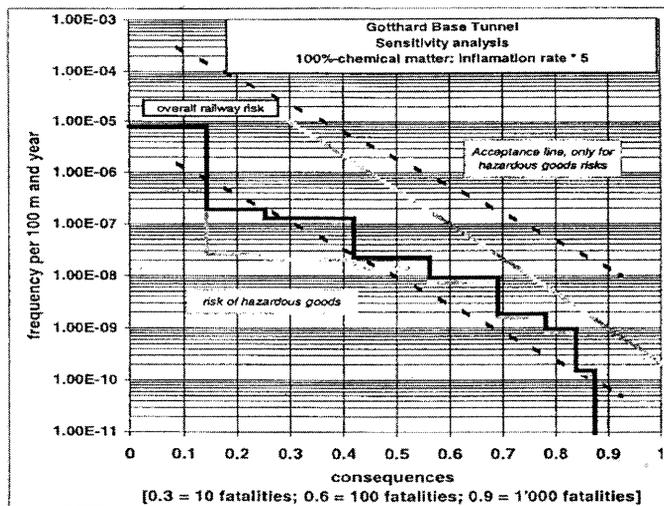
2) 결과의 민감도

위험도분석의 범위내에서 몇가지 파라미터들은 적절한 통계 데이터가 필요성에 따라 완전하게 준비될 수 없다는 사실 때문에 언제나 전문가의 판단에 근거하여 정량화 되어야 한다.

이 사실은 특히 안전수단의 효과와 그 결과의 범위에 대한 정량화를 위해서는 정당한 것이다.

민감도분석을 하기 위해서는 어떤 미결정사항이 위험도 프로파일에 상당한 영향을 미칠 것이므로 어떤 사전정의 사항들이 다음과 같은 파라미터들을 참고하여 정해져야 한다.

- 철도사고에 의한 두꺼운 벽 탱크차의 방출률(높은 값과 낮은값 모두에 민감)
- 발화속도(높은값에 민감)
- 위험성 물질의 수송(위험성 물질 조성에 민감)



<그림 4-11> 민감도 분석 위험성 물질; 100% 화학물질과 발화속도의 조합

종합하면, 이 분석에서는 비현실적인 가정을 적용하였음에도 위험도 프로파일이 위험성 물질에 대해 수용선을 뚫고 나가지 않음을 볼 수 있다(위의 <그림 4-11>). 따라서 여기서 내린 결론이 정당함을 유지한다고 할 수 있다.

## V. 결 론

오늘날과 같이 사회구조가 복잡하고 인간생활이 다양한 양상을 보여주면서, 한편으로는 안전하고 친환경적인 녹색안전환경을 갈구하는 배반적인 욕구가 팽배한 상황에서는 안전과 환경의 두가지 목적을 조화롭게 달성하려는 지혜가 필요할 것이다.

이러한 기대에 부응하려는 목적으로 세계적으로도 대심도지하공간 개발의 시도가 활발하며, 우리나라에서도 수도권을 중심으로 대심도지하도로망이나 대심도광역급행철도 건설이 계획되고 있으며, 남부지방에서는 거제도와 가덕도를 잇는 거가대교가 건설중이며 이 중의 일부 구간이 해저터널인 침매터널로 건설될 예정이며, 머지않은 장래에 KTX열차도 해저터널을 통해 제주도까지 연결하는 것을 계획중이다.

이렇게 생활공간이나 대규모 수송시설 등이 대심도로 지하화 됨에 따라 과연 이런 시설들이 안전할 것인가 하는 의문이 생기게 된다. 아무래도 시설이 지하화 됨에 따라 자유인여도가 감소할 것은 필연적으로 예측되는 상황이므로 이에 대한 대책이 함께 강구되어야 할 것이다. 시설의 지하화에 따라 예상되는 재해는 지하에서의 화재·폭발, 지진, 침수, 정전, 테러 등의 다양한 재해가 발생할 수 있으므로 이들 재난에 대응하기 위한 방재계획을 사전에 수립하여야 하는 것은 필수적인 요구라 할 수 있다. 이렇게 재난 대응을 사전에 계획하고 준비하기 위해서는 재난 발생시에 예측되는 피해 결과를 어느정도 사전에 정량화 할 필요가 있고, 이렇게 정량화 한 위험도를 해소시키는 방향의 사전 대응 및 대책의 강구가 가능하게 될 것이다.

본고에서는 이러한 목적의 대심도지하공간에 대한 정량적위험도평가 방법들에 대해 고찰해 보고, 또한 EUREKA 계획에 의한 유럽의 최장대터널인 고타드터널에서 시행한 정량적위험도평가의 결과를 간략하게 소개하였으므로, 앞으로 우리나라에서도 활발하게 건설될 대심도 지하공간 시설에 대한 정량적위험도평가에 대한 이해도를 높이는데 그 목적이 있다.

## [참 고 문 헌]

1. 이창욱(2010). 『화재공학 & 방화응용』 시대고시기획
2. 이창욱(2000). 『신 방화공학』. 의제
3. 한국산업안전보건공단. 『사고빈도분석(FTA·ETA)』. 산업안전보건교육원 교재
4. Alan Beard and Richard Carvel(2003). *The handbook of tunnel fire safety* Thomas Telford.
5. David Yung(2008). *Principles of Fire Risk Assessment in Buildings* WILEY
6. P Gerber, Emch & Berger AG(2001). *Quantitative Risk Assessment and Risk-Based Design of The Gotthard Base Tunnel* University of Dundee and Independent Technical Conference Ltd.

논문접수일 : 2010년 4월 3일

심사의뢰일 : 2010년 4월 10일

심사완료일 : 2010년 6월 4일