

정량적 위험도 분석을 이용한 복선철도터널에서의 적정 대피통로 간격 산정을 위한 연구

A Study of Proper Escape way interval by QRA on Single bored double track tunnel

노병국* 이호석** 송명규*** 추석연****
Roh, Byoung-Kuk Lee, Ho-Suk Song, Myung-Kyu Choo, Seok-Yeon

ABSTRACT

This paper describes a study to determine proper escape way interval for the design phase of single bored double track tunnel. Among many methods which determine escape way interval, we choose a QRA(Quantitative Risk Analysis) method. But a different method must be chosen differ from other country because of special design situation of Korea. So, it is necessary to develop a method which considers a special design condition of Korea. Because fire accidents of railway tunnel are a rare event, simulated situation can be produced by CFD simulation and evacuation analysis simulation. However, it is generally difficult to estimate of fatalities from these methods, so a concept of FED is introduced to estimate of fatalities. Quantification process provides effective results for practical design stage and the result were employed in design.

1. 서 론

터널의 방재설계에 있어 가장 중요한 요소는 피난승객의 안전한 탈출이다. 한국의 지반특성과 경제적 상황으로 인하여 복선터널이 선호되고 있다. 복선터널은 단선병렬터널과 비교하여 다른 방재특성을 가지고 있다. 특히, 피난대피통로의 설계에 있어 다른 방법으로 접근하여야 한다.

실제 설계에 있어 피난대피통로를 적절하게 설계하는 것은 매우 어려운 일이다. 승객의 안전성과 경제성의 사이에서 피난통로의 설치가 이루어져야 하기 때문이다. 이것은 설계의 최적화에 관한 문제이다. 본 연구에서는 복선철도터널에 있어 피난연결통로의 최적설계에 대한 방재적 접근방법 수립에 대하여 기술한다. 우리는 정량적 위험도분석기법을 터널의 방재설계에 적용할 것이다. 그러나, 한국적 특수성과 접근방법의 수립을 해결하여야 한다. 또한, 적절한 계산도구의 활용이 이루어져야 한다. 본 논문은 접근방법에 대한 우리의 경험과 실제적용사례에 대하여 기술할 것이다.

* 한국철도시설공단, 부장, 종신회원, E-mail : rohbk@hanmail.net, TEL : (042)607-4392

** (주)비엔텍아이엔씨, 대표이사, 정회원, E-mail : ceo@bnttek.co.kr, TEL : (02)529-4796

*** (주)단우기술단, 기술연구소, 비회원, E-mail : singsong@paran.com, TEL : (031)776-0070

**** (주)단우기술단, 상무이사, 정회원, E-mail : danwchoo@hanmail.net, TEL : (031)776-0070

2. 터널 방재설계의 접근방법

2.1 철도터널 화재특성

한반도는 전체면적의 70%가 산악지형으로 이루어져 있기 때문에 철도 혹은 도로 건설시 터널의 비중이 높다. 비교적 절리가 적은 견고한 암반으로 인하여 shield공법보다는 NATM공법이 선호되고 대부분 복선 터널로 건설된다. 복선터널은 단선병렬터널에 비하여 연기의 전파속도는 느리지만, 단선병렬터널과 같이 반대편 터널로 통하는 연결통로를 설치하는 것이 불가능하기 때문에, 사갱이나 수직갱을 이용한 외부대피방법을 채용해야 한다. 외부대피통로가 많은 경우 터널내의 사고에 대한 승객의 안정성을 높일 수 있으나, 사갱 혹은 수직갱의 건설에 따른 높은 공사비 부담으로 인해 대피경로를 다수 설치하기는 곤란하다. 따라서 경제적으로 무리가 없는 적정수준의 대피경로를 설치해야 하지만, 적정한 대피경로의 산정시 승객의 안정성 가장 우선적으로 다루어져야 할 것이다.

터널 내에서 화재를 동반한 사고가 발생하게 되면, 복선터널의 탈출구는 그 자체가 된다. 만일 외부로 연결된 탈출로가 없다면 승객은 터널 내를 보행하여 외부로 나가야 할 것이다. 화재사고 시에는 독성을 가진 연기가 발생하므로 승객이 외부로 대피하기 전에 연기에 노출된다면 승객이 처하게 되는 위험성은 증대될 것이다. 터널 내에서 연기의 전파는 터널의 특성에 따라 다르다. 만일 연기전파가 매우 빠른 터널에서 탈출로가 지나치게 먼 곳에 있다면 대피하는 승객들에게 도움이 되지 않을 것이다. 반면, 너무 가까운 간격으로 설치된다면 대피승객에게는 유리하지만, 경제적으로 매우 불리할 수 있다.

2.2 화재안전설계를 위한 설계방법론 선정

터널의 화재안전설계에 있어 적절한 수준의 대피통로를 계획하는 것은 매우 중요하다. 이를 위한 방법으로 실험, CFD시뮬레이션과 같은 여러 가지의 방법이 적용되어 왔다. 그러나 기존의 방법은 연기의 거동에 치중하였기 때문에 인간이 처하게 되는 위험성은 상대적으로 소홀히 평가되었다. 또한, 이를 정량적으로 평가하는 것이 어려워 주관적인 판단이 개입될 여지가 많은 문제점이 있다. 우리는 이러한 여러 가지 문제점을 극복하기 위하여 정량적 위험도분석이라고 일컬어지는 방법을 사용하였다. 이 방법은 위험도를 사고발생확률과 사고발생피해의 곱으로 산정하는 단순한 원리에서 출발한다. 하지만 단순해 보이는 이 기초공식은 매우 심도 있는 의미를 가지며, 객관적인 척도로서 활용될 수 있다.

어떠한 하나의 계획을 평가하는 것은 정량화된 점수로 나타나는 것이 매우 이해하기 쉽다. 정량화하기 힘든 경우라도 몇 가지 논리적이고 타당한 규칙에 의하여 정량화될 수 있다. 접근방법이 명확하다 할지라도 현실적으로 계산이 너무 복잡하거나 많은 노동력이 요구되는 과정은 실무에 도움이 되기 어렵다. 따라서 수립된 접근방법을 현실화시켜 주는 도구가 요구된다. 본 연구는 현실적으로 주어진 프로젝트에 반영할 수 있는 접근방법과 이를 구현할 수 있는 도구를 완성하는 것이다.

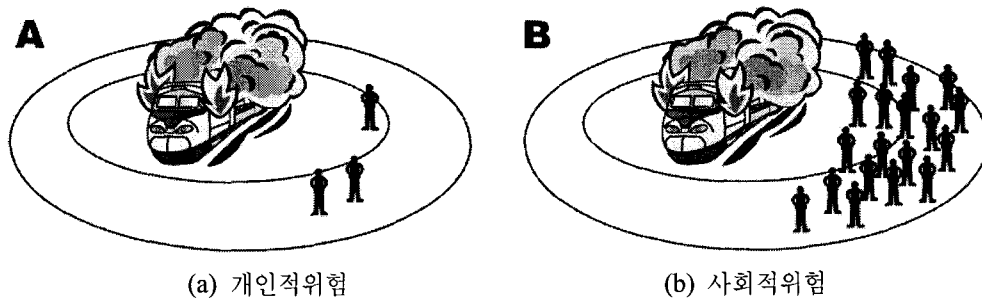


그림 1. 위험의 분류

3. 정량적 위험도 분석의 기본개념

3.1 위험의 정의

위험은 앞에서 기술한 바와 같이 사고의 발생확률과 사고 발생피해의 곱이라는 단순한 개념에서 출발한다. 이를 보다 자세히 기술해보면, 위험은 개인적 위험과 사회적 위험으로 분류된다. 위의 그림 1에 나타난 바와 같이, 동일한 위치의 개인이 처한 위험은 A와 B가 동일하다. 하지만, 전체적인 피해는 B가 상대적으로 크게 나타난다. 즉, 동일한 사고일지라도 사회적 위험은 사고의 크기와 인명피해가 동시에 평가되어야 한다. 많은 승객이 이용하는 철도와 같은 시설물에 대해서는 위험도 평가 방법을 사용하는 것이 적절하다.

3.2 위험도 분석에 대한 일반적인 개념

터널에서 화재사고가 발생하였을 경우에 사용되는 방법은 수치시뮬레이션을 이용한 것이다. 이러한 방법은 컴퓨터의 발달로 과거에 비하여 매우 용이하게 되었다. 과거에 실험 및 실제 사례에 의지하던 방법에서 벗어나 보다 많은 경우의 사례를 만들어낼 수 있게 되었다. 이 방법의 단점은 연기나 열기류의 거동에 따른 특정장소에서의 개인적 위험만을 평가하는 것이 가능하다는 것이다. 즉, 어느 한 지점에서 다른 지점으로 한 명의 승객이 이동하는 경우에, 승객이 보행 중에 입는 누적피해를 감안할 수 없다는 점이다. 이러한 수치시뮬레이션의 단점은 종합적인 피해정도를 판단하여야 하는 우리의 요구에 부응하지 못한다.

다양한 조건하에서 사고발생에 의한 사회적 위험도를 판단하기 위해서 정량적 위험도 분석기법을 고려하게 되었다. 이 기법을 터널에 적용하기 위해서는 수치 시뮬레이션의 개발이 필요하며, 개인적 위험의 평가 척도를 수립하여야 한다. 본 연구는 이러한 과정의 수립과 설계도구의 개발을 위한 것이다.

4. 상호작용 방식의 QRA

4.1 위험 요소 분석

터널을 운행 중인 열차에 화재가 발생하여 정차했을 경우, 터널의 내부는 화재로 발생한 화염과 유독가스에 의해 급격하게 위험이 증가하게 되고, 열차의 승객들은 안전한 곳으로 신속하게 대피해야 한다. 승객이 안전한 지역으로 대피하는데 있어서 영향을 줄 수 있는 피난활동 관련 요인으로는 유독가스에 의한 신체능력의 저하, 연기에 의한 가시도 저하 및 피난 속도의 저하, 유도표지판의 가독성, 제연용 환기기 작동 등이 있다. 유독가스의 전파는 터널의 단면적, 종단 구배 등과 같은 터널의 구조적 특징과 제연용 환기기와 같은 방재적 특징 등이 밀접하게 관련된다.

터널 내에서 화재발생시 터널의 구조적 특성과 방재적 특징을 고려한 화재의 성상은 컴퓨터를 이용한 수치시뮬레이션을 이용하여 모사할 수 있으며, 승객들의 피난상황은 인간의 행동특성을 고려한 피난해석 시뮬레이션을 이용할 수 있다. 그러나 이러한 수치시뮬레이션은 각각의 독립된 상황을 모사하기 때문에 실제적 상황과 같이 서로 상호작용하는 결과를 도출하기 어렵다. 따라서 승객이 이동하면서 유독가스나 열에 대한 영향으로 신체조건이 저하되는 현상을 복합적으로 모사하는 것이 보다 현실적 이라할 수 있다.

4.2 상호작용 방식

터널 내 화재발생시 연소시간이 증가할수록 화원으로부터 농도가 짙은 유독가스가 먼 거리로 확산되며 이때의 연기는 가시거리를 감소시킨다. 피난활동을 하는 승객들은 가시거리의 악화로 피난속도가 감소하게 되며 이로 인하여 유독가스를 더 많이 흡입하게 된다. 유독가스의 흡입은 호흡활동을 방해하여 신체능력을 저하시켜 피난활동을 하지 못하는 상황에 이르게 하고 사망에까지 이르게 할 수 있다. 이때, 승객 개개인의

위치에 따른 위험도의 차이가 발생하게 되며, 그림 2. 와 같은 상호작용하는 위험요소를 동시에 분석함으로써 실제적인 위험상황에 근접할 수 있다.

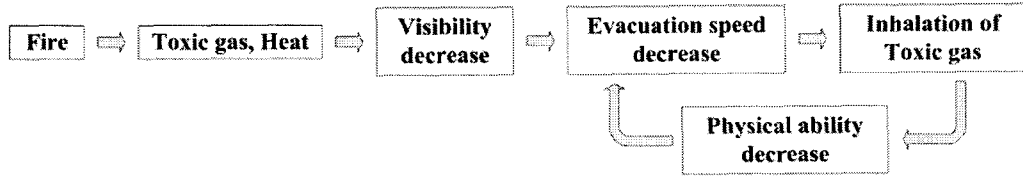


그림 2. 위험요소의 상호관계

호흡을 통해 흡입한 유독가스에 대한 위험은 방재안전공학에서 사용하는 FED를 적용한다. FED는 화재로부터 발생하는 열, 유독가스 등이 시간변화에 따라 인체에 누적되는 위험을 수치화하여 계산하는 것으로 ISO/TS 13571의 방법을 따른다. 유독가스 농도와 열을 시간변화에 따라 누적시켜 다음 식과 같이 계산한다.

$$FED = \sum_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{t_{trad}} + \frac{1}{t_{conv}} \right) \Delta t \quad (1)$$

$$FED = \Delta t \sum_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(C_t)_i} \Delta t \quad (2)$$

여기서 t_{trad} 는 식(3)과 같이 급속하게 감소하는 복사열류가 피부에 미치는 시간이며, t_{conv} 는 식(4)와 같이 기본 의복을 갖춘 피난중인 승객이 열류에 노출되어 취득하는 분당 누적 대류열량이다. C_i 는 물질 i 로부터 발생하는 화재 유출물의 농도이다.

$$t_{trad} = 4q^{-1.35} \quad (3)$$

$$t_{conv} = (4.1 \times 10^8) T^{-3.61} \quad (4)$$

여기서 q 는 복사열류(radiant heat flux)이며, T 는 건구온도(dry-bulb temperature)이다.

화재로 인한 인체의 영향은 승객의 위치에 따라 차이가 발생하며 이러한 승객의 위치는 개개인의 피난 속도와 관련된다. 일반적으로 열차로부터 하차하는 과정에서 좁은 출입문과 통로에 의해서 병목현상이 발생한다. 병목현상으로 지연되는 보행속도는 피난해석 소프트웨어인 SIMULEX를 사용하여 세밀하게 분석하고, 연기에 의한 가시거리의 변화를 보행속도에 적용할 수 있다(David A. Purser, 2002).

이러한 특성을 종합하여 화재에 의한 터널내부의 환경변화와 다양한 원인에 의한 보행속도를 통합하여 개개인의 FED를 분석하는 ICS-QRA(Interactive CFD & Statistics QRA)를 개발하였다. FED분석의 결과로 산출된 사망자수는 사고발생확률과 곱하여 위험을 산술적으로 나타낼 수 있으며, ICS-QRA는 여러 사고 시나리오에 의한 사고발생확률과 사고결과를 일괄적으로 계산하여 FN-curve를 결과로 제공하게 된다. 그림 3은 사고결과를 분석하는 흐름도를 나타낸다.

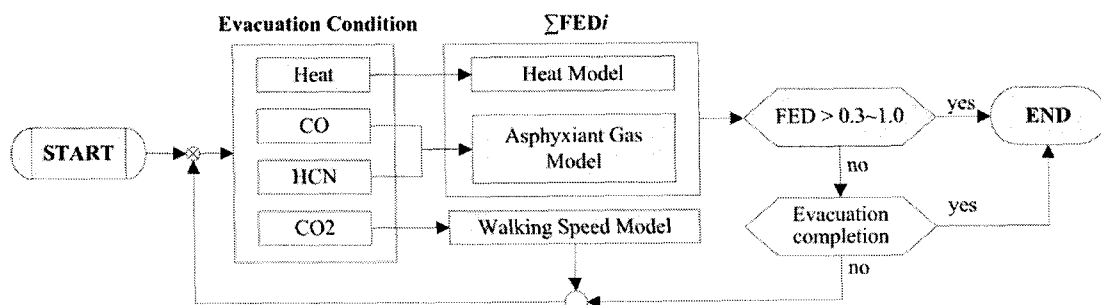


그림 3. 사고결과 흐름도

5. 대피통로에 따른 위험도 분석

5.1 분석개요

터널 내에서 피난을 목적으로 하여 외부로 연결된 통로나 안전시설물이 없을 경우 터널의 잠재적 위험을 위험분석을 통하여 평가할 수 있다. 또한 안전성 향상을 위한 다양한 계획에 대한 위험분석을 수행하여 가장 적절한 설계를 선택할 수 있다. 본 연구에서는 연장이 4.8km인 복선철도터널을 QRA를 이용하여 외부로 연결되는 피난통로의 설치에 대한 필요성을 검토하였으며, 분석에 사용된 터널의 제원은 표 1와 같다.

표 1. 터널의 제원

입력자료	입력치	입력자료	입력치
터널 연장	4,800 m	터널 단면적	70.9 m ²
터널 천단고	7.9 m	구배	5.8 ‰
대피통로 길이	849 m	대피통로 간격	-

터널내의 안전 시설물은 외부로 연결된 피난통로, 대피로 안내 시스템, 핸드레일, 대피로, 가압을 할 수 있는 차단구역 등이 있다. 열차사고에 의한 화재의 발생은 여러 가지 원인에 의해 발생할 수 있으며 그림 4 과 같이 사고 시나리오를 구성하였다. 한국의 열차사고 통계에 의한 화재발생 확률과 수치시물레이션에 의해서 얻을 수 있는 사고결과에 의한 조합이다. 각각의 시나리오에서 얻을 수 있는 위험수치를 통합하여 FN-곡선을 작성하며, 위험도를 평가한다.

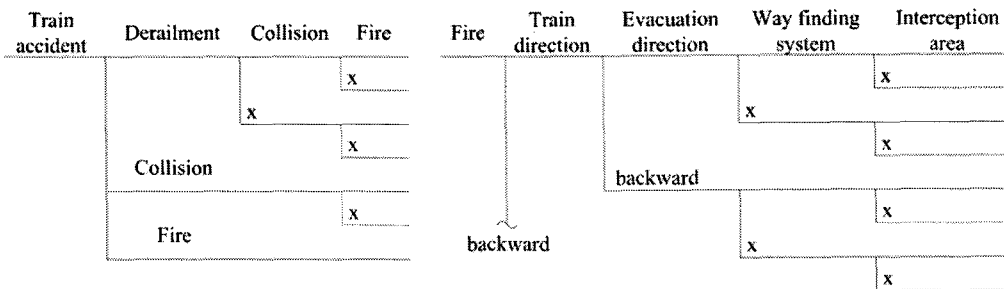


그림 4. 화재 사고의 시나리오

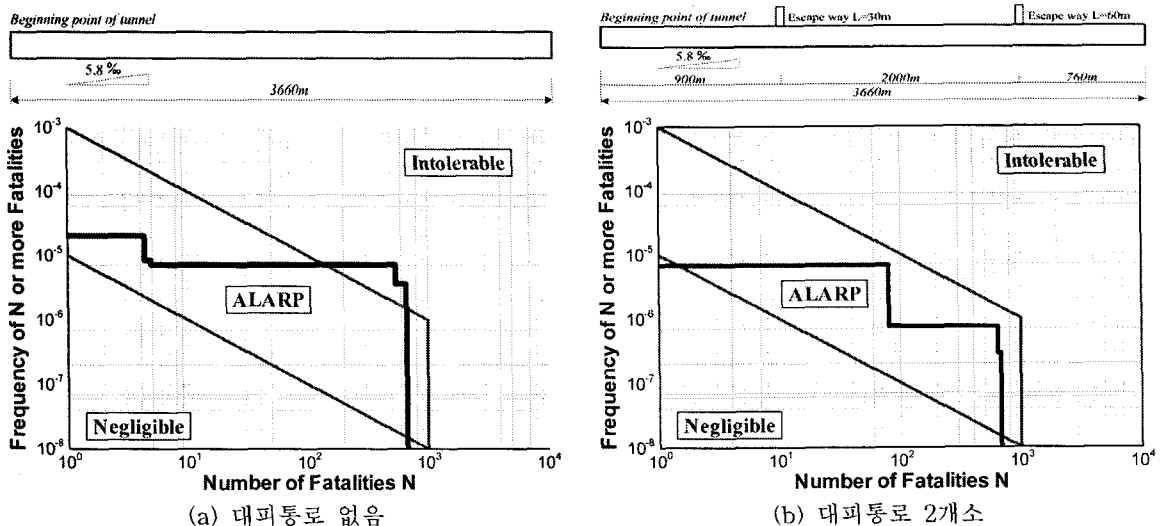


그림 5. FN-곡선

5.2 분석결과

위험도분석결과는 사회적 위험을 평가하는 방법인 FN-곡선을 이용하여 터널내 사고의 위험을 평가하였다. 위험기준은 홍콩기준을 적용하였으며 결과는 그림 5와 같다. 정량적 위험도 분석결과에 따르면 대피통로가 없는 경우는 위험도 기준에 미달하며, 2개 이상의 외부대피로가 필요한 것으로 나타났다. 이는 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)의 개념으로 경제적인 방재설계 개념을 만족한다.

6. 결론

본 연구에서 우리는 터널의 위험성을 평가하기 위한 적절한 방법을 도출하였으며, 이는 한국적인 특수성을 감안한 방법이다. 우리가 수립한 방법은 복선철도터널의 방재설계에 적용되었으며, 피난대피통로의 적절한 간격을 결정하는데 사용하였다. 터널의 설계조건에 의하여 화재시 피난대피로의 간격에 따라 Not Applicable, ALARP, Negligible의 3단계 평가가 수행되었다. 이를 통하여 적절한 피난통로의 계획방향을 설정할 수 있었다. 정량적 위험도 분석기법을 통하여 철도터널(복선터널)에 적용한 결과, 4.8km의 터널에 대하여 2개소 이상의 외부대피용 통로가 필요한 것으로 평가되었다. 이와 더불어 피난통로 접속부에 연기차단시설을 갖출 필요가 있는 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 정량적 위험도분석을 통한 위험도의 평가 방법은 터널의 특성을 더욱 객관적이고 공정한 방법으로 평가하는 방법임을 알 수 있었으며, 향후 보다 복잡하고 다양한 요소들에 대한 평가방법을 추가적으로 개발해야할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Bäckman, Johan (2002), "Railway Safety Risks and Economics", Stockholm: Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure and Planning.
2. David, A. Purser (2002), "Toxicity Assessment of Combustion Products" SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, Section two, pp. 83-171.
3. David, J. Ball and Peter, J. Floyd (1998), "Societal Risks", HSE Books.
4. Frantzich, Håkan. (1998), "Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering", Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden.
5. Geir, Jensen. (1998), "Wayfinding in heavy Smoke: Decisive Factors and Safety Products Findings Related to Full Scale Tests".
6. Ingason, Haukur, "An Overview of Vehi Fires in Tunnels", SP Swedish National Testing and Research Institute, Sweden.
7. ISO/TS 13571 (2002), "Life-threatening components of fire Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data".
8. Jonkman, S.N., P.H.A.J.M. van Gelder, and Vrijling, J.K. (2003), "Flood Risk Calculated with different risk measure", European Safety and Reliability Conference.
9. Korean National Railroad (2004), "Statistical Yearbook of Railroad".
10. Railtrack PLC (1997), Infrastructure Risk Modelling Emergency Lighting System".