

철도터널 화재 위험도 평가 프로그램의 개발

(Development of Railway Tunnel Fire Risk Assessment Program)

윤성욱¹, 노재성², 유홍선², 이성혁²

¹GS건설, ²중앙대학교 기계공학과

1. 머리말

한국, 일본, 프랑스, 독일 등 많은 국가에서 교통량 증가와 도시 집중화를 극복하기 위하여 고속 철도시스템을 운영하고 있다. 이들 나라의 공통점은 많은 산을 가지고 있고, 더 효율적인 운송시스템의 필요에 의하여 철도터널의 건설이 계속 증가 추세에 있는 점이다. 이러한 점을 고려해 볼 때 철도터널 화재의 위험성은 증가하고 있으며, 이러한 철도터널 화재는 발생 빈도는 낮지만 한번 발생하게 되면 큰 인명 및 경제적 손실로 이어지기 때문에 터널 화재 안전에 대하여 큰 관심을 가져야만 한다. 특히 장대터널의 경우 노선 직선화에 따른 운행거리 감소 및 운행 속도가 증가하는 장점이 있지만, 이에 반해 대피 등의 방재 성능이 감소하게 되고 터널의 장대화로 인하여 터널 시스템은 매우 복잡해지고 많은 요인들이 승객의 생명 안전에 영향을 주게 되므로 이들을 고려한 안전설계가 필요하다.

따라서 위험도 기반의 설계 기법이 요구되고 있으며, 이를 위해서 정량적 위험도 분석이 필요한 실정이다. 이러한 배경으로 본 연구에서는 정량적 화재 위험도 분석 기술을 활용한 프로그램을 개발하여 터널 설계자 및 관련 기술자들에게 터널 요소들의 정량적인 영향을 파악할 수 있도록 하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 국내 철도터널 화재 통계

외국의 경우 철도터널 내 화재사고로 대형 인명피해가 발생한 사고가 보고되고 있으나 국내의 경우 아직까지 철도터널 화재사고가 보고된 적은 없다. 따라서 철도터널 내 화재 발생빈도는 터널이 아닌 모든 선로 상에서의 화재 발생빈도와 동일하다는 가정 아래 국내 철도차량에 대한 화재사고를 조사하여 철도터널 초기화재 빈도를 구하는데 사용하고자 하였다. 철도청의 철도사고 분석 보고서와 운전사고 및 운전장애 월보의 내용을 검토한 결과 표 1과 같이 조사되었다. 조사한 바에 의하면 1999년부터 2005년까지 7년간 총 27건의 화재사고가 발생하였으며 이를 연평균으로 따지면 한해 3.86건 정도가 발생하였다고 볼 수 있고 이를 총 열차운행거리로 나누어 화재발생빈도를 구하면 표 2와 같다.

또한 국내에서 지난 7년간 발생한 27건의 열차화재사고에 대해 원인을 분석해 본 결과 표3과 같이 조사되었으며 외국의 경우는 국내와는 다른 원인별 분포를 보이고 있다.

표 1 국내 철도 화재사고 통계자료

	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	7년간 평균
열차킬로(백만)	95.1	97.3	99.6	101.6	101	105.5	108.4	107.9	107	108.1	113.6	111.3	108.8
열차 충돌	2	1	-	-	1	1	-	1	1	1	-	-	0.57
열차탈선	10	14	5	4	7	6	5	3	1	3	2	4	3.43
열차화재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
차량화재	9	4	1	5	5	8	7	7	2	1	2	-	3.86
취급부주의	1	1			2	1	2	2					0.71
차량결합	4	3	1	4	2	4	2	4	1		1		2
기타 /외부	4			1	1	3	3	1	1	1	1		1.43

표 2 국내 철도 화재사고 빈도

년도	99	00	01	02	03	04	05	7년평균
열차킬로 (백만/year)	105.5	108.4	107.9	107	108.1	113.6	111.3	108.8
화재사고(건)	8	7	7	2	1	2	0	3.86
화재사고 발생빈도 (건/1억열차킬로)	7.58	6.46	6.49	1.87	0.93	1.76	0	3.58

표 3 국내 및 국외 철도 화재사고 원인별 분포

<국내>

Cause	Percentage
Derailment-Collision Fire	0%
Derailment-No Collision Fire	0%
Collision Fire	0%
Mech/Elec Defect	70.4%
Arson (Terror)	29.6%

<국외>

Cause	Percentage
Derailment-Collision Fire	5.5%
Derailment-No Collision Fire	5.5%
Collision Fire	17.0%
Mech/Elec Defect	57.0%
Arson (Terror)	14.0%

3. 정량적 화재 위험도 평가

성능 위주의 화재 안전설계는 수송시스템에서 더욱더 일반화되어 많이 사용되고 있으며, 이것은 위험 위주의 설계와 같은 개념으로 사용되고 있다. 철도 터널에서 화재 발생시 승객들의 생명안전은 연기전파, 화재 크기 및 성장률, 화재 위치, 승객의 반응시간, 화재 감지, 피난로의 크기, 배연 조건 등 많은 불확실성을 가진 변수들에 크게 의존한다. 이러한 변수들을 계산하고 영향을 파악하기 위해서는 정량적 위험도 분석 기술이 필요하다. 일반적으로 위험이라는 용어는 바람직하지 못한 결과가 발생할 확률을 말한다. 본 위험도 분석프로그램 개발에서 위험의 개념은 철도터널에서 화재발생으로 생겨난 열 및 연기로 인해 사망할 확률로 정의한다. 본 철도터널 위험도 분석 프로그램은 확률론적 화재 모델로 화재 안전 분야에서 화재 위험성을 평가하는데 유럽 선진국에서 오랫동안 사용되어 온 기술을 사용한다. 구체적으로는 정량적 위험도 분석을 의미하는 방법으로 화재 안전 분야에서 위험을 이해하고 관리하는데 유용한 도구로 간주되어 사용되었다.

3.1 확률론적 모델

확률론적 화재모델은 다양한사고의 발생빈도 와 그 영향을 고려하여 원하지 않는 결과가 발생할

확률을 예측하여 위험의 개념을 수치적으로 표현하는 것이다. 이 화재모델은 변수의분포를 이용하여 여러 가지불확실성(근본적인 지식 부족으로 인한 지식 불확실성과 우연적 발생으로 인한 무작위 불확실)을 고려할 수 있다.

반면에 결정론적 화재 모델은 사용자가 지정한 일련의 입력변수들을 사용해서 화재 성장과 피난 시간 등을 분석하고, 그 결과를 통하여 피해 정도를 예측하고 평가하는 방법으로 주어진 입력 값에 대한 단 한가지의 결과만을 제공하게 된다. 만약불확실성을 다루기위해서는 입력 자료를 수동으로 바꿔 가면서 여러 번의계산을 수행하여 다양한 결과 값을 얻게 된다.

화재안전 분야에서승객들의 생명안전(life safety)을 평가하는 것은 불확실성을 포함한 연기전파, 공간의 기하학적 모양, 배연시스템, 화재 위치, 화재 크기, 화재성장률 등 많은 요인들에 의하여 영향을 받게 된다. 그러므로 생명안전에 영향을 주는 가능한 많은 불확실성을 고려하기 위해서 결정론적 화재모델을 사용하는 것 보다 확률론적 화재 모델을사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

확률론적 모델은 네트워크 모델, 통계학적 모델, 시뮬레이션의 3가지로 구분할 수 있다.

먼저, 네트워크모델(Network Model)은 하나의 화재성장에서 다른 성장으로의 전환과 화재진압, 수동적 화재방어 등을 화재의 성장에 대해 기존의 데이터나 기술적 또는 공학적으로 평가된 데이터를 기반으로 하여 지정하는 확률에 의하여 수행된다. 통계적 모델(Statistical Model)은 과거의 사고 데이터로부터 발생 확률을 결정하는 것이다. 그러나 사고의 확률을 구축할 만큼 데이터의 양이 많지 않아 사용되는 경우가 많지 않다. 시뮬레이션 방법(Simulation Method)은 다른 조건들이 결과에 어떻게 영향을 미치는 지를 알아보는 것이다. 이는 다른 물리학적, 확률론적, 결정론적 모델을 이용하여 일련의 조건들에 대한 결과를 예측할 수 있다.

3.2 위험도 평가 수행 순서

철도터널 화재 위험도 평가는 다음과 같은 순서로 수행된다.

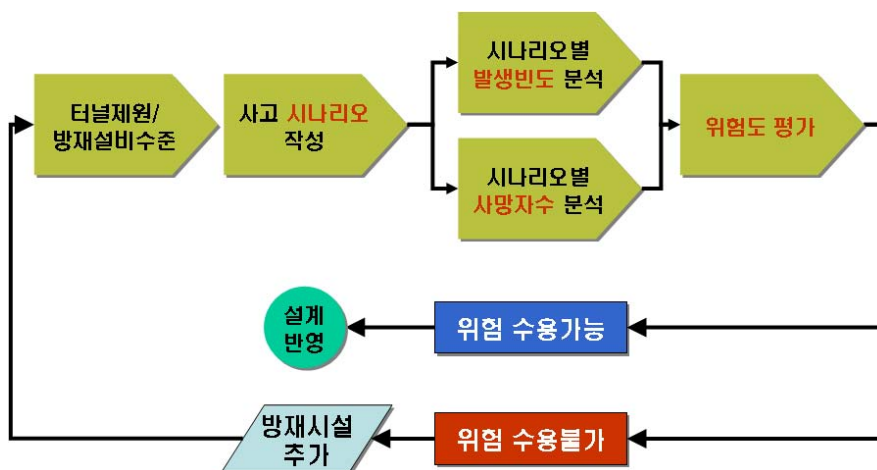


그림 1 철도터널 화재위험도 평가 수행순서

3.3 시나리오의 작성 및 사고발생빈도

위험도 분석을 위하여 시나리오구성은 반드시 필요한 요소이다. 시나리오 구성을 통하여 어느 사망자수가 나타날 확률이 구해지게 된다. 시나리오 구성은 이벤트 트리 기법을 사용하여 처음 사고의 빈도가 각 부 시나리오(sub-scenario)가 발생할 확률을 구하게 된다. 여기서 부 시나리오는 이벤트트리 기법에서 결과(outcome)으로도 사용되는 용어이다. 실제 철도 화재시 발생할 수 있는 시나리오는 매우 많으나 각 시나리오가 발생할 확률에 대한 정보를 얻기 어렵기 때문에 본 프로그램 개발에서 사용하는 시나리오는 분기 확률을 알 수 있는 사건(event)을 위주로 시나리오를 구성하였다. 먼저, 이미 앞절에서 언급한 국내외 통계자료를 통하여 화재 발생 원인을 그림 2와 같이 5가지로 구분하였다.

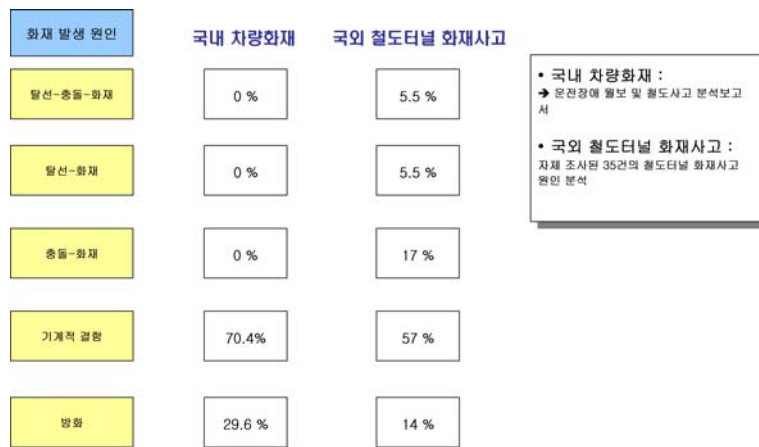


그림 2 국내외 화재발생 원인 확률

그 다음사건은 화재감지 여부이다. 화재가 감지 되었을경우의 확률을 80%, 화재 감지에 실패할 확률을 20%로 기본값을 가정하였다. 이 값은 British Standards Institute(1997)에서 인용하였다. 그 다음 사건은 화재 소화(진압) 여부로써 보통 화재 진압의 확률은 5~ 10%의 값을 사용한다. 본 프로그램에서는 10%을 기본값으로 하였다. 그 다음 사건으로는 기관사의 화재사고 인지를 판별하는 사건이다. 비상시 기관사의비상대응은 승객의 안전에 매우 중요하므로 주위를 필요로 하는 부분이다. 본 프로그램에서는 탈선, 충돌로 인한 화재의 경우 기관사가 비상 사태임을 100% 인지하도록 기본값으로 처리하였고, 기계적 결함 혹은 방화의 경우에는 기관사가 화재 감지성공 여부에 따라 90% 혹은 95%로 설정하였다. 화재 감지가된 경우에는 기관사가 화재비상 상태임을 인지하는 확률이 95%로 화재감지 실패확률보다 높은 확률값을 기본값으로 사용하였다. 이외에 이벤트트리에서는 비상안내 시스템작동 여부, 터널 내정차 여부등을 사건으로 처리하여 그림 3과 같이 최종 결과를 얻었다.

3.4 허용 피난 시간

철도터널 화재시승객의 생명안전에 가장 큰 영향을 주는 요인 중 하나가 연기전파 속도이다. 화재

로 인하여 발생된 연기에 대하여 FED같은 독성에 대한 정보를 이용하여 승객의 사망률을 계산하는 것이 더 정확한 계산 방법이라고 할 수 있으나, 화재로 인하여 발생된 연기의독성에 대한정보는 재질마다 달라 그 값을 정확히 알 수 없으며, 연기 독성에 대하여 피난하는 승객 개개인마다 받아들이는 영향이 달라 일반적인 기준으로 설정하기에는 큰 무리가 따른다. 따라서본 철도터널 화재 위험도분석 프로그램에서는 연기전파 속도를 구하여 특정위치에까지 연기가 전파되는데 시간을 구하여 승객의 생명 안전을 판단하였다. Critical smoke front의 정의는 사람의 호흡선 높이에서 가지거리 10m 이하, 화연의 온도가 80도 이상인 경우로 하였다.

연기 전파속도를 구하는 방법으로 정상화재 약한 플럼에서의 한정되지 않은 천장제트속도(Unconfined Ceiling Jet in steady fires and weak plume), 한정된 천장제트속도 (Confined Ceiling Jet), 정상 화재 및 화재에서의 지연 시간(Lag time in steady fires and t-square fires) 위의 3가지 방법에 대하여 연기속도를 구하고, 시간에 대한 함수로 변환하여 물리적으로 타당한 연기전파 속도식을 도출하였다.

3.5 피난 시뮬레이션

피난 과정동안에 승객들의 탈출 시간을 예측하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 철도터널 화재로 인한 승객들의 생명 안전은 승객 피난에 필요한 피난시간(Required Safety Egress Time, RSET)보다 승객의 허용피난시간(Available Safety Egress Time, ASET)이 작은 경우 보장될 수 있다. 여기서 승객의 허용 피난시간 (Available Safety Egress Time, ASET)은철도 터널에서화재 발생으로 인한 연기가 승객들이 피난하고 있는 위치까지 오는데 걸리는 시간으로 정의한다. 앞 절에서 언급했듯이 철도터널화재로 인해 발생하는 연기성분들에 대한정성적인 자료가 없는 관계로본 철도터널화재 위험도분석 프로그램에서는 터널 내 천정 제트의 속도를 이용하여 승객의 허용 피난시간(Available Safety Egress Time, ASET)을 결정하게 된다. 반면에 철도터널 화재 시 승객 피난에 필요한 피난시간(Required Safety Egress Time, RSET)은 일반적으로 건축물 화재시 성능 위주의 설계에서 사용되는 식을 기본으로 사용하며 다음의 식 (1)과 같다.

$$RSET = t_d + t_a + t_o + t_i + t_e \tag{1}$$

여기서,

t_d : 화재가 감지되는데 걸리는 시간(감지시간)

t_a : 화재가 감지되어서부터 승객들이 인지하는데 걸리는 시간(경보 시간)

t_o : 화재가 난 것을 인지했을 때부터 승객들이 어떤 피난 행동을 할 것인지 결정하는데 걸리는 시간 (인지시간)

t_i : 어떤 피난 행동을 할 것인지 결정하고 실제 피난 이동을 시작하기 전까지 걸리는 시간 (반응시간)

t_e : 피난 이동을 시작해서 안전한 장소까지 피난을 마치는데 걸리는 시간(이동시간)

감지시간, t_d 은 미국의 NIST에서 개발한 DETACT-T2 (DETECTOR ACTUATION - Time squared)을 이용하여 계산하게 되고, 사용자로부터 열방출율, 천정 높이, 반응시간 지수(Response Time

Index, RTI), 활성화 온도(activation temperature), 온도 상승률, 감지기 간격 등을 입력받아 응답 시간을 계산하게 된다. 본 터널화재 위험도분석 프로그램에서 사용되는 온도감지기는 정온식 타입으로 가정하였다.

경보 시간, t_a 는 경보기의 형식에 따라 크게 달라지는 시간으로, 본 터널화재 위험도분석 프로그램에서는 이벤트트리에서 기관사와 연락 여부에 따라 그 값이 달라지게 하였다.

인지시간, t_o 와 반응시간, t_i 은 두 시간을 합쳐서 Pre-movement 시간 이라고 하는데, 승객들의 비상 훈련 상태 및 터널의 비상시스템에 따라 가장 큰 영향을 받는 값이다. 본 터널화재 위험도분석 프로그램에서는 평균값이 1분인 정규 분포함수를 따른다고 가정하였다.

마지막 단계인 승객의 이동시간, t_e 은 승객 피난에 필요한 피난시간(Required Safety Egress Time, RSET)에서 가장 많은 부분을 차지하는 시간으로 실제 승객들이 이동하는데 걸리는 시간이다. 이 시간은 승객 수, 통로 폭, 대피로의 형태(계단, 문 등)에 따라 크게 영향을 받는다. 본 위험도 분석 프로그램에서는 승객의 이동시간을 차량 내에서 터널로 탈출하는데 걸리는 시간과 차량에서 탈출 후 안전한 장소까지 승객이 피난하는데 걸리는 시간으로 구분하여 계산하게 되어 있다. 본 터널화재 위험도분석 프로그램에서는 승객 밀도에 의한 피난 속도 저하, 대피로의 유효 폭, 철도터널의 안전성분석 평가절차서(감리용)에서 명시하고 있는 난간(handrail)에 대한 영향을 고려하여 피난 전용 프로그램과 유사한 결과를 얻도록 하였다. 특히, 피난 전용 프로그램에서는 차량 내부 및 인접한 문, 차량 계단, 차량 외부의 대피로 등의 공간적 정보를 CAD 도면이나 프로그램 내부에서 생성하여 피난 계산을 수행하여야 하기 때문에 사용자가 간단하게 사용하기에는 번거로운 점이 있고, 좁은 공간에 대하여 노드를 생성하여야 함으로 정확한 계산이 쉽지 않다. 하지만, 본 위험도 분석 프로그램은 철도 차량의 문 등의 공간적 정보를 간단하게 입력 받을 수 있고, 또한 차량 내부분과 계단의 좁은 공간 내에서의 피난 시간을 실제 실험을 통해 얻은 연구 결과를 사용하기 때문에 계산된 피난시간에 대한 신뢰도는 매우 높은 것으로 판단된다. 보통 피난 시뮬레이션의 목적은 대피로의 최적화, 피난자의 이동방향 및 시간계산, 위험도 평가 등의 목적으로 사용되고 있다. 본 위험도분석 프로그램은 위험도 평가의 목적으로 개발되는 프로그램임을 감안하여, 복잡한 계산과정이나 자세한 입력 정보를 요구하는 방법은 배제하였으며, 대부분의 피난 시뮬레이션 및 위험도 분석에서 기본적으로 사용하고 있는 MacLennand의 피난 속도 계산식을 사용하였다.

MacLennand의 피난속도 계산식은 다음의 식(2)와 같다.

$$t_{move} = t_{tr} + t_{pas} \quad (2)$$

여기서 t_{tr} 은 출구로의 이동하는데 걸리는 최소시간이고, t_{pas} 은 문이나 계단 같은 곳을 통과하는데 걸리는 시간이다. 이동 속도는 다음의 식 (3)과 같은 Nelson and MacLennan [15]으로 표현할 수 있다.

$$S_i = C \cdot (1 - 0.266 \cdot D_o) \quad (3)$$

여기서 D_o 는 승객의 밀도 [persons/m²], C 는 계수로 통로일 경우 1.4의 값을 가지며, 계단일 경우에는 $0.86 \cdot (G/R)^{0.5}$ 으로 표현된다. G 는 계단의 기울기 길이이고, R 은 각계단의 상승높이를 의미한다.

최소 이동시간은 피난해야 하는 거리를 이동속도로 나누어 다음의 식(4) 와 같이 계산하게 된다.

$$t_w = \frac{L_i}{S_i} \quad (4)$$

여기서 L_i 은 이동 거리[m]이다.

승객이 문이나 계단을 통한 통과시간은 다음의 식(5) 와 같이 표현할 수 있다.

$$t_{pas} = \frac{NP}{F_S \cdot W_e} \quad F_S = S_i \cdot D_o \quad (5)$$

여기서 NP는 문이나 계단을 통해 지나가는 승객수이고, W_e 은 유효 폭 [m]을 의미한다. 유효 폭은 실제 폭에서 경계층의 폭을 뺀 값으로 계단이나 문에서는 보통 0.15를 사용하게 된다. 또한, F_S 는 피난 방출률로 단위 유효 폭 및 시간당 승객들이 피난경로의 특정 지점을 지나가는 승객수를 의미한다.

본 철도터널화재위험도 분석프로그램에서 승객의 필요피난시간(RSET)은 피난 거리에 따라 각 객차에서 나오는 승객들을 고려하여 승객수의 증가를 고려하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$RSET = t_d + t_a + t_o + t_i + \frac{NP}{F_S \cdot W_e} \Big|_{\text{Train door}} + \frac{L}{V} \Big|_{\#1 \text{ carriage}} + \frac{L}{V} \Big|_{\#2 \text{ carriage}} + \dots + \frac{L}{V} \Big|_{\#N \text{ carriage}} + \frac{L}{V} \Big|_{\text{remain escape route}} + \frac{NP}{F_S \cdot W_e} \Big|_{\text{cross passage}} \quad (6)$$

승객수의 증가에 따른 이동속도의 저하는 피난 과정에서 발생하는 피난 방출률의 입 출구 균형을 고려하여 승객수의 증가로 처리하게 된다. 본 위험도 분석프로그램에서는 승객들의 심리적 요인 혹은 독성 연기로 인한 피난 속도 저하 등은 고려하지 않았다.

3.6 철도터널 화재 위험도 분석

정량적 위험도분석은 화재안전 분야에서 위험을 이해하고 관리하는데 유용한 도구로 간주되었다. 예를 들어, 위험하다는 것을 표현할 때 매우, 많이 심각히 등의 단어를 사용하여 위험성을 표현하는 것보다 1년에 몇 명 정도 사망자가 나올 확률이 있을 정도로 위험하다고 표현하는 것이 더 객관적이라고 할 수 있다.

철도 터널에서 화재 발생 시 승객들의 생명안전은 연기전파, 화재 크기 및 성장률, 화재 위치, 승객의 반응시간, 화재 감지, 피난 로의 크기, 배연 조건 등 많은 불확실성을 가진 변수들에 크게 의존한다. 이러한 승객들의 생명 안전에 영향을 주는 불확실성을 지닌 변수들을 계산하기 위하여 불확실성은 명시적으로 화재 위험도 분석에 포함 되어야 하고 이를 위하여 각 입력변수들은 확률 분포함수로 표현되어야 한다. 이러한 계산을 수행하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션이 많이 사용된다. Monte Carlo 시뮬레이션에서는 각 변수들의 분포 함수에 따라서 난수를 발생시켜 서로 다른 분포함수들을 연산한다. 몬테 Monte Carlo 시뮬레이션은 화재 안전 분야에서 위험성을 계산하는 것과 같이 입력에 불확실성이 있는 현상을 모델링하는데 유용하고 정량적 위험도 분석은 승객

의 생명안전문제의 변이와 불확실성을 다루는데 강력하고 간단한방법이라고 할 수 있다. 철도 터널에서 화재 사고 시 승객들의 생명안전은 피난과정에서 참을 수 없는 조건(untenable condition)이 되기 전에 승객들이 안전하게 피난할 수 있는가를 의미하는 것으로, 여유 피난시간 (escape time margin) 혹은 아래식과 같이 승객의 허용피난시간(Available Safe Egress Time, ASET)과 승객이 필요한 피난 시간(Required Safe Egress Time, RSET)의차로 표현할 수 있다.

$$G = t_{ASET} - t_{RSET} \quad (7)$$

여기서,

G : 여유 피난 시간 (s)

t_{ASET} : 승객들의 허용 피난 시간(Available Safe Egress Time, ASET)

t_{RSET} : 승객들의 필요 피난 시간(Required Safe Egress Time, RSET)

이 방정식을 한계상태 함수(Limit State Function, LSF)이라고 하며, 만약 여유피난 시간(G)이 양의 값을 가지면, 승객들은 안전한 것을 의미하고, 반대로 음의 값을 가지면 승객이 사망한다는 것을 의미한다.

3.7 철도터널 화재위험도 평가기준

앞 절에서 설명한 시나리오별 발생빈도 및 시나리오별 사망자 수를 이용하여 FN 커브 상에 위험도를 표시할 수 있다. FN 커브는 사회적 위험도를 표현하는 대표적인 방법으로 x축에 사망자 수를 표시하고 y축에 n명이상 사망자가 발생하는 빈도를 표시한다.

주어진 시나리오 그룹들에 대한 위험수용 가부를 결정하는 기준은 철도터널의 안전성 분석 평가 절차서(감리용)에서 추천한 홍콩을 기준을 적용하였으며 그림 3과 같다.

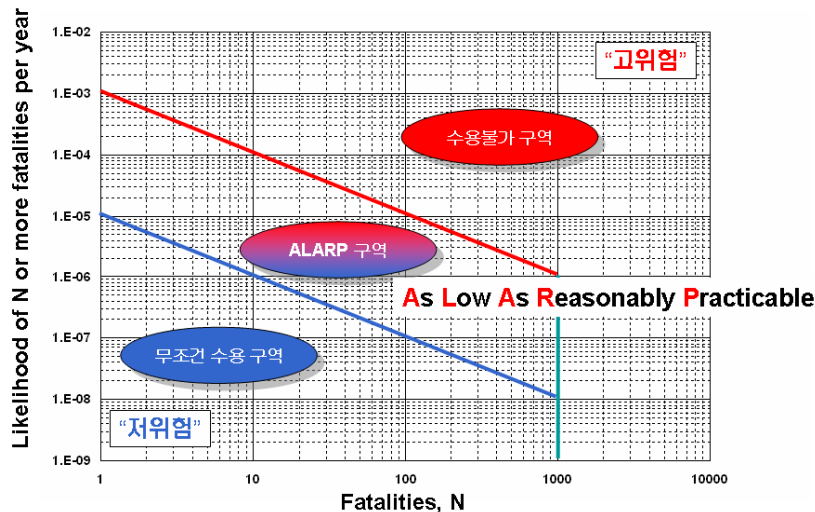


그림 3 F-N 커브와 위험도 평가기준

여기서 ALARP란 As low As Resonably Practible의 약어로 위험도가 이 부분안에 들어오더라도 실현 가능한 한 더 낮추어라는 의미이다. 즉 어떤 방재설비를 추가로 설치하거나 터널의 구조를

바꾸는 것의 효용(benefit)이 비용(cost)보다 크다면 고려를 해보라는 의미이다.

4. 철도터널 화재 위험도 분석 프로그램

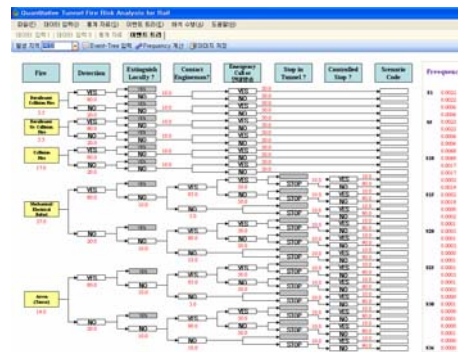
앞에서 언급한내용들을 토대로 C#언어와 포트란언어를 이용하여 철도터널 화재위험도 분석프로그램(Qtra_rail)을 개발하였다. 프로그램은 크게C# 언어로 작성된 그래픽 사용자 입력(GUI) 부분과 실제 많은 변수들을 계산하게 되는 포트란 언어로 작성된 메인 프로그램으로 구성된다. 개발된 프로그램의 일부 창이 그림 4에 나타나 있다.

5. 결론 및 맺음말

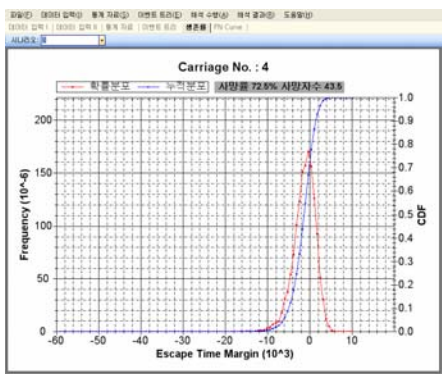
본 연구는 GS건설과 중앙대학교 기계공학과가 공동으로 수행한 연구로 상위에 설명된 바와 같이 철도터널 화재 위험도 평가 프로그램의 개발로 확률이론에 의한 불확실성의 고려, 진보된 시나리오(총 58개), 계산속도의 증가 및 하나의 프로그램에서 모든 수행가능 이라는 결과를 얻었으며 이후에도 지속적인 업데이트 및 연구를 통해 철도터널 분야의 기술향상에 기여하고자 한다.



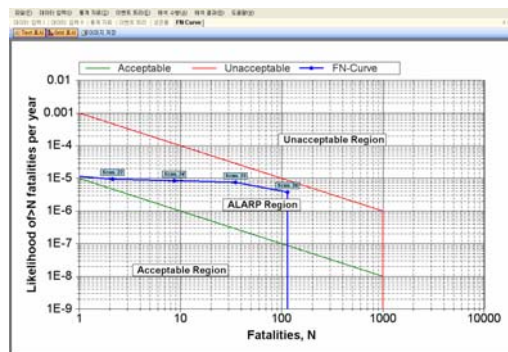
(1) 터널제원/화재/방재시설 입력창



(2) 시나리오 및 발생빈도 입력창



(3) 객차별 사망자 수의 계산창



(4) F-N커브 및 평가창

그림 4 철도터널 화재 위험도 평가 프로그램 일부화면

참고문헌

1. R.L. Alpert, 1975, Comb. Sci. and Tech. 11, pp.197

2. R.L. Alpert, 1972, Fire Tech. 8, pp.181
3. G. Heskestad and T. Hamada, 1993, F. safety Journal 21, pp.69
4. M.A. Delichatsios, 1981, Comb. And Flame 43, pp.1
5. F.W. Mowrer, 1990, Lag times associated with fire detection and suppression, Fire Technology 26, 3, p. 244-265
6. J.S. Newman, 1988, Principles for Fire Detection, Fire Technology 24, 2, p. 166-127
7. G.T. Atkinson and Y. Wu, 1996, Smoke Control in Sloping, Fire Safety Journal, 27, p.335-341
8. Thomas P. H, 1968, The movement of smoke in horizontal passages against an air flow, Fire Research Station Note No. 723, Fire Research Station, UK.
9. Hinkley PL, 1970, The flow of hot gases along an enclosed shopping mall, A tentative theory. Fire Research Note No. 807.
10. Heselden AJM, 1976, Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels, Proceedings of the Second International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels
11. Parsons Brinkerhoff Quade & Douglas, Inc., 1980, Subway environmental design handbook, vol. II, Subway Environment Simulation (SES) Computer Program Version 3, Part I: User's manual
12. Danziger NH, Kennedy WD., 1982, Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels. Proceedings of the Fourth International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, p. 169-186
13. Oka Y, Atkinson GT., 1995, Control of smoke flow in tunnel fires. Fire Safety J. 25, 305-22
14. Y. Wu, M.Z.A. Bakar, 2000, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity, Fire Safety Journal, 35, 363 - 390.
15. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2003, 3rd edition, Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association