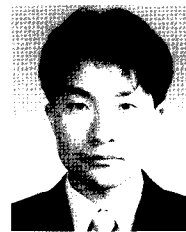


# 철도 안전관리 개선을 위한 확률론적 위험도 평가 방안의 고찰



\*곽상록



\*\*왕종배



홍선호

## 1. 서론

우리는 복잡한 현상을 하나의 수치로 표현하는 각종 지표(index)를 생활에서 많이 접하고 있다. 종합주가 지수, 불쾌지수, 소비자 물가지수, 연간 교통사고 건수, 인구 10만명당 교통사고 사망자수 등도 일종의 지표라 할 수 있다.

철도에서도 위험을 평가하는 지표로는 “연간 사고 건수”, “열차운행 100만-km당 사고건수”와 같이 발생 빈도에 초점을 둔 경우와 “연간 사망자수”, 혹은 “피해

액”, “운행지장”과 같이 사고피해에 초점을 둔 경우가 있다.

이러한 지표를 활용하는 궁극적인 목적은 과거의 정보를 효율적으로 활용하여 미래의 위험을 보다 정확히 예측하고 적절히 대응하기 위함이다.

철도는 선로, 신호, 차량 등이 유기적으로 연결된 복합시스템으로 설계, 제작 및 운영전반에 걸친 체계적인 안전관리활동이 요구된다. 이를 위해 선진 철도 운영국에서는 시스템 안전관리 계획(System Safety Plan, SSP)을 수립하여 위험원(Hazard)분석과 위험도(Risk)

### ■주 ■

1) \*정회원, 한국철도기술연구원, 안전체계연구그룹

\*\*정회원, 한국철도기술연구원, 안전체계연구그룹리더

평가를 통해 안전에 대한 정량적인 목표를 설정하고, 이를 달성하기 위해 ALARP, GAMAB, MEM과 같은 안전원칙에 따라 “가능한 위험도의 제거 또는 경감” 하고자 하는 다양한 안전활동을 전개해 가고 있다. 여기서, 위험도(Risk)란 식(1)과 같이 특정기간동안 관심의 대상이 되는 사고의 발생빈도(발생 확률)와 사고발생결과(피해심각도)의 곱으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{위험도} &= \text{사고발생빈도} \times \text{피해심각도} \\ (\text{Risk}) &= (\text{Probability}) \times (\text{Severity}) \end{aligned} \quad (1)$$

이때, 발생빈도와 피해심각도의 결정에는 ‘사고이력을 분석’, ‘전문가의 판단’ 또는 ‘확률론적 추정’과 같은 방법을 적용한다.

본 고에서는 명확한 안전목표설정을 통한 철도시스템 안전관리의 필요성과 위험도평가상의 몇가지 문제

점을 살펴보고, 철도터널 화재 위험성을 평가하기 위한 확률론적 위험도평가 기법의 개발사례와 안전관리 적용방안을 소개하고자한다.

## 2. 철도시스템안전관리계획(SSP) 수립을 위한 위험도 평가절차와 문제점 분석

### 2.1 위험도평가기반의 시스템 안전관리 활동

철도는 선로, 신호, 차량 등이 유기적으로 연결된 복합시스템으로 설계, 제작 및 운영전반에 걸친 체계적인 안전관리활동이 요구된다. 시스템 안전관리활동은 ① 표 1에 제시된 위험분석, ② 기존 사고이력 자료분석, ③ 각종 시나리오 전개 및 개발, ④ 각 시나리오별 발생빈도와 피해심각도 결정 등, 그림 1의 시스템 안전관리 절차에 따라 정량적인 위험허용한도를 평가하여 필요한 안전개선과 투자를 실시하는 일련의 체계적인 관리활동을 의미한다.

표 1. 단계별 안전관리 활동

단계별 활동	예비 설계	최종 설계	건설 제작	시험	운영 사용
예비위험분석(PHA)	■				
하부시스템 위험분석(SSHA)		■			
시스템 위험분석(SHA)			■		
고장모드와 결과분석(FMECA)				■	
고장수목해석(FTA)					■
유지보수 위험분석(O&SHA)					■

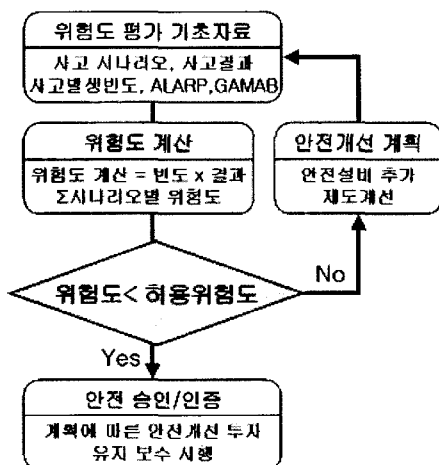


그림 1. 위험도평가를 통한 안전관리 절차

### 2.2 국가별 허용위험한도와 위험도의 평가

그림 1의 절차에서 평가된 위험도의 합이 허용위험도보다 큰 경우 추가적인 안전설비나 제도의 개선이 요구된다. 이때 안전평가의 기준이 되는 허용위험도는 국가에 따라 상이하지만, “가능한 위험도의 제거와 경감”을 근본으로 하고 있으며, 다음과 같은 국가별 원칙이 존재한다.

- 1) 영국의 ALARP(As Low As Reasonably Practicable) 원칙은 위험도를 unacceptable, tolerable, negligible의 3단계로 구분하여, tolerable 영역까지만 허용함.
- 2) 프랑스의 GAMAB(Globalement Au Moins Aussi Bon, globally at least as good) 원칙은 신규시스템의 위험도는 적어도 기존 시스템보다 낮도록 함.
- 3) 독일의 MEM(Minimum Endogenous Mortality) 원

칙은 시스템 변경에 따른 사망률을 허용가능한 정도로 낮추는 허용 위험도를 정하는 기준이 설정됨.

4) 스웨덴에서는 철도의 터널화재, 열차 충돌 및 탈선과 같은 중대사고는 100년에 1회 이하를 규정하는 ALARP 원칙을 적용하고 있으나, 시스템의 신설이나 개량의 경우 신규 시스템이 과거의 시스템

표 2. RCI의 사고분류별 등가사상 위험도평가

사고분류	위험도	비율(%)
열차사고	24.4	17.7
운행사고(불법침입제외)	24.8	18.0
비운행사고(불법침입제외)	27.5	19.9
불법침입	61.2	44.4
계	138	100

표 3. 주요 위험원인별 등가사상 위험도 기여

순위	위험원(Hazard) 분류 (2001년 사망자: 총 138명)	위험도	비율(%)
1	선로 횡단시 승객과 열차충돌	47.2	34.3
2	승객의 추락/실족/넘어짐	11.1	8.1
3	건널목에서 객차와 차량의 충돌	6.2	4.5
4	역사 이외의 장소에서 객차와 객차의 충돌	5.8	4.2
5	2m이하 높이에서 작업자 추락/실족/넘어짐	5.4	3.9
6	일반인이 건널목 횡단시 열차와의 충돌	4.5	3.3
7	객차의 탈선	4.4	3.2
8	건널목 횡단시 전차선로로부터 감전	3.5	2.5
9	객차이외 차량의 탈선	2.9	2.1
10	열차승하차, 탑승수속시 부상	2.9	2.1
11	운행중 열차에서 승객추락 추락	2.9	2.1
12	아동이 선로 횡단시와 열차충돌	2.9	2.1
13	역사에서 승객의 추락 및 열차와 충돌	2.8	2.0
14	일반인 역사내 선로 횡단시 열차와의 충돌	2.8	2.0
15	일반인이 선로로의 추락	2.6	1.9
16	건널목 횡단시 전기선로에서 아동이 감전	2.4	1.7
17	일반 보행자가 보행건널목 횡단시 충돌	2.3	1.7
18	선로횡단시 전차선과 접촉을 통한 감전	1.8	1.3
19	구조물붕괴시 또는 대형물체와 작업자 충돌	1.7	1.2
20	작업자와 열차의 충돌	1.6	1.2

템보다 위험도가 낮아야 함을 입증하는 GAMAB의 개념을 도입하고 있다.

각 국가별 상기 허용 기준은 정책요소, 국민의 공감대 형성 및 안전문화 수준 등과 같은 복합적 요소를 고려하여 설정해야하며, 철도노선을 공유하는 유럽에서는 국가별 위험도 기준이 상이한 문제를 해결하기 위

해 국제적인 협의를 통하여 운영자간 공통되는 허용 위험도를 도출하려 노력을 기울이고 있다.

영국의 RCI에서 2001년도에 수행한 철도사고분류 및 등가사상 위험도의 평가사례를 표 2에 제시하였다. 여기서, 자살을 제외한 전체 위험도는 연간 138명의 사상자로 예측되었고, 주요 위험원인별 기여 정도를 표 3에서 상세히 알 수 있다. 표 3에서 가장 큰 위험은 전체의 34%를 점유하고, 47명의 사상자를 유발한 “선로횡단시 승객과 열차의 충돌” 사고로서, 이때 등가사상 가치환산은 10명의 중상자 혹은 200명의 경상자를 모두 1명의 사망자로 환산한 값이다.

### 2.3 위험도 평가시의 문제점

위험도 평가시 발생빈도가 높고 사고의 대상이 한정되어 있는 경우 사고이력에 기반한 통계적 수법을 사용하여 위험도평가가 용이하다. 반면 터널화재, 열차 충돌, 열차탈선과 같은 중대사고 혹은 이들이 중첩된 복합사고의 위험도 평가는 이들 사고의 발생빈도가 매우 낮고 사고 시나리오 전개가 매우 어려워 사고이력에 기반한 통계적인 수법 적용에 많은 문제점이 있다.

현재 중대사고의 위험도 평가에서 발생확률의 예측은 시스템의 하부 구성요소들의 고장율이나 참조 가능한 유사 시스템의 고장을 정보를 활용하고 있으며, 사고결과의 예측은 다양한 사고 시나리오의 전개와 승객의 반응을 가정하여 이들 영향들이 사고 위험도에 미치는 영향을 확률론적으로 평가하는 다양한 과학적 분석기법에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

### 3. 확률론적 평가기법의 도입

국내는 철도운영 100년 이상의 경험이 있으나, 현재 국내에서 수행중인 안전관리활동에는 이들 자료가 효과적으로 이용되지 못하고 있는 실정이다. 반면 철도 선진국에서는 중대사고에 대한 부족한 자료를 보완하

기 위해 사고에 영향을 미치는 개별적인 인자에 대한 분석을 수행하고 있다. 본 절에서는 기존에 축적된 많은 정보를 효과적으로 활용하기 위한 방법과 이들 자료를 활용하여 승객의 피해를 예측하기 위한 기법에 대해 본 절에서 간략히 설명하였다.

### 3.1 분산을 고려한 자료의 입력방법

분산 혹은 불확실성을 고려한 해석을 위해서는 먼저 분산을 고려할 수 있도록 자료의 입력형태를 결정하여야 한다. 이 방법에는 실측자료를 데이터베이스와 같은 형태로 직접 이용하는 방법과 입력자료의 경향분석을 통하여 유도된 확률밀도를 이용하는 방법이 있으며, 다음과 같은 장단점을 갖는다.

#### 1) 확률밀도함수를 이용하는 방법의 특징

입력자료 분석을 통한 확률밀도함수의 유도와 유도된 함수의 신뢰성 검증에 시간이 소요된다. 그러나 주어진 자료의 범위에 포함되지 않은 극단적인 자료의 예측이 가능하여 확률론적 평가시에 주로 사용된다. 또한 다른 연구자의 결과에 포함된 확률분포를 참고할 수 있고, 해석시 평균, 표준편차와 같은 주요 값만 필요하여 편리하다. 그러나 확률밀도함수 유도시 사용되는 곡선접합(curve fitting) 방식에 따라 동일한 자료에 대해 다른 확률밀도함수가 유도될 수 있어 입력자료 분석에 시간이 소요된다.

#### 2) 실측자료를 이용하는 방법의 특징

입력자료의 신뢰성이 높은 경우 효율적으로 사용할 수 있으며, 입력자료 분석에 시간이 소요되지 않아 사용이 간편하다. 그러나 입력자료의 범위를 벗어나는 극단적인 상황의 모사가 불가능하다.

현재는 원자력산업, 항공산업 등과 마찬가지로 위험도 평가에는 확률밀도함수를 이용한 기법이 주로 사용

되고 있으며, 이때 보다 정확한 분석을 위해 국제적으로 정보를 공유하려는 노력이 진행중이다. 예로서 원자력분야에서는 원자력발전소 사고의 주요원인인 배관파손 사고자료 공유를 위해 OECD의 원자력분과인 NEA 주관으로 배관손상 정보를 국제적으로 공유하는 OPDE 프로젝트를 2002년부터 수행중에 있으며, 국내도 참여하고 있는 실정이다. 또한 항공산업과 같이 제조업체가 매우 제한적인 경우 자체적인 데이터베이스를 가지고 있다. 그러나 국내 철도산업의 경우 위험도 평가를 위한 각종 자료가 충분치 않아 많은 가정을 포함하고 있는 실정이다. 입력자료의 불확실성을 고려하는 실제적인 예는 4절의 터널화재 사례연구부분에 수록하였다.

### 3.2 확률론적 해석기법의 적용

불확실성을 고려하기 위한 확률론적 해석기법은 크게 확률분포를 직접 적분하는 수치적분법, 신뢰도지수(reliability index)를 이용한 방법과 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 이중 수치적분법은 복잡한 확률밀도함수를 직접 적분하는 경우로 많은 경우 적분이 불가능하여 매우 간단한 문제에만 적용이 가능하다.

신뢰도지수를 이용하는 방법은 적분이 어려운 확률밀도함수를 최적화기법을 도입해 근사해를 구하는 방법으로 FORM(First Order Reliability Method), SORM(Second Order Reliability Method) 등이 사용되고 있다. 확률론적 해석에서 가장 많이 사용되는 Monte Carlo 시뮬레이션은 다양한 사고 시나리오를 고려할 수 있어 본 고의 사례연구시에 사용하였다. Monte Carlo 시뮬레이션은 반복적인 난수 추출을 활용한 시뮬레이션 기법이다.

#### 4. 터널화재 사고에 대한 사례연구

국외에서는 중대사고에 대한 결과 심각도의 계산 예로 터널화재에 대해 많은 연구가 진행되어, 터널화재시 승객의 생존에 영향을 미치는 인자들이 도출되어 있다. 이중 가장 큰영향을 미치는 인자는 유독가스 제거를 위한 터널환기 시스템과 별도의 대피터널 설치로 나타났다. 그러나 국내 철도터널의 경우 터널환기 시스템이나 대피용 터널이 없는 상황이며, 위험도 평가가 진행될바 없어 국외의 연구결과를 직접 적용할 수

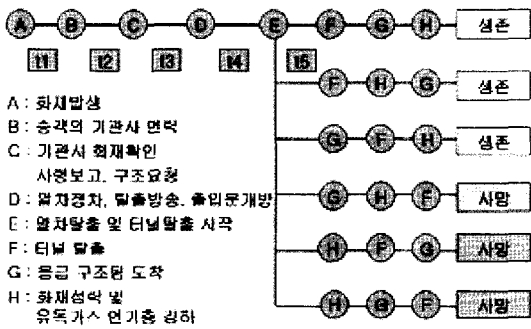


그림 2. 터널화재시 사고시나리오

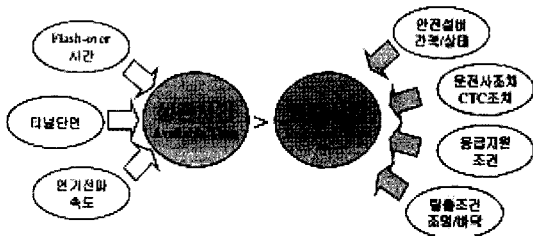


그림 3. 터널화재시 승객의 생존 조건

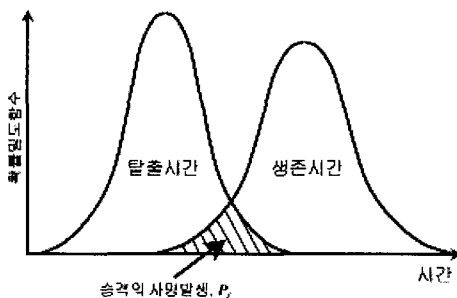


그림 4. 열차화재시 승객생존 시간의 분포

없다. 따라서 본 사례연구에서는 국내 터널화재에 대한 위험도 평가를 위해 터널화재시 승객이 도보로 터널을 탈출하는 시나리오를 그림 2와 같이 구성하여 이를 기초로 사고결과를 계산하였다.

#### 4.1 승객생존 영향인자의 도출

터널화재 발생시 승객의 생존에 영향을 미치는 인자를 분석하면 그림 3에 나타난 바와 같이 승객의 탈출 시간에 영향을 미치는 인자와, 승객 생존에 주어진 시간에 영향을 미치는 인자로 구분할 수 있다. 이들 두 인자는 다시 승객의 탈출속도, 응급지원팀의 도착시간, 연기전파속도와 같이 세부적인 인자로 나눌 수 있다. 그러나 이들 세부적인 인자들을 살펴보면, 하나의 값으로 표현이 되기보다는 확률분포로 표현되는 값들이 많음을 알 수 있다. 예로서 승객의 탈출속도의 경우 승객의 연령, 터널의 바닥상태에 따라 특정한 하나의 값으로 주어지기보다는 정규분포 혹은 대수-정규분와 같은 확률분포로 주어진다 할 수 있다. 그림 3에서 승객의 생존시간과 탈출시간을 확률분포로 다시 표현하면 그림 4와 같으며, 두 분포의 영역이 겹치는 부분에서 승객의 사망이 발생한다고 할 수 있다.

본 사례연구에서는 터널내 열차의 정차위치, 터널의 길이, 승객의 탈출속도, 화재감지시간, 터널내 연기전파속도, Flash-over 시간(발열량과 관련되며, 화재가 급격히 진전되기 시작하는 시간을 의미함, Flash-over 발생이후에는 승객의 생존율이 급격히 감소함), 응급지원의 터널입구 도착시간을 고려하였다.

#### 4.2 불확실성의 고려

전 절에서 도출된 입력변수에는 많은 불확실성이 포함되어 있어, 현재의 많은 해석에서는 가장 위험한 조건의 조합을 선정하여 해석을 수행중이다. 예로서 승객탈출속도, 응급지원팀의 도착시간, Flash-over 시간 등에 대해서는 하한값을 사용하며, 화재감지시간, 터

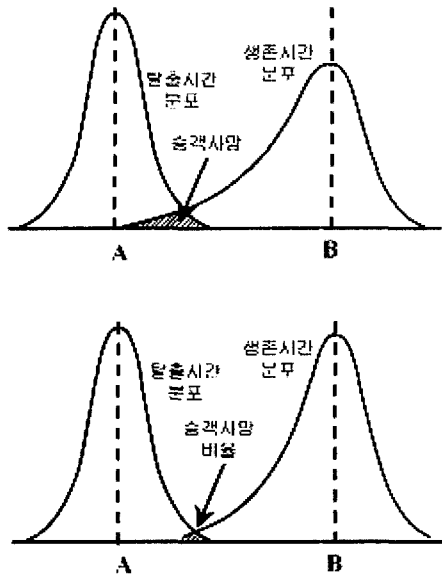


그림 5 동일한 평균값의 비를 갖으나 상이한 사망률을 갖는 경우의 비교

널길이, 열차정차위치에 대해서는 상한값을 사용하여 해석하고 있어, 비현실적이거나 매우 보수적인 결과를 예측하는 문제점이 지적되고 있다. 그러나 상한값, 하한값과 같은 대푯값 대신 실제 확률분포를 사용하면, Fig. 5와 같이 동일한 승객사망률(그림에서 A/B에 해당)을 갖더라도 실제 분포형태에 따라 사망률(빋금친 영역에 비례)은 변하게 된다.

#### 4.3 사고 시나리오의 구성

열차화재시 승객이 생존하기 위해서는 그림 2에 나타난 사고 시나리오와 같이 ①화재감지, ②화재 확인, 운전사령 보고, ③화재 진압 및 열차 탈출의 결정, ④ 탈출안내 방송 및 출입문 개방, ⑤터널의 도보 탈출의 과정이 필요하다. 반면, 승객에게 주어진 시간은 화재가 발생하여 발생된 유독가스가 승객의 위치까지 전파되기 직전까지로 설정하였다. 이외의 가정으로는 응급지원이 도착한 경우 승객의 터널 탈출속도는 2m/s로 향상된다고 가정하였으며, 응급지원팀은 2m/s의 속도로 터널입구에서 화재현장까지 진입하는 것으로 가정

하였다. 해석시에는 응급지원의 도움을 받아서 탈출하는 경우와 응급지원이 도착하기전 터널을 탈출하는 경우를 고려하였다. 두 경우 모두에 대해 승객의 생존을 위해 주어진 시간은 동일하나, 승객의 탈출 소요시간(0)을 각각 상이하게 고려하였다. 응급지원을 고려하지 않는 경우 탈출시간은 탈출거리를 탈출속도로 단순히 나누어 결정되며, 응급지원을 고려하는 경우 식(2)를 유도하여 시뮬레이션에 활용하였다.

$$t_R = t_1 + t_2 + \frac{S_{total}/V_1 - t_2}{V_2/V_1 + 1} \quad (2)$$

여기서, 은 화재감지 및 열차탈출 시간, 는 응급지원팀의 터널입구 도착시간, 은 탈출거리, 은 승객의 도보 탈출 속도, 는 응급지원팀의 이동속도이다.

#### 4.4 해석의 입력조건

확률론적 평가를 위한 자료입력 내용과 도출근거를 다음에 설명하였다.

- 1) 터널길이와 열차 정차위치 : 길이 300m 이상인 국내의 일반철도터널과 고속철도 터널을 각각 분석한 결과 모두 대수-정규분포를 갖는 것으로 나타났다. 평균 1005m, 표준편차 2637로 계산되었다. 본 사례연구의 결과는 탈출거리 3km를 기준으로 설명하였다.
- 2) 터널탈출속도 : 열차를 탈출한 승객이 도보로 터널을 탈출하는 속도에 대한 많은 연구로 얻어진 결과가 있으며, 이 값은 터널내 조명과 시야확보 여부, 통로 표면 상태에 따라 계산된 값이다. 본 사례연구에서는 간략화 하여 평균 0.5m/s 표준편차, 0.4m/s의 정규분포를 사용하였다.
- 3) 화재감지 시간 : 선행연구가 없는 본 연구에서는 열차에서 발생한 화재를 감지, 화재진압 실패 및 열차 탈출까지의 시간 전체를 확률변수로 가정하

여 해석하였다. 본 사례연구에서 화재감지 시간은 평균 420초, 표준편차 84초를 갖는 정규분포로 가정하여 해석하였다.

- 4) 응급지원 도착시간 : 열차화재 발생후 응급지원팀이 터널 입구까지 도착하는 시간으로, 평균 900초, 표준편차 600초를 갖는 대수정규분포로 가정하여 3절에서 해석하였다. 터널입구에서 사고현장까지 진입하는 시간은 속도를 2m/s로 사고현장까지 도착하는 거리를 나누어 계산하도록 하였다.
- 5) 연기 전파속도 : 연기 전파속도는 터널의 배기시스템, 터널의 단면적, 화염으로부터의 거리에 따라 상이하나 본 연구에서는 사고지점에서부터 터널입구까지 2m/s의 일정한 속도로 유독가스가 퍼

지는 것으로 가정하였다.

- 6) Flash-over 시간 : 열차발열량에 따라 결정되며, 본 연구에서는 화재발생후 Flash-over 까지의 시간을 평균 1200초, 표준편차 300초를 갖는 정규분포로 가정하였다.

#### 4.5 해석의 수행 및 해석 결과

본 사례연구에서 사고 심각도 계산을 위해서 Monte Carlo 시뮬레이션을 사용하였으며, 시뮬레이션시 난수(random number)발생의 영향을 줄이기 위해 Monte Carlo 시뮬레이션은 10만번을 수행하였으며, 5회의 독립수행을 시행하여 이의 평균값을 승객의 생존율로 결정하였다. 해석시 사용되는 많은 계산과 통계처리의 편의를 위해 윈도우 기반의 "PRA-Tunnel Fire" 코드를 개발하여 사용하였다. 개발된 코드의 초기화면과 확률변수의 입력화면을 그림 6과 7에 나타내었다.

주요 해석의 경우와 승객의 사망률(100에서 승객의 생존율을 제외한 값)를 다음에 기술하였다.

- 1) 주어진 조건에 대한 해석 → 21.4%
- 2) 승객의 탈출속도만을 확률변수로 가정 → 1.5%
- 3) 응급구조 도착시간만을 확률변수로 가정 → 16.3%
- 4) 화재섬락시간만을 확률변수로 가정 → 11.4%
- 5) 화재감지시간만을 확률변수로 가정 → 0.1%
- 6) 모두 평균값을 이용한 해석 → 0

위의 해석에서 6)의 경우는 입력자료의 불확실성을 고려하지 않은 결정론적 해석으로 승객의 사망률은 없다고 계산되나, 1)~5)의 경우와 같이 입력자료의 불확실성을 고려한 경우는 승객의 사망률이 최고 20%이상으로 나타나 확률론적 해석의 필요성을 나타내고 있다.

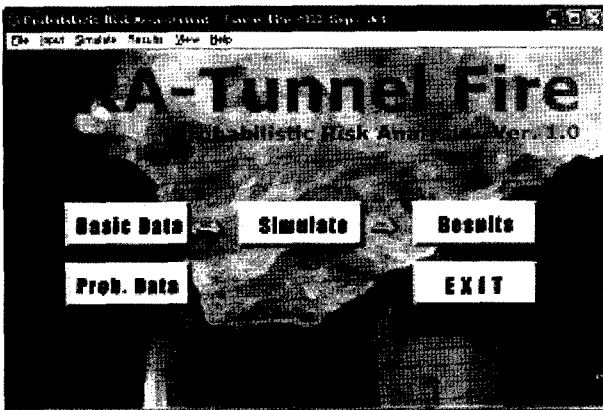


그림 6. PRA-Tunnel Fire의 초기화면 구성

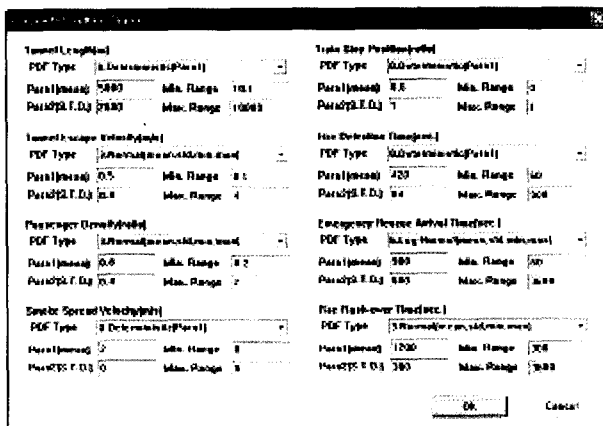


그림 7. PRA-Tunnel Fire의 확률변수 입력화면

## 5. 맺음말

본 고에서는 고속철도운행, 기존 노선의 전철화와 같이 안전에 대한 위협요인이 증가하는 현 시점에서 효율적인 철도안전 관리를 위한 기초 기술에 대한 분석을 통하여 국내 철도의 안전관리 방안을 모색하였다. 터널화재에서 보여준 예와 같이 선진 철도운영국에서 사용중인 안전관리 계획, 위험도 평가 결과는 운영여건이나 설비가 상이한 국내에 직접적용이 어려운 문제점이 있으며, 이의 적용을 위해서는 국내 철도 전문가들의 노력이 요구된다. 철도의 전문가들의 의견교환과, 100년의 철도운영경험을 효과적으로 활용하여, 국내 실정에 맞는 최적의 안전관리프로그램을 수립하여 활용한다면 보다 안전한 철도를 구현할 수 있으리라 생각한다.

## 참고문헌

1. Department of Defense, "Military Standard System Safety Program Requirement, MIL-STD-882C", MIL-STD-882C, 1993
2. NFPA 130, "Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems", 2003
3. Law, A.M. and Kelton, W.D., "Simulation Modeling and Analysis", McGraw-Hill Press, 1991
4. 최영환, 최선영, "OPDE 배관손상 데이터베이스 구축", 2002 추계 원자력학회 논문집, CD-ROM
5. Kwak, Sang-log, Lee, Joon-seong, Kim, Young-jin, and Park, Youn-won, "A Probabilistic Integrity Assessment of Flaw in Zirconium Alloy Pressure Tube Considering Delayed Hydride Cracking", International Journal of Modern Physics B, Vol. 17, Nos. 8 & 9, pp. 1587-1593, 2003
6. Ang, A.H., Tang, W.H., "Probabilistic Concepts in Engineering Planning Design", Vol. I, II, John Wiley & sons, Inc., 1975.
7. 이준성, 박상록, 김영진, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 파괴역학 수법의 적용성 검토", 한국정밀공학회, 제 18 권 10호, pp.154-160, 2001
8. Powell S and Grubits S, "Tunnel Design with TRAFFIC-Tunnel Risk Assessment For Fire Incidents and Catastrophes", Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon, 1999
9. Molag M and Sluis L, "Quantitive Risk Analysis to Optimise. Fire Safety During Basic HSL South Tunnel Design", Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon, 1999
10. Molag M, Mierlo R, "Realistic Fire Scenarios for Safety Assessments of Train Fires in Tunnel", Proc. of Independent Technical Conferences, Madlid, 2001
11. Andrew A Dykes and Gary P Wolf, "Quantitative Risk Assessment of Railroad Derailment Accidents", Int. Conference on PSAM5, Osaka, 2000
12. Railtrack, "Profile of Safety Risk on Railtrack PLC-Controlled Infrastructure", Railway Safety Issue, SP-RSK-3.1.3.11, 2001
13. 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, "장대터널 화염방재 기술 및 환기공조시스템 개발", 2003
14. 김종기, 이종훈, 김훈, "철도 RAMSdml 적용에 관한 고찰", 한국철도학회, 2003년 춘계학술대회 논문집