

확률론적 기법을 활용한 철도터널의 화재사고 시나리오의 구성

Application of Probabilistic Technique for the Development of Fire Accident Scenarios in Railway Tunnel

곽상록¹ · 홍선호¹ · 왕종배¹ · 조연옥¹

Sang-Log Kwak · Seon-Ho Hong · Jong-Bae Wang · Yun-Ok Cho

Abstract

Many long railway tunnels without emergency evacuation system or ventilation system are under construction or in-use in Korea. In the case of tunnel-fire, many fatalities are occur in current condition. Current safety level is estimated in this study, for the efficient investment on safety. But so many uncertainties in major input parameters make the safety estimation difficult. In this study, probabilistic techniques are applied for the consideration of uncertainties in major input parameters. As results of this study, accident scenarios and survival ratio under tunnel fire accident are determined for various conditions.

Keywords : Monte Carlo Simulation(몬테카를로 모사), Accident Scenario(사고시나리오), Flash-over time(화재섬락시간), PRA(Probabilistic Risk Analysis, 확률론적 위험도평가)

1. 서론

최근 국내에서는 열차 운행속도 향상을 위해 많은 장대 터널이 건설되고 있으며, 도심구간의 지하철 운영을 위한 터널이 건설중이다. 대구 지하철 사고를 계기로 터널구간의 화재안전 대책에 대한 많은 연구가 진행중이다. NFPA[1]를 비롯해 BHRG, ITC, ASHRAE, APTA 등 많은 국외의 연구기관에서도 터널구간의 화재안전에 대한 연구가 진행중이다.

국외의 경우 NFPA에서 터널 화재안전에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, NFPA 130[1]과 같은 구체적인 철도의 화재안전기준이 수립되어 활용되고 있다. 이들 연구의 결과로 유독가스 제거를 위한 배연시스템 및 승객 대피통로의 설치 위치 및 간격에 대한 다양한 기준이 제시되어 있으며, NFPA 130의 경우 철도역사, 터널의 화재시 인명피해를 최소화하기 위한 장비, 계단, 탈출로, 비상통신 및 화재확산 방지 등 각종 요구사항들이 세부적인 기술되어 있다. 그러나 국내는 물론 국외의 많은 철도터널의 경우 과거에 설계되어 NFPA 130을 비롯한 화재 안전 기준의 직

접적인 적용이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 현재 국내 터널자료를 기초로 하였으며, 부족한 자료에 대해서는 국외의 연구결과를 활용하였다. 또한 터널구간 화재발생시 안전대책 수립을 위해 사고 시나리오 구성과 이에 따른 승객의 위험도 예측 연구를 수행하였다.

현재 사용중인 터널화재 사고 위험도 예측 시나리오는 터널의 길이, 열차 정차 위치, 승객의 탑승률, 열차의 화재전파시간, 승객의 탈출 속도 등과 같이 많은 불확실성이 포함된 값들을 고려하기 위해 보수적인 가정을 사용하고 있다. 그러나 터널의 화재시 승객의 생존을 예측하는 대부분의 인자들은 너무도 큰 불확실성을 포함하고 있어 평가시 사용하는 자료에 따라 승객의 생존율이 10배 이상 차이가 나타나 평가 결과의 활용이 용이하지 않다. 예를 들면, 정원의 120%가 탑승한 통근열차가 지하터널의 중앙에서 멈추었을 경우 노약자를 포함한 승객이 조명이 없는 상태에서 열차를 탈출하여 지상까지 이동하여 생존하는 매우 보수적인 사고시나리오 구성이 있다[2,5]. 그러나 실제 물리적 현상이나 화재 사고 발생시 인간의 거동은 하나의 값으로 표현되기보다는 분산을 포함하는 확률분포로 나타내는 것이 보다 효과적이다.

1 정회원, 한국철도기술연구원, 안전기술연구팀

본 연구에서는 터널구간의 화재시나리오는 화재 발생시 물리적현상 및 인간의 사고대처 활동에 포함되어 있는 불확실성과 다양성을 과학적으로 고려하기 위해 확률론적 접근법을 활용하였다. 확률론적 해석시 승객의 생존에 영향을 미치는 다양한 인자들의 확률분포를 고려하기 위해서 Monte Carlo 시뮬레이션 기법[6]을 적용하였다. 또한 다양한 사고시나리오를 가정한 후 사고시나리오에 영향을 미치는 여러 인자를 변화시키면서 다양한 조건에서의 승객의 생존율을 예측하였다.

2. 터널화재시 승객의 생존에 영향을 미치는 인자

터널화재 사고시 승객 생존율에 영향을 미치는 인자는 Fig. 1과 같이 다양하며, 이들 인자를 크게 구분하면 승객의 생존율을 향상시키는 인자와, 승객의 사망률을 향상시키는 인자로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 승객의 생존 및 탈출에 필요한 시간(Required Time, t_R)과 승객에게 주어진 시간(Available Time, t_A)을 승객의 생존을 결정하는 기준으로 설정하여 연구를 수행하였다.

승객생존 여부를 결정하는 기준이 되는 두 변수(t_A 와 t_R) 중 승객의 탈출에 필요한 시간은 ①열차내 화재의 감지시간, ②탈출거리(터널의 길이와 열차정차위치 및 터널 구배로 결정), ③승객의 탈출속도(터널내 탈출로의 바닥상태, 조

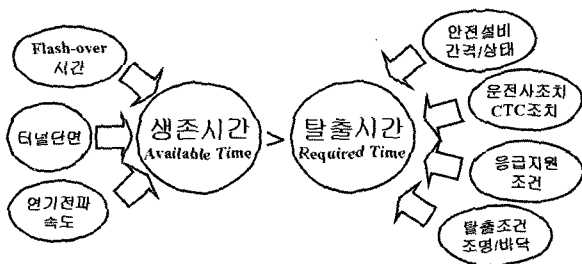


Fig. 1. Major factors for passenger survival

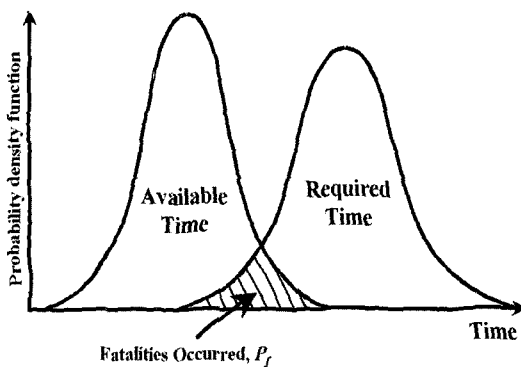


Fig. 2. Survival probability under tunnel fire

명 및 연기상태, 승객밀도에 따라 결정), ④응급지원 도착시간 등에 의해 결정된다. 반면 승객의 생존에 요구되는 시간, 즉 터널을 탈출해야만 하는 한계시간은 ①화재섬락(Flash-over) 발생시간(화재규모로부터 결정가능), ②연기 전파 및 연기층 강하 속도를 통해 결정된다. 그러나 이들 두변수인 t_A 와 t_R 은 하나의 값으로 결정되기보다는 영향인자의 분포 특성에 따라 Fig. 2와 같은 확률분포로 나타낼 수 있다. 이외에 특정 터널을 대상으로 해석할 경우 터널단면의 형상, 탈출로(인도)의 유무, 계절의 영향, 터널의 종곡선의 영향을 고려할 수 있으나, 본 연구에서는 위험도 평가방법 및 전체적인 위험도 예측을 위해 고려하지 않았다. 위에서 언급한 많은 인자들은 모두 불확실성을 포함한 값들로 하나의 값을 가정한 일반적인 해석보다는 확률분포를 활용한 해석이 보다 타당하다 할 수 있다. 터널화재의 안전영향인자와 이의 설정을 위한 사고시나리오의 세부적인 내용을 다음에 기술하였다.

2.1 터널길이나 열차 정차위치

국내와 같이 대피터널과 배연시스템이 없는 터널내에서 열차가 정차한 경우 최악의 사고 시나리오는 터널의 중앙에 열차가 정차한 경우로 볼 수 있다. 예로서 길이 1km의 터널의 중앙에 열차가 정차한 경우 승객의 대피거리는 500m로 계산할 수 있다. NFPA 130에서 제시된 터널화재 안전평가 대상 터널의 길이는 300m 이상이며, 길이가 300m 이상인 국내의 일반철도 및 고속철도 터널을 각각 분석한 결과 평균 1,005m 표준편차 2,637를 갖는 대수-정규(log-normal)분포로 나타났다.

본 연구에 수록된 사례연구는 터널길이가 5km이고 대피터널이 없는 경우의 해석예를 나타내었다.

2.2 승객 탈출속도

화재시 승객이 열차 탈출후 도보로 터널을 탈출하는 속도는 Table 1과 같이 탈출통로의 표면, 조명, 시야확보, 연기상태에 따라 결정된다. 이외에 탈출로의 구배, 바람의 방향을 고려할 수 있으나, 아직 진행중인 연구가 많아 본 연구에서

Table 1. Mean walking speed in tunnel[2]

보행속도 [m/s]	조명양호		조명적당		조명불량	
	시계 확보	연기 상태	시계 확보	연기 상태	시계 확보	연기 상태
통로표면 양호	1	0.5	0.75	0.563	0.2	0.2
통로표면 적당	0.6	0.3	0.45	0.338	0.2	0.2
통로표면 불량	0.5	0.25	0.375	0.281	0.2	0.2

는 호주에서 사용된 TRAFFIC모델[2]의 값을 참조하였다. 본 연구의 사례연구에서는 평균 0.5m/s 표준편차 0.4m/s를 갖는 정규분포로 승객의 탈출속도를 가정하였다.

2.3 화재감지 시간

화재감지시간은 승객의 생존율에 매우 큰 영향인자로 화재를 조기에 감지하는 경우 대형사고를 예방할 수 있으나, 화재 확산까지 적절한 대응을 하지 못하면 대형사고로 연결된다. 그러나 화재감지 시간에 대한 선행연구가 없어 본 연구에서는 열차에서 발생한 화재를 감지, 화재진압 실패 및 열차 탈출까지의 시간 전체를 확률변수로 가정하여 해석하였다. 사례연구에서 화재감지 시간은 평균 420초(7분), 표준편차 84초(평균의 20%)를 갖는 정규분포로 가정하여 해석하였다.

2.4 응급지원 도착시간

열차화재 발생후 자력으로 터널을 탈출할 수 없는 노약자나 부상자들의 지원을 위해 응급지원팀이 터널 입구까지 도착하는 시간과 터널 입구에서 터널내 부상자의 위치까지 이동하는 시간의 합을 응급지원 도착시간으로 계산하였다. 화재발생후 화염이나 연기가 급속히 확산되지 않는다면 승객의 이동이 가능하므로 승객의 이동을 고려하여 응급지원 도착시간을 결정하였다. 본 연구에서는 응급지원팀이 터널입구까지 도착하는 시간을 평균 900초(15분), 표준편차 600초(10분)를 갖는 대수정규분포로 가정하였으며, 터널입구에서 부상자 위치까지 2.0m/s의 속도로 진입하는 것으로 계산하였다.

2.5 연기 전파속도

터널구간에서 승객의 생존을 위협하는 것은 화재로 인한 화염보다는 화재로 인해 발생하는 유독가스로 연기 전파속도에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있다. 연기 전파속도는 터널의 배기시스템이나 터널의 단면적, 화재의 크기에 따라 상이하나 본 연구의 목적이 사고시나리오의 구성에 있어 간략한 해석을 위해 사고지점에서부터 터널입구까지 일정한 속도로 유독가스가 퍼지는 것으로 가정하였다. 사례연구에서는 2.0m/s로 가정하였다.

2.6 화재섬락(flash-over) 시간

화재가 급격히 진행되는 화재섬락시간은 열차 편성 및 열차의 종류에 따라 결정되며, 본 연구에서는 화재발생후 평균 1,200초(20분), 표준편차 300초(5분)를 갖는 정규분포로 가정하였다.

3. 터널화재 사고 시나리오의 구성

열차화재시 승객이 생존하기 위해서는 Fig. 3의 시나리오와 같이 ①화재감지, ②확인 및 운전사령 보고, ③화재 진압 실패 및 열차 탈출의 결정, ④탈출안내 방송 및 출입문 개방, ⑤터널의 도보 탈출의 과정이 필요하다. 반면, 승객에게 주어진 시간은 화재가 발생하여 발생한 유독가스가 승객의 위치까지 전파되기 직전까지로 설정이 가능하다. 이외의 가정으로는 응급지원이 도착한 경우 승객의 터널 탈출속도는 2.0m/s로 향상된다고 가정하였으며, 응급지원팀은 2.0m/s의 속도로 터널입구에서 화재현장까지 진입하는 것으로 가정하였다. 해석시에는 Fig. 3과 같이 응급지원의 도움을 받아서 탈출하는 경우와 응급지원의 도착전 터널을 탈출하는 경우를 고려하였다. 두 경우 모두에 대해 승객의 생존을 위해 주어진 시간은 동일하나, 승객의 탈출 소요시간을 각각 상이하게 고려하였다. 응급지원을 고려하지 않는 경우 탈출시간은 탈출거리를 탈출속도로 단순히 나누어 결정되며, 응급지원을 고려하는 경우 본 연구에서는 시간(s)차원으로 유도된 식 (1)을 시뮬레이션에 활용하였다.

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

여기서, t_1 은 화재감지 및 열차탈출 시간, t_2 는 응급지원팀의 터널입구 도착시간, S_{total} 은 열차로부터 터널 밖까지의 탈출거리, V_1 은 승객의 도보탈출 속도, V_2 는 응급지원팀의 이동속도이다.

4. 승객 생존율 예측

승객의 열차 및 터널탈출에 소요되는 시간과 승객생존에 주어진 시간을 비교하여 승객의 생존여부를 결정할 수 있으며, 서론에서 설명한 바와 같이 이들 입력자료는 많은 불확실성이 포함되어있다. 이를 위해 적용되는 확률론적 기법에는 신뢰도지수(reliability index)를 이용한 방법과 Monte

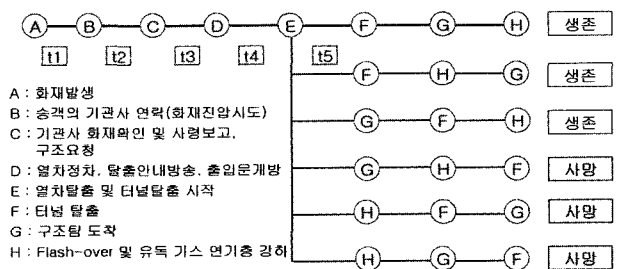


Fig. 3. Accident scenarios for passenger survival

Carlo 시뮬레이션을 활용한 방법이 있다[7~9]. 신뢰도를 이용한 방법은 복잡한 결합확률분포를 적분하여야 하나 많은 경우 적분이 불가능하여, FORM이나 SORM과 같은 근사해를 구하고 있다. 그러나 이들은 사고 시나리오를 수식으로 표현할 수 없어 본 연구에서는 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 활용하여 승객의 생존율을 결정하였다.

4.1 승객생존을 예측 시뮬레이션 코드 개발

Monte Carlo 시뮬레이션 기법은 반복적인 난수추출에 근거한 기법으로 이를 터널화재시 승객 생존율을 예측에 적용하기 위한 시뮬레이션의 절차를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 절차는 ①확률변수의 선정 및 자료입력, ②고정변수의 선정 및 자료입력, ③난수발생, ④평가변수(t_R , t_A) 계산, ⑤승객 생존여부 결정, ⑥평가결과 저장 및 통계처리, ⑦시뮬레이션 조건 확인, ⑧결과처리의 과정을 흐름을 나타내었다.

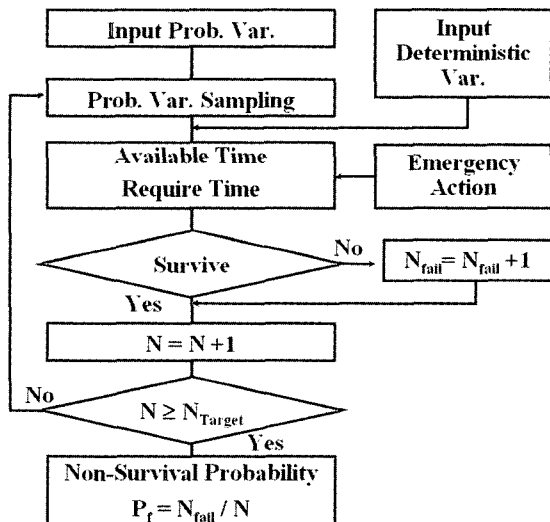


Fig. 4. Simulation flow for tunnel fire accident

승객의 생존율 예측에 사용하는 Mote Carlo 시뮬레이션의 적용을 위해서는 많은 반복계산 및 통계처리가 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 “PRA-Tunnel Fire”로 명명된 코드를 개발하여 사용하였으며, 개발코드는 인터넷 홈페이지[10]에서 다운로드 하여 사용할 수 있다. PRA-Tunnel Fire 코드는 Visual C++를 활용하여 윈도우환경에서 구동되도록 구현하였다. 개발된 시스템의 초기화면, 자료입력 및 결과출력 화면을 Fig. 5~8에 나타내었다.

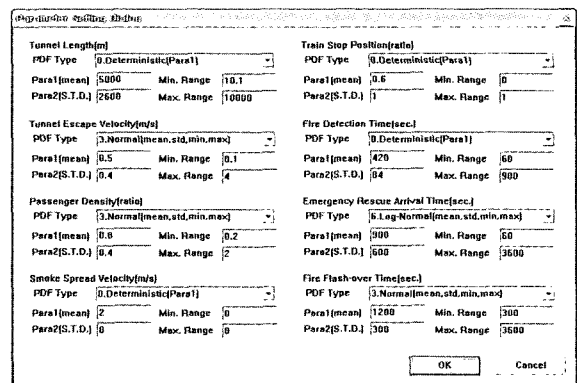


Fig. 6. Input screen of PRA-Tunnel Fire code

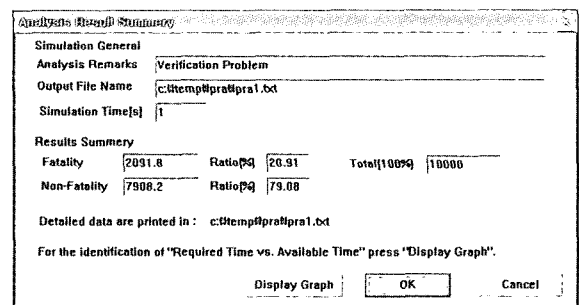


Fig. 7. Text-output screen of PRA-Tunnel Fire code

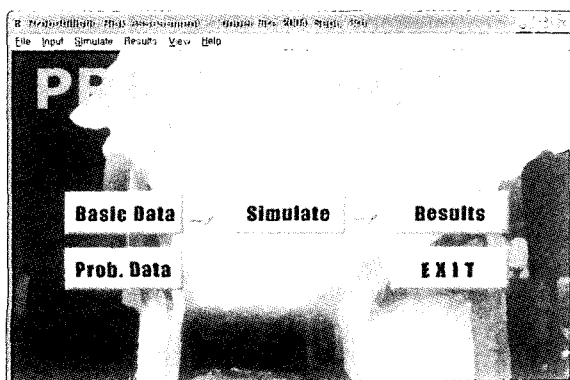


Fig. 5. Main screen of PRA-Tunnel Fire code

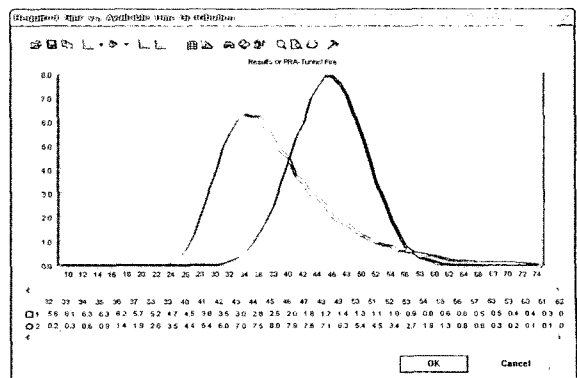


Fig. 8. Graphic-output screen of PRA-Tunnel Fire code

4.2 승객의 생존율 예측

본 연구에서는 개발된 PRA-Tunnel Fire 코드를 활용하여 사례연구를 수행하였다. 해석 대상은 배연시설이 없는 5km의 양방향 열차운행이 가능한 터널로 입력값은 2절에서 언급한 값을 사용하였다. Monte Carlo 시뮬레이션 시에는 난수발생의 영향을 줄이기 위해 10만번씩 각각 5회의 독립수행을 시행하여 이의 평균값을 승객의 생존율로 결정하였다. 주요 해석의 경우와 승객의 사망률(100%에서 승객의 생존율을 제외한 값)을 계산하였다. 앞서 제시된 확률분포를 활용한 경우와 일부 확률변수를 평균값만으로 가정하여 해석한 경우에 대한 해석결과를 다음에 나타내었다.

- (1) 주어진 조건활용 → 21.4%
- (2) 승객 탈출속도만 확률변수로 가정 → 1.5%
- (3) 응급구조 도착시간만 확률변수로 가정 → 16.3%
- (4) 화재섬락시간만 확률변수로 가정 → 11.4%
- (5) 화재감지시간만 확률변수로 가정 → 0.1%
- (6) 모든 변수의 평균값만을 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. 또한 각각 변수의 영향을 확인하기 위해 평균값과 표준편차를 변화시켜가면서 다양한 해석을 수행하였다.

- (1) 탈출속도와 연기전파속도의 영향 : 탈출길이에 따른 승객의 사망률은 연기전파속도와 연결되어 승객의 생존율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 예로서 연기전파속도를 2.0m/s, 탈출속도가 2.0m/s로 서로 큰 차이가 나지 않는 경우 사망률은 1%미만이나, 탈출속도를 1.5m/s로 가정한 경우는 14%로 사망률이 급격히 증가하였다.
- (2) 화재감지 시간 : 화재감지시간은 승객 생존에 주어진 시간에 직접 영향을 미치는 인자로 화재섬락 시간과 연결되어 승객의 생존율에 큰 영향을 미친다. 화재감지시간이 100초인 경우 승객의 사망률은 10%이지만, 화재감지 시간이 420초인 경우 21%로 증가하였다.
- (3) 응급지원 도착시간 : 응급지원 도착시간의 영향은 승객의 탈출거리와 연결되어 사망률에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 예로서 응급지원 시간이 500초인 경우 사망률은 2%로 낮으나 900초로 증가한 경우 사망률 또한 15%로 급격히 상승하였다.

현재 진행중인 터널안전과 관련된 많은 연구의 결과를 활용한다면 보다 정확한 승객 생존율 예측이 가능할 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 확률론적 기법을 활용하여 터널화재시 승객의 안전성을 예측하기 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 승객의 생존율 예측을 위한 확률론적 모델을 구축하였으며, 이의 실현을 위한 평가 코드를 개발하였다.
- (2) 승객의 탈출시간과 승객생존에 요구되는 시간을 기준으로 하여 승객의 생존율을 결정하였다.
- (3) 터널 화재시 승객의 생존에 영향을 미치는 인자의 특성을 분석하였다.
- (4) 승객 생존율을 결정하는 영향인자에 대한 정량적 기여도를 분석하였다.

참고 문헌

1. NFPA, "U.S. Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems", NFPA 130, 2003.
2. S. Powell and S. Grubits, "Tunnel Design with TRAFFIC-Tunnel Risk Assessment For Fire Incidents and Catastrophes", Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon, 1999.
3. M. Molag and L. Sluis, "Quantitive Risk Analysis to Optimise Fire Safety During Basic HSL South Tunnel Design", Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon, 1999.
4. M. Molag and R. Mierlo, "Realistic Fire Scenarios for Safety Assessments of Train Fires in Tunnel", Proc. of Independent Technical Conferences, Madlid, 2001.
5. Network Rail, "Railway Safety Case, Ver.6", 2004.
6. 이준성, 곽상록, 김영진, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 파괴역학 수법의 적용성 검토", 한국정밀공학회, 제18권 10호, pp.154-160, 2001.
7. 양영순, 서용석, 이재욱, "구조신뢰성공학", 서울대학교 출판부, pp.69-110, 1999.
8. A.M. Law, and W.D. Kelton, "Simulation Modeling and Analysis", 2nd Edition, McGraw-Hill, 1991.
9. A.H. Ang and W.H. Tang, "Probability Concepts in Engineering Planning Design", Vol. I, II, John Wiley & Sons, Inc, 1975.
10. http://mail.krri.re.kr/~slkwak/theme_1.html, 2004.