

도로터널내부 화재시의 열전달 및 연기거동에 따른 피난안전성평가에 관한 수치적 연구

Numerical Simulation on the Heat Transfer and Smoke Flow Phenomena and Evacuation in the Road Tunnel Fires

민동호 · 손봉세*†

Dong-Ho Min · Bong-Sei Son*†

ATES(주), *경원전문대학교 소방시스템과
(2005. 2. 17. 접수/2005. 3. 14. 채택)

요 약

본 연구에서는 도로터널 화재에 따른 열전달 및 연기거동의 특성과 피난시뮬레이션에 대하여 수치적 연구를 수행하였다. 화재발생부분의 발열량은 30MW이며, 수치해석에 사용된 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 도로터널에서 열기류 및 연기의 이동경로 형태를 예측하여 방재 및 피난 시스템을 구축하는데, 도로터널 설계시에 유용한 자료로 이용될 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, numerical simulation are conducted to predict the characteristics of the heat transfer and smoke flow and evacuation in the road tunnel. Fire source are used about 30 MW and the turbulent flow characteristics are considered by standard k-epsilon turbulent model. The effect of transient thermal behavior and disaster prevention can be used for designing the road tunnel.

Keywords : Fire prevention, Heat transfer, Smoke propagation, Evacuation

1. 서 론

최근에 건설되는 도로는 운전자의 편의성과 환경보호 차원에서 노선의 직선화가 요구되기 때문에 국토의 약 70%가 산악지역인 우리나라에서는 터널의 건설은 필연적이다. 하지만, 도로터널 내에서 화재가 발생할 경우에 터널내의 유동장은 화재의 성장추세와 화재가 발생하기 전에 차량의 이동에 의해서 생성되는 공기의 관성 유동에 의해서 비정상적인 복잡한 유동장을 형성하게 된다. 따라서 차량에 의해 발생된 공기 관성유동의 특성과 연기흐름 방향과의 관계를 분석하여 적절한 방재용 제연팬 등의 배연설비와 승객 대피 시나리오의 구성 필요성이 증가되고 있다. 일반적으로, 도로터널 화재는 화재의 크기에 관계없이 운전자 및 승객들의 인명을 위협하는 존재이며, 장대터널일수록 그 위험성은 증가될 수밖에 없다. 도로터널 화재 시에 대피자들

의 안전을 위협하는 주요인은 연기에 의한 질식사고이며, 이러한 질식사고를 미연에 예방하기 위해서는 연기의 효율적인 제어 대책에 대한검토가 적절하게 이루어져야 한다. 화재에서 이론적인 연구는 주로 밀폐공간 내에서 화재발생원을 일정한 크기의 열원으로 가정 한 후 부력으로 야기되는 유동장을 해석한 경우가 주를 이루고 있다.^{1,2)} 대공간에서 plume 모델을 이용하여 화재를 해석한 경우³⁾가 있으며, 실험 및 전산유체역학을 이용하여 화재현상을 해석한 경우는 여러 참고 문헌에서 볼 수 있다.⁴⁻⁶⁾ 화재 발생시 적절한 대처방안과 충분한 검토를 통해서 안전한 대피로의 확보나 열기류 및 연기의 이동경로 형태를 예측하여 방재 및 피난 시스템을 구축하는 작업은 도로 터널 환기 설계시 필수적인 사항이다. 따라서 본 연구에서는 도로터널화재시의 열유동 해석 및 연기거동 그리고 피난대피시뮬레이션에 대하여 수치해석을 수행하였다.

* E-mail: bsson@kwc.ac kr

2. 수치적 모델

2.1 지배방정식

일반적으로 도로터널 화재의 경우에는 선회(swirl) 같은 복잡한 물리적 현상이 존재하지 않으며 화재 발생원에서 부력에 의한 연소가스의 상승과 공기 관성 유동에 의한 유동장이 형성되므로, 터널 내부의 유동 자체는 연소반응에 크게 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.

일반적인 유동장의 지배 방정식을 일반형인 텐서 형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i \phi = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1)$$

위 식(1)에서 ϕ 는 해석하고자 하는 종속 변수로서 각 방향의 속도성분(u, v, w), 난류운동에너지(k) 및 난류운동에너지소산율(ϵ), 화학종의 질량분율(Y_s), 생성항(S_ϕ) 그리고 ρ 와 Γ_ϕ 는 밀도와 확산계수를 각각 나타낸다. 본 연구에서는 이상의 식의 해를 구하기 위한 난류 모델로서 표준 k- ϵ 모델을 사용하였다. 유동 해석은 상용 전산유체역학 프로그램인 FLUENT version 6.1을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

2.2 방재시뮬레이션 해석 모델

실제 화재성상을 파악하기 위하여 총 연장 1,863 m인 도로터널에 대하여 Fig. 1과 같이 차량진행방향으로 갱구입구에서 625 m 떨어진 차량용 피난연락갱에서 30 MW급의 대형트럭 화재가 발생한 것으로 가정하였다. 이 경우에 대하여 방재용 환기시스템의 미가동시 피난연락갱의 적절성에 대하여 수치해석을 수행하였다. 터널의 내공 단면적은 72,509 m²이고 둘레길이

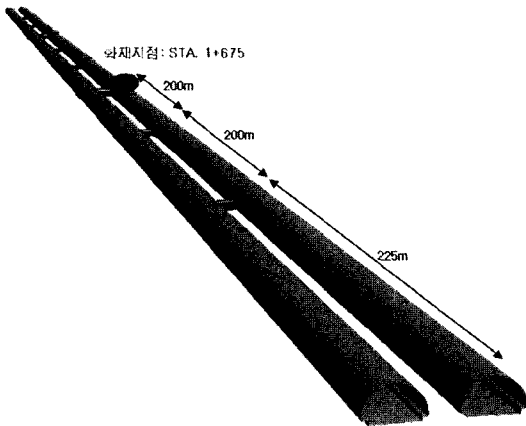


Fig. 1. Schematic view of tunnel.

Table 1. Initial boundary conditions

| | 경계조건 |
|------|------------------------|
| 갱구입구 | 표준대기압 |
| 갱구출구 | 저항자연풍속 4.2 m/s |
| 화재크기 | 30 MW(flashover point) |
| 밀도 | 이상기체방정식 |

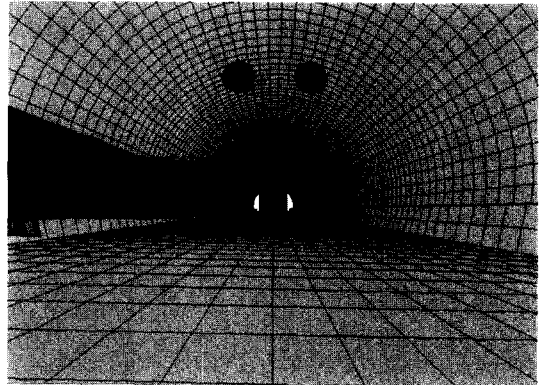


Fig. 2. The grid systems.

33,954 m이며 대표직경은 8,542 m이다. 터널의 종단 경사는 -1.6656%로 차량진행방향에 대하여 표고가 낮아지는 기울기를 갖는다. 경계조건은 Table 1과 같이 터널 출구부의 저항자연풍속은 4.2 m/s이며, 교통환기력의 영향이 적은 10 km/h 미만으로 차량이 운행하다 사고로 인하여 터널내에 정차하는 것으로 설정하였다. 화재지점 전방의 차량은 화재시 그대로 진행하여 터널 밖으로 대피하고, 화재차량 후방의 차량은 정체되어 피난하는 것으로 가정하였다. 비정상상태(transient state)로 터널내외부 기본온도는 표준공기조건인 15°C, 기본압력은 표준대기압인 101,325 Pa, 중력가속도는 9.81 m/s²을 사용하였다.

수치해석에 사용된 계산 격자계의 형상은 Fig. 2와 같으며, 육면체 격자계를 사용하였다.

2.3 터널화재 피난시뮬레이션 해석모델

본 피난시뮬레이션에 사용한 상용프로그램은 SIMULEX로 건물 및 터널, 지하철 등의 화재발생시 인간의 심리인자 및 행동특성을 감안한 2차원 피난대피시뮬레이션 전용코드이다. 이 프로그램에 사용된 피난자의 특성은 사람들의 즉각적인 행동, 놀라서 움직이는 행동, 사람들이 무리지어 움직이는 행동과 줄지어 움직이는 현상 등을 자세히 모델링하여 거의 실제에 가까운 데이터를 얻을 수 있다. 모든 사람들의 위치, 방향,

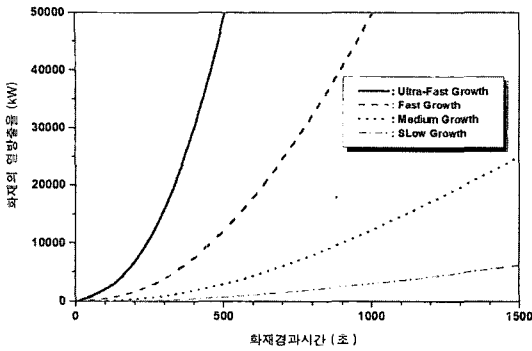


Fig. 3. Scenario of fire propagation.

건는 속도와 피난로의 설정 등은 매 0.1초마다 계산되어진다.

실제 화재에 있어서 가연물의 성상 및 연소조건에 따라서 화재의 최고 규모와 함께 화재의 발달성상도 중요한 요소로 작용하며, Fig. 3과 같이 화재가 최고 조점(flashover point)에 이르기까지의 시간경과에 따른 화재의 발전성상은 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$Q = at^2 \tag{2}$$

여기서, Q: 화재의 열방출율[MW], t: 화재발생시간[sec], 급성장 화재(ultrafast fire): $a > 0.00001$ (유류화재 및 차량)

Eureka 화재실험 및 Memorial 화재실험에서의 화재 결과로 볼 때 차량의 화재는 유류와 타이어 등의 가연성물질이 함유되어 있기 때문에 차량의 화재는 급성장 화재로 간주하고 있으므로 본 연구에서도 이러한 성상을 사용하였다. 피난자의 피난안전높이는 1.5 m로 하였다. 피난시물레이션은 Fig. 4와 같이 경계조건을 설정하였으며, 화재발생위치는 Fig. 1과 같으며 대인용 피난연락경의 간격은 200 m인 경우이다. 피난 인원은 차량이 10 km/h의 저속으로 운행하여 가장 많은 차량 대수가 터널내에 진입되어 있도록 설정하였다. 대피속도는 혼잡장소에 적용되는 1.0 m/s로 설정하였다. 화재시 터널내 차량의 수는 차량 혼입율을 고려하여 462대이며, 피난인원 수는 1971명이다.



Fig. 4. Schematic view of SIMULEX model.

3. 결과 및 고찰

화재발생시 방재용 환기기가 운전되지 않았을 경우, 교통환기력에 의한 공기 관성이 작은 주행속도 10 km/h 미만의 경우에 초기 피난대피 확보여부 및 최종피난자의 위치를 검토하였다.

화재발생시에 공기 중의 일산화탄소는 혈중 헤모글로빈의 산소 운반능력을 막아 인체의 운동능력을 저감시키므로 피난에 있어서 치명적인 영향을 준다. 일반적인 사람의 경우에 CO-Hb가 30%인 경우에 숨이 차고 두통이 유발되며, 일산화탄소의 농도가 1000 ppm일 경우에 치명적인 것으로 알려져 있다. Fig. 5에서는 일산화탄소의 농도분포를 화재발생 1분, 2분, 3분, 5분 그리고 7분 경과 후에 대하여 보여주고 있다. 일산화탄소의 농도 단위는 ppm이며 화재 발생 위치를 기준으로 피난방향으로 대인용 피난연락경의 가장 가까운 위치는 200 m 지점에 있으며, 시간 경과에 따라서 터널 단면의 3개의 위치에 대하여 터널 거리에 따른 일산화탄소의 농도분포를 같은 그래프상에서 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 화재발생 60초 경과 후에 화재 초기부터 교통환기력에 의한 공기관성력이 부족하여 역류가 발생되며, 일산화탄소는 부력에 의한 기류에 의하여 터널 천정부를 따라서 양방향으로 전파되나, 부력에 의하여 오르막쪽인 피난방향(우측방향)으로 더 빠르게 진행된다. 화재발생 후 부력에 의하여 열기류는 화재지점에서 터널상부로 집중적으로 상승되며, 터널상부에서는 화재지점 반대방향으로, 터널하부에서는 밀도차에 의하여 화재지점방향으로 기류가 형성된다. Fig. 5(b)에서 화재발생 120초 경과 후에 일산화탄소는 부력에 의한 기류에 의하여 터널 천정부를 따라서 화재발생부의 전후로 이동되며, 허용피난안전높이인 'point 1'에서 피난거리 40 m까지 임계일산화탄소 농도인 1000 ppm을 나타내고 있다. Fig. 5(c)에서 화재발생 180초 경과 후 화재발열량의 증가에 의한 부력 효과로 역류는 더욱 확산되어 터널 천정부인 'point 2'에서 약 180 m까지 임계일산화탄소 농도분포를 나타내며, 터널상부의 일산화탄소가 터널하부로 확산된다. 터널하부는 출구에서 화재발생부로 향하는 기류에 의하여 일산화탄소의 농도가 낮게 희석되면서 넓게 확산된다. Fig. 5(d)에서 화재발생 300초 경과후 화재발열량의 증가에 의한 부력 효과로 역류는 더욱 확산되며 터널상부에 상대적으로 많이 분포하던 일산화탄소가 터널하부까지 확산된다. 터널하부는 화재지점의 반대방향에서 유입되는 상온의 공기에 의하여 일산화탄소의 농도가 희석되지만 화재지점의 제트기류는 증가되며 천정부의 역

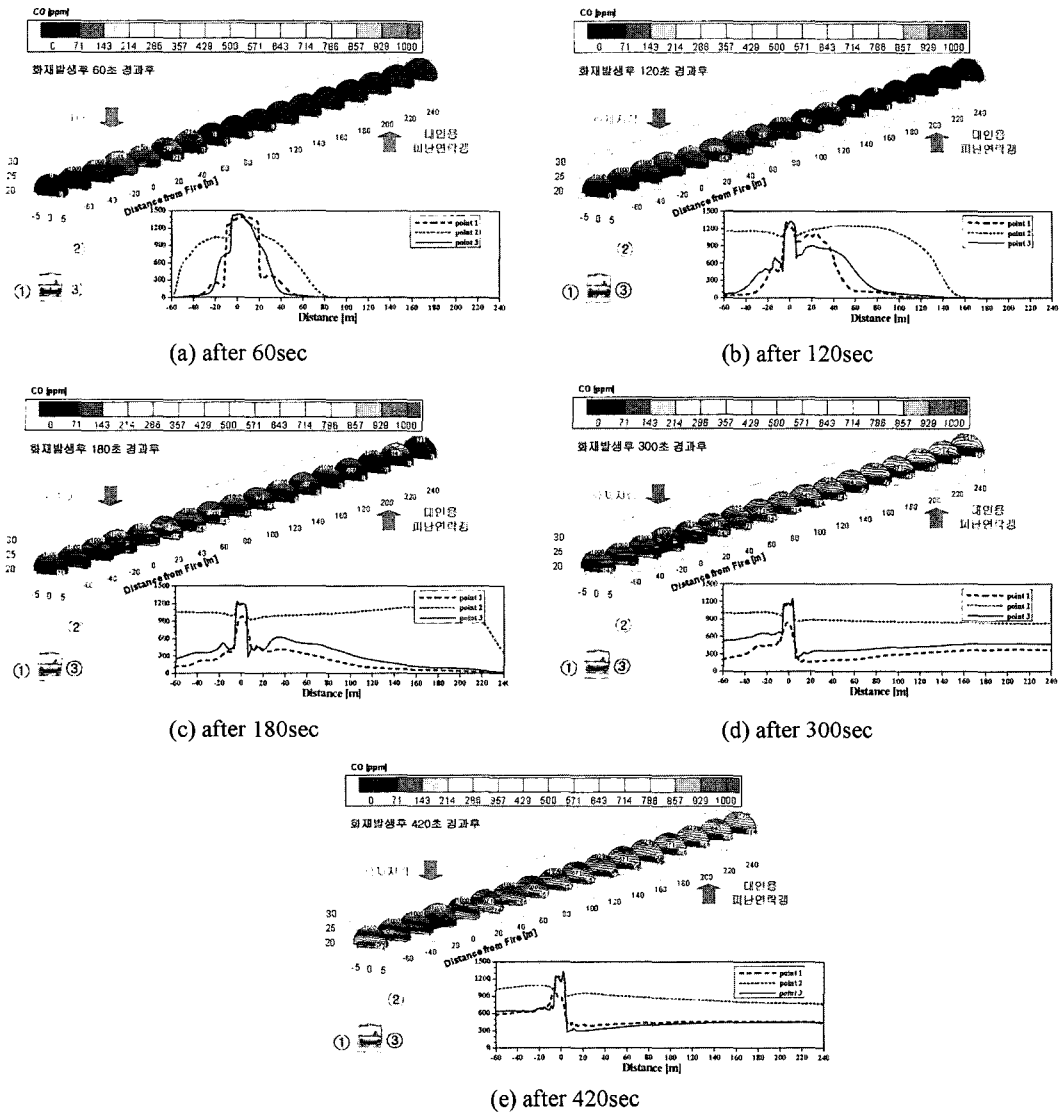


Fig. 5. The CO distributions of the sections including fire sections for each time.

류는 더욱 확산된다. Fig. 5(e)에서 화재발생 420초 경과 후 터널상부의 일산화탄소가 터널하부까지 더욱 확산되는 것으로 나타난다.

도로터널 화재시에 과도하게 높은 온도는 운전자와 승객들의 피난에 있어서 주요한 영향을 미치게 된다. NFPA(National Fire Protection Association)는 “피부표면의 습기에 의한 증발 냉각효과는 60°C 이상의 공기가 피부를 가열하는 것을 방지할 수 없다”고 언급하고 있으며, 1959년 LA에서 시행된 학교 화재시험에서 1.5 m 높이에서 65.6°C로 형성되었을 때 교사와 학생들은 복도를 통하여 인접한 교실로 대피하는 것이 불

가능한 것으로 나타났다. Fig. 6에서는 온도의 분포를 화재발생 1분, 2분, 3분, 5분 그리고 7분 경과 후에 대하여 보여주고 있다. 온도의 단위는 섭씨(°C)이다. Fig. 6(a)에서 화재발생 60초 경과 후 교통환기력에 의한 공기관성력이 부족하여 터널 천정부에서 역류가 발생하며 부력에 의하여 터널상부의 열기류는 오르막경사인 대피경로로 상대적으로 더 많이 분포한다. Fig. 6(b)에서 화재발생 120초 경과 후 열기류는 터널의 천정부를 타고 확산되나, 허용피난안전높이인 ‘point 1’에서 피난거리 40 m의 온도는 약 섭씨 25도를 나타내고 있다. Fig. 6(c)에서 화재발생 180초 경과 후 화재발열량의 증

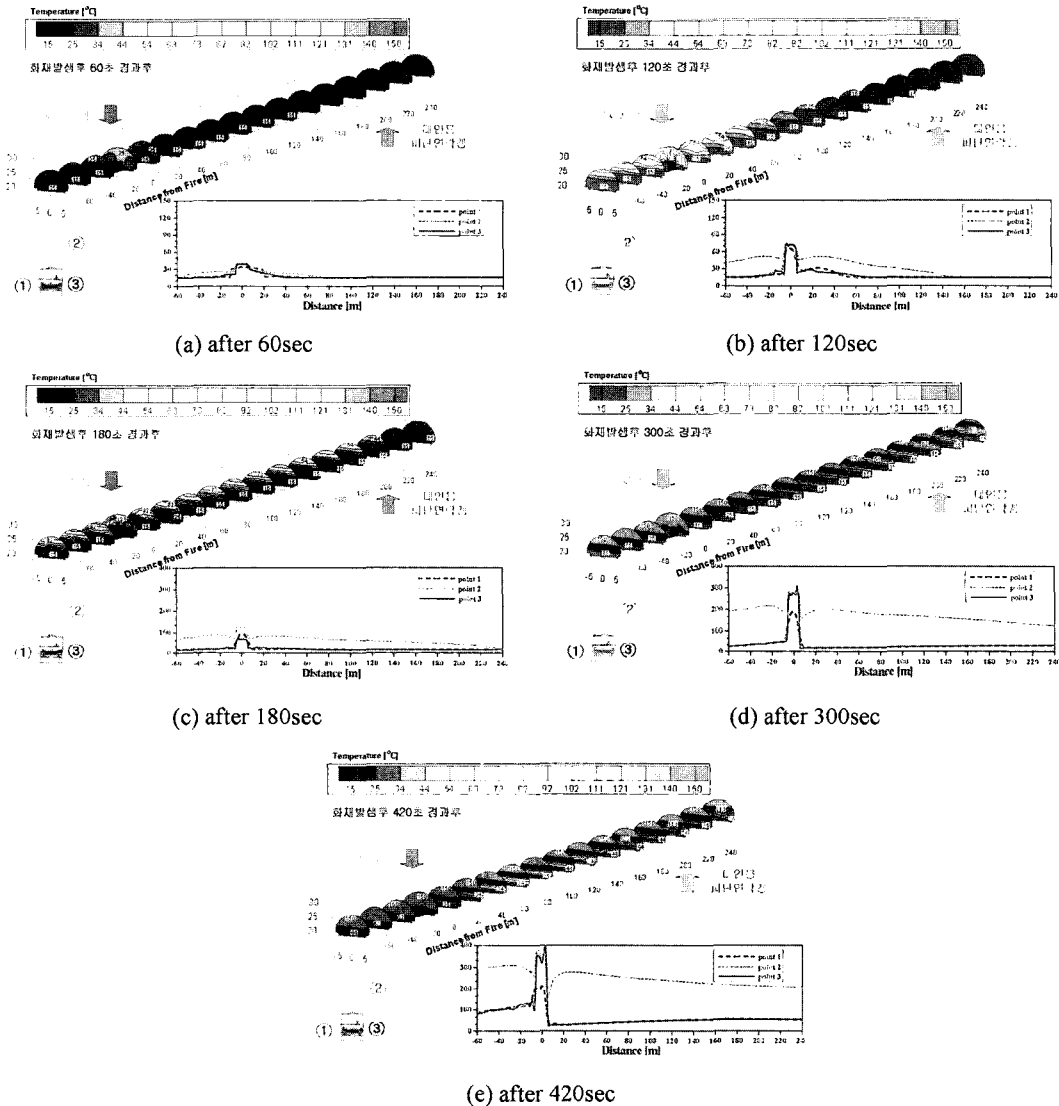


Fig. 6. The Temperature distributions of the sections including fire sections for each time.

가에 의한 부력 효과로 역류는 더욱 확산되어 천정부의 약 120 m에서 섭씨 70도를 나타낸다. 허용피난안전 높이인 'point 1'에서 피난거리 60 m 이상의 구간은 상온을 나타내고 있다. Fig. 6(d)에서 화재발생 300초 경과후 화재발열량의 증가에 의한 부력 효과로 천정부의 역류는 더욱 확산되며, 천정부의 고온이 터널하부로 확산된다. Fig. 6(e)에서 화재발생 420초 경과후 화재열량은 화재최고점(flashover point)인 30 MW의 열량을 연속적으로 발산하므로 부력에 의한 열전달이 빠르게 진행된다.

Fig. 7에서는 앞서 계산된 일산화탄소의 농도 분포 및 온도분포를 이용하여 SIMULEX에 의하여 운전자 및 승객들의 화재 피난 시뮬레이션을 수행하였다. 화재발생은 차량이 10 km/h로 지체되는 시간에 발생한 것으로 가정하였으며, 피난인원은 대형차혼입율 12.02%를 이용하여 차종에 따른 인원수를 가정하였다. 피난 시뮬레이션의 시나리오는 화재 발생한 후 피난인원이 피난연락경에 도달하는 시간을 측정하였다. 계산결과 총 인원수는 1971명이다. 대피 속도는 최악의 상황을 고려하기 위하여 혼합한 방호공간으로 가정하여 피난

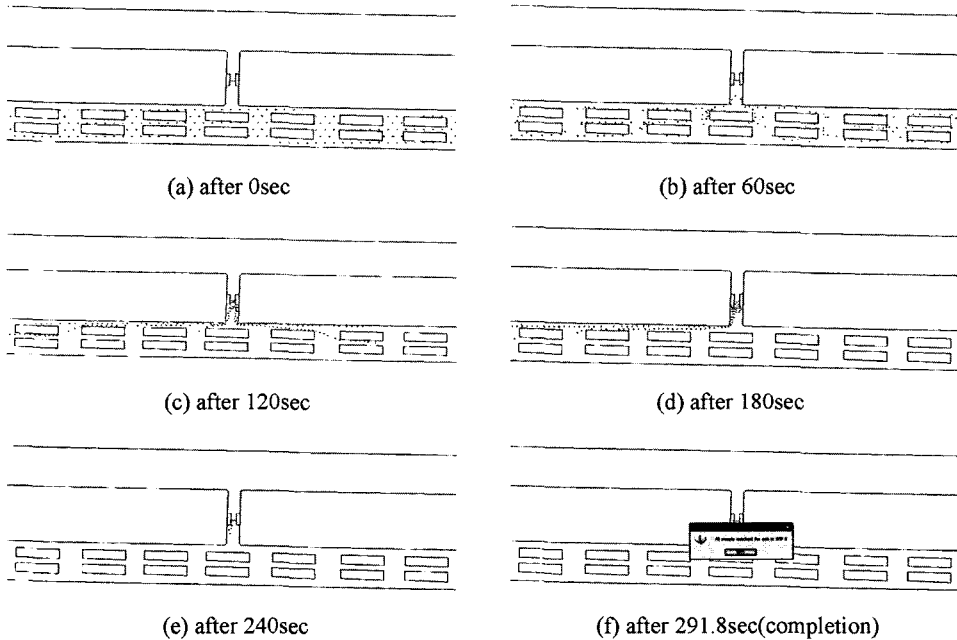


Fig. 7. SIMULEX simulation for each time.

속도를 0.8 m/s·1.0 m/s에서 무작위로 시뮬레이션을 수행하였다. 피난시간을 좀 더 정확하게 해석하기 위하여 터널 내에 1 m · 1.5 m 간격으로 배치된 것으로 하였다. 또한 화재인지시시간은 10초로 화재 잠복시간 및 차량탈출시간을 55초로 고려하여 피난시뮬레이션을 실시하였다. 따라서 피난완료시간은 버스 하차 시 소요되는 시간 등 기타 소요시간 등을 제외한 피난시간이다. 본 피난 연락망이 200 m 간격으로 있을 때 피난자의 혼잡성을 고려하여 피난속도를 실시한 결과 모든 인원이 피난을 완료한 시간은 291.8초가 소요되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 도로터널 내부에서 발생한 가상 화재에 따른 열전달 및 연기거동의 특성을 수치해석을 통하여 예측하고, 그 결과를 이용하여 운전자 및 승객들의 피난 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 30 MW의 급성장화재에서 방재용 제연팬이 화재의 영향으로 작동불능인 경우에 운전자 및 승객들이 화재발생지점에서 200 m 떨어져 있는 대인용 피난 연락망으로 무사히 대피 완료하는 것으로 판단된다.

본 연구는 도로터널에서 열기류 및 연기의 이동경로 형태를 예측하여 방재 및 피난 시스템을 구축하는데,

도로터널 설계시에 유용한 자료로 이용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. J. G. Quintiere, "Perspective on Compartment Fire Growth", *Combustion and Science and Technology*, Vol. 39, pp.11-54(1984).
2. K. D. Steckler, J. G. Quintiere, and W. J. Rinkinen, "Flow Induced by Fire in a Compartment", *Nineteenth Symposium(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp.913-920(1993).
3. 박원희, 김태국, 손봉세, "경륜장 내부의 화재발생에 따른 열 및 연기 거동에 대한 수치적 연구", *한국화재소방학회지*, Vol. 17, No. 3, pp.13-19(2003).
4. 이성룡, 김충익, 유홍선, 김혁순, 전명배, "경사 터널 내 화재시 임계속도에 관한 실험적 연구", *한국화재소방학회지*, Vol. 18, No. 1, pp.49-53(2004).
5. L. Y. Cooper, "Smoke Movement in Rooms of Fire Involvement and Adjacent Spaces", *Fire Safety Journal*, Vol. 7, pp.33-46(1984).
6. A. Draoui, F. Allard, and C. Beghein, "Numerical Analysis of Heat Transfer by Natural Convection and Radiation in Participating Fluids Enclosed in Square Cavities", *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 20, pp.253-261(1991).