화재 발생 지하철 역사에서의 여객 대피 해석에 관한 연구

김 치 겸, 이 성 원, 허 남 건*†, 남 성 원**
서강대학교 대학원, *서강대학교 기계공학과, **한국철도기술연구원 철도시스템연구본부

A Numerical Study on Passenger Evacuation in a Subway Station in Case of Fire Occurrence

Chi Gyeom Kim, Sung Won Lee, Nahmkeon Hur*†, Seong Won Nam**
Graduate school, Sogang University, Seoul 121-742, Korea
**Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea*
***Railway System and Safety Research Department, KRRI, Gyeonggi 437-050, Korea*

(Received March 17, 2010; revision received April 26, 2010)

ABSTRACT: A numerical simulation of passenger evacuation in a subway station was performed by coupling the passenger flow analysis and the fire simulation. The algorithm of the passenger flow analysis was based on a DEM (Discrete Element Method) using the potential map of the direction vector for each passenger. This algorithm was improved in the present study as to use finer grid smaller than a passenger in order to resolve detailed geometry of the station and to resolve the behavior of passengers in the bottleneck at the ticket gate considering the collision of passengers to a wall or with other passengers. In the fire simulation, the CO distribution predicted by using CFD was used to take into account the effect of toxic gases on the passengers' mobility. The methodology proposed in the present study could be used in designing safer subway station in case of fire occurrence.

Key words: Passenger evacuation flow(여객 대피 유동), Discrete element method(이산요소법), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Pre processor(전처리장치)

기 호 설 명

$\triangle h$: 격자 크기 [m]
Ct : 여객이 t 시간 [min.] 동안 흡입한 기체의 유해 정도를 표현
Ct_{effect} : 여객이 치명상을 입는 Ct값
F_{ICO} : CO의 흡입량 분율

1. 서 론

최근 지하철 역사는 열차의 승강장 기능 뿐만 아니라 도시 철도의 환승역 기능, 여객의 편의시설 기능까지 갖추면서 점점 대형화, 복잡화, 심층화되고 있다. 이러한 지하철 역사를 이용하는 여객의 동선도 복잡해지고 있다. 따라서 지하철 역사에서 화재와 같은 재난이 발생할 경우를 대비하여 여객의 피난과 안전을 확보할 수 있도록 여객의 동선을 고려한 지하철 역사의 설계가 요구되고 있다. 이와 같은 요구를 만족시키기 위해서 건축물의 구조에 따라 실제 여객이 어떻게 움직이는지 예측할 수 있는 여객 유동 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

이러한 필요에 따라 CA(Celluar Automata) 알고리즘[1,2]에 기반을 둔 여객 유동 상용 프로그램 Simu-

† Corresponding author
Tel.: +82-2-705-8637; fax: +82-2-712-0799
E-mail address: nhur@sogang.ac.kr

lex[3], Exodus[4]등이 개발되어 일부에서 사용되고 있다. 하지만, CA 알고리즘에서는 여객을 계산 영역 내 한 개의 계산 격자로 간주하여, 계산 격자의 값을 변화시키는 것으로 여객이 이동하는 것을 모사하기 때문에 여객은 현재 위치하는 격자의 중심좌표에서 인근에 위치하는 격자의 중심좌표로 이동한다고 가정한다. 또한 CA 알고리즘에서는 각각의 여객의 이동 속도가 다른 경우에 발생하는 여객들 사이의 충돌을 모사하기가 어렵다.

국내에서도 여객 유동 알고리즘에 대한 연구가 진행되었다. Nam[5] 등은 여객과 해석 격자를 구분하여 계산할 수 있는 DEM 알고리즘[6,7]에 기반을 둔 여객 유동 프로그램 P*Flow을 개발하였다. 하지만 기존에 연구된 P*Flow의 DEM 알고리즘에서도 하나의 격자 크기가 한 명의 여객의 크기와 동일하기 때문에 여객의 움직임을 자세하게 모사할 수 없었다.

본 연구에서는 먼저 여객 유동 해석에 사용하기 위한 격자를 자동으로 생성하는 전처리 장치에 대한 연구를 수행하였다. 이어서 여객의 움직임을 더 정확하게 예측하기 위하여 DEM 알고리즘을 기반으로 여객의 크기보다 작은 격자를 사용할 수 있는 여객 유동 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 화재로 인하여 발생되는 질식성 기체가 대피하는 여객에게 미치는 위험도를 예측하기 위하여 화재 CFD 해석을 통하여 얻은 질식성 기체 CO의 분포 결과를 여객 유동 알고리즘에 적용하는 방법을 연구하였다.

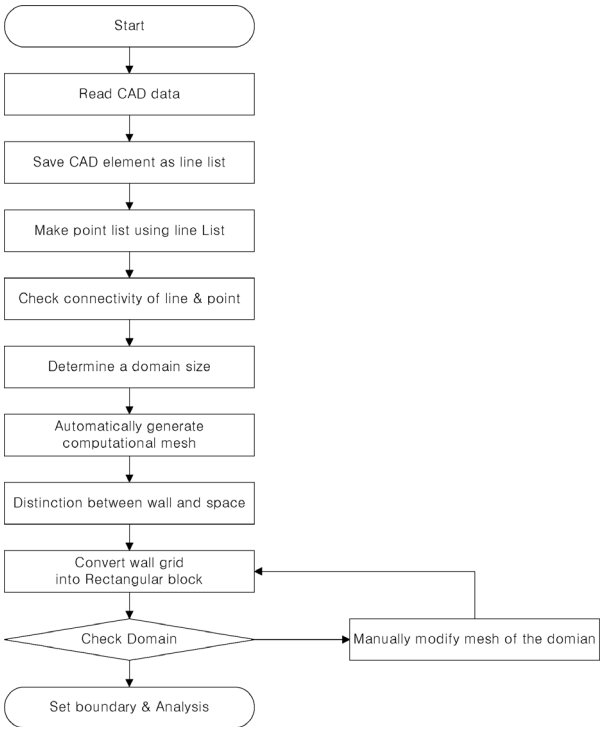
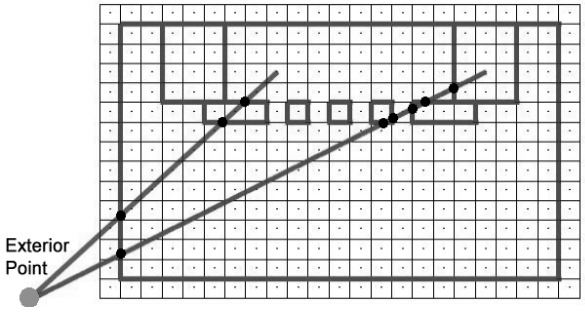


Fig. 1 Flow chart of pre-processor.

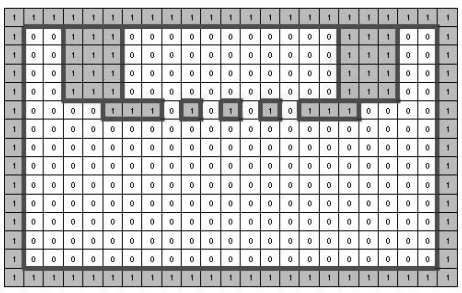
2. 전처리 장치와 여객 유동 알고리즘

2.1 전처리 장치

실제 공간을 DEM 알고리즘을 사용하여 계산하기 위해서 격자 생성, 벽과 공간의 구분, 경계조건의 설정과 같은 전처리 과정이 필요하다. Fig. 1은 여객 유동 해석에 요구되는 전처리 과정을 나타낸 순서도이다. 이 프로그램에서는 본 연구실에서 개발한 격자생성 프로그램[8]을 사용하여 CAD 파일로부터 선, 원호, 원 등으로 구성된 곡선의 위치 정보를 추출하고, 도면의 각 건축물이 폐곡선을 이루는 점을 이용하여 벽과 공간을 구별하였다. 벽/공간 인식 알고리즘은 Fig. 2(a)와 같이 직선의 방정식을 이용하여 폐곡선 내부와 외부의 격자를 구별하는 방법을 이용하였다. 해석 공간 외부의 한 점과 각 해석 격자의 중점을 연결하는 직선과 공간을 구분하는 폐곡선들이 만나는 교점의 숫자를 계산하여



(a) Ray intersection method for distinction



(b) Binary distinction

Fig. 2 Scheme of distinction between wall and space.

교점의 숫자가 홀수인 경우에는 공간, 짝수인 경우에는 벽으로 구분하여 Fig. 2(b)와 같이 이진 형태로 저장하였다. 또한 사용자가 벽/공간 인식 알고리즘에 의하여 벽과 공간으로 구분된 격자를 실제 도면과 확인하면서 수정할 수 있도록 벽과 공간의 수동 구분 기능을 전처리 장치에 추가하였다.

2.2 여객 유동 알고리즘

본 연구에서 개발된 여객 유동 알고리즘은 여객을 하나의 요소(Element)로 간주하고 해석 공간에서 여객의 위치에 따라 여객의 움직임을 지정하는 방향 벡터를 potential map으로 나타내어 여객 유동을 마치 유체의 흐름과 같이 표현한다.

기존에 개발된 DEM 알고리즘에서는 여객과 격자의 크기가 동일하게 고려되었지만, 본 연구에서는 여객의 크기의 1/16 (넓이 기준)인 세밀한 격자를 사용하여 여객의 움직임을 더 실제적으로 예측하였다. 또한 각각의 여객에 대한 정보를 별도로 저장하여 화재 발생 시 각각의 여객의 위험도를 평가하기 위한 자료로 사용하였다.

Fig. 3은 세밀한 격자를 이용한 여객 유동 알고리즘의 순서도이다. 아래 (1)~(9)는 여객의 움직임을 예측하기 위한 각 단계별 구성으로 출구에 근접한 여객부터 계산한다.

(1) 여객이 이동 가능한지 판단하여 이동 불가능한 경우 계산 대상 여객에서 제외시킨다.
(2) 여객이 출구 경계에 도달하였는지 확인하여 출구에 도달한 여객의 경우 계산 대상 여객에서 제외시킨다.
(3) 여객이 계산 대상인 경우 여객의 현재 위치에서 여객이 차지하고 있는 여러 격자들의 potential map으로부터 구한 벡터 값을 보간하여 여객의 주 이동방향을 결정한다.
(4) 여객의 움직임을 다양하게 만들기 위하여 정규분포에 근거한 가우시안 랜덤 숫자를 생성시키고 이를 사용하여 개별 여객의 주 이동방향을 변경한다.
(5) 여객이 최고속도로 주 이동방향을 향하여 이동하는 경우 다음 시간의 위치에서 벽이나 다른 여객과 충돌하는지 확인하고 충돌을 피하도록 주 이동방향을 수정한다.
(6) 여객이 처음 계산된 주 이동방향의 반대 방향으로 이동하는 것을 방지하기 위하여 (5)에서 수정된 주 이동방향이 (3)에서 처음 계산된 주 이동방향을 기준으로 -90도에서 +90도 사이에 있는지 확인한다.
(7) 여객이 최고속도로 이동할 때 벽이나 다른 여객과 충돌하는지 계산하고 충돌을 피할 수 있도록 이동 속도를 줄인다.
(8) 위의 조건을 만족하는 모든 이동방향과 이동속도로 여객이 이동하는 경우에 대하여 다음 시간의 예상 위치에서 potential과 이동 거리를 계산하고, 이전 위치에서의 potential과 비교하여 가장 작은 potential과 긴 이동거리의 위치를 다음 시간에서의 여객 위치로 정한다.
(9) 다음 순서의 여객에 대하여 (1)~(8)의 단계를 반복한다.

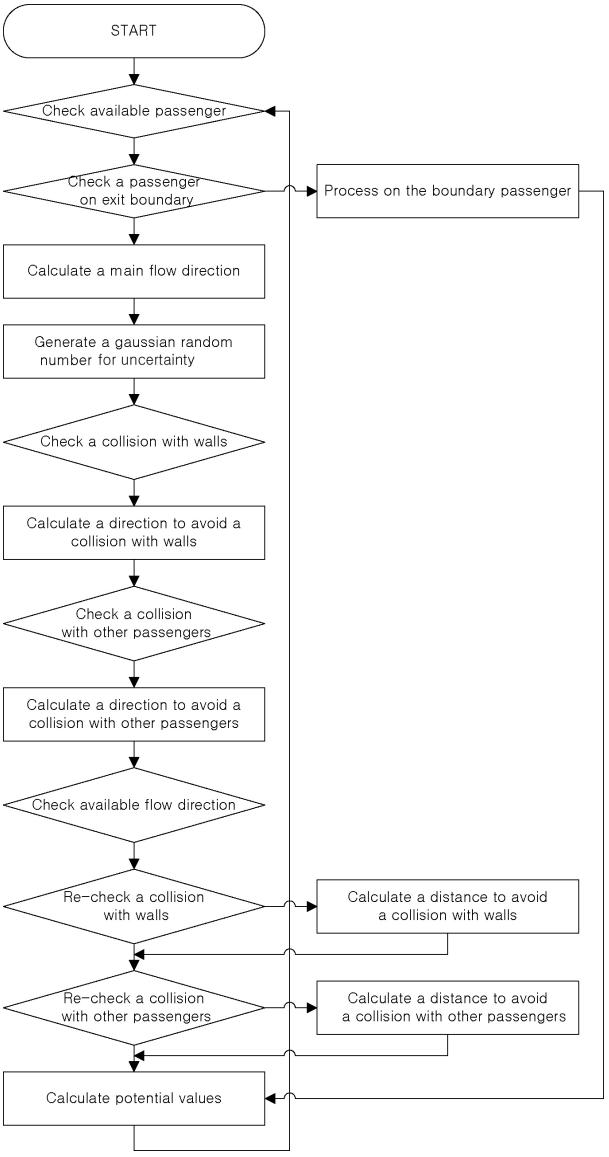


Fig. 3 Flow chart of passenger flow analysis.

Fig. 4는 여객과 격자의 크기가 동일한 경우(왼편 그림)와 격자의 크기가 여객의 크기보다 더 작은 세밀한 격자를 사용한 경우(오른편 그림)의 여객 유동 해석 결과를 보여준다. 여기서 시간은 여객이 입구 경계를 통과한 시간을 0초로 하여 진행된다. 0.5 m 격자를 사용한 예측 결과에서는 병목현상이 제대로 모사되지 않고 여객이 일직선으로 병목구간인 좁은 개찰구를 지난다. 이에 비하여 0.125 m 격자를 사용한 예측 결과에서는 입구를 통과한 여객이 산개하여 움직이고, 입구 경계를 통과한지 5초 후에 좁은 통로인 개찰구에서 여객의 움직임이 정체되는 병목현상이 관찰되어 0.5 m 격자를 사용한 결과보다 실제 상황의 여객 유동과 더 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 5는 양쪽 입구에서 여객이 유입되는 경우 격자 크기를 변화시키면서 여객 유동을 예측한 결과에서 여객 한 명의 동선을 보여준다. 0.5 m 격자를 사용한 경우 여객의 동선이 출구를 향하여 단순하게 이동한 것과 비교하여, 0.25 m 이하의 격자를 사용한 경우 양쪽 입구에서 나온 여객들이 개찰구를 향해 이동하면서 다른 여객과 충돌을 피하기 위하여

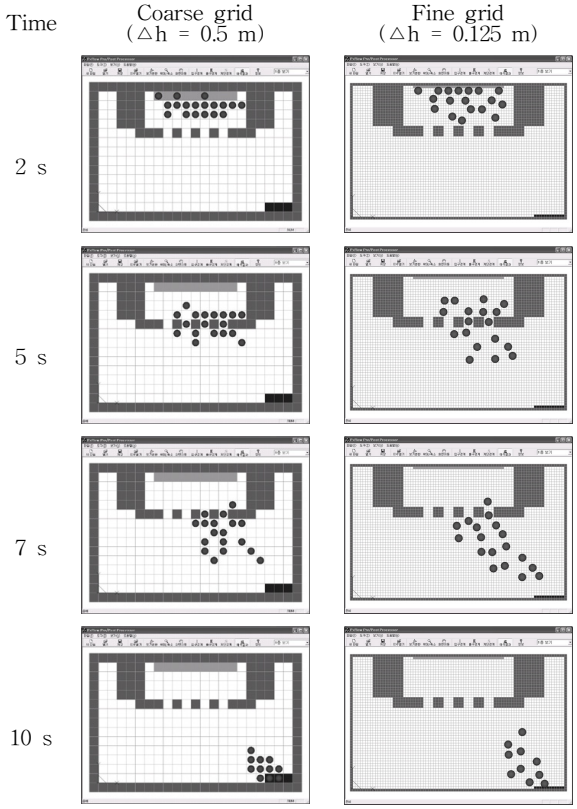


Fig. 4 Comparison of passenger flow between coarse and fine grid cases.

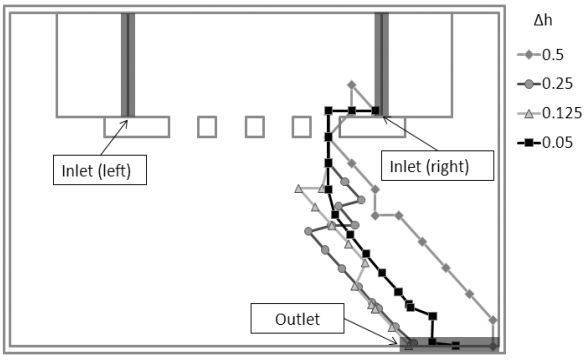


Fig. 5 Path-line with various grid size (0.5 m, 0.25 m, 0.125 m, 0.05 m).

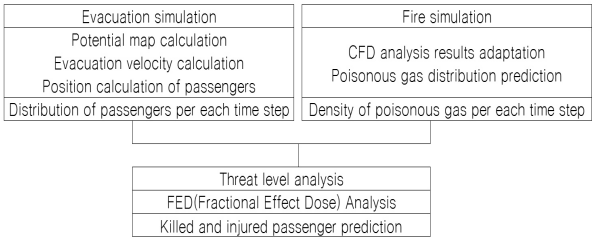


Fig. 6 Model of hazard assessment using event tree method.

경로를 급격하게 바꾸는 것을 확인할 수 있었다. 0.25 m 이하의 격자를 사용한 경우 여객이 다른 여객과의 충돌을 피하기 위한 움직임의 차이를 보였을 뿐 전체적인 움직임은 비슷한 결과를 보였다.

3. 유독성 평가 모델을 이용한 여객유동과 화재의 연계 해석

3.1 유독성 평가 모델

Fig. 6과 같이 Event tree 방법을 적용하여 화재 시나리오를 구상하고 화재 해석과 여객 유동을 연동하기 위하여 유독성 평가 모델을 사용하였다. 화재 해석에서는 CFD 해석을 통해 지하 역사에서 화재 시 발생되는 질식성 기체 CO의 농도 분포를 계산하였으며, 여객 유동 해석에는 0.125 m 간격의 격자와 여객 유동 알고리즘을 사용하여 여객의 움직임을 예측하였다. 유독성 평가 모델에서는 화재 CFD 해석에서 얻은 질식성 기체 CO의 농도의 분포가 대피하는 여객에게 미치는 위험의 정도를 평가하기 위하여 식(1)과 같이 유해 가스를 흡입한 사람이 입은 피해를 정량적인 값으로 계산하는 FED(Fractional Effective Dose) 모델을 사용하였다.

$$FED_{effect} = \frac{\text{dose received at time t}}{\text{Ct dose}} = \frac{\sum \text{Ct}}{Ct_{effect}} \quad (1)$$

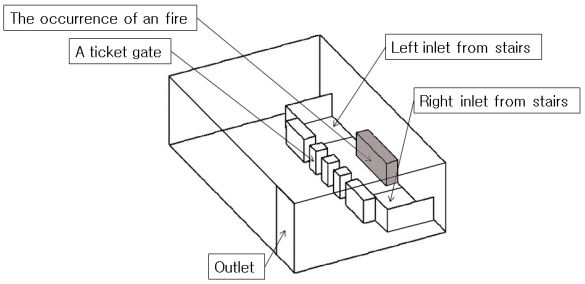
FED 계산을 위한 유독성 평가 모델은 Purser's model, N-GAS model, 미국 FAA의 모델 등이 있다. 본 연구에서는 여러 가지 유해한 기체를 흡입한 사람이 입은 피해를 평가하는 FED 모델 중에 하나인 Purser's model[9]을 사용하였다. 식(2)는 Purser's model에서 CO의 흡입이 사람에게 미치는 영향을 평가한 식이다.

$$F_{ICO} = \frac{8.2925 \times 10^{-4} (ppm\,CO)^{1.036} t}{30} \quad (2)$$

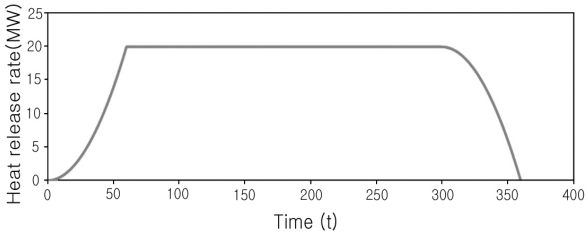
여기서 t(min.)는 질식성 기체에 여객이 노출된 시간을 나타낸다. 위와 같이 화재 발생 시 발생되는 치명적인 질식성 기체인 CO를 흡입한 여객이 입은 피해를 예측하여 여객 유동 알고리즘에 적용하였다.

3.2 화재 모델

여객 유동과 화재의 연계 해석을 위하여 Fig. 7(a)와 같이 지하철의 개찰구를 간략화한 모델을 해석 영역으로 설정하였으며, 화재의 발생은 개찰구 내 1.25 m^3 부피의 직육면체 부위에서 시작된다고 가정하였다. 화재는 Fig. 7(b)의 화재 발달 곡선



(a) Domain of fire Simulation



(b) Fire growth rate

Fig. 7 Model of fire simulation.

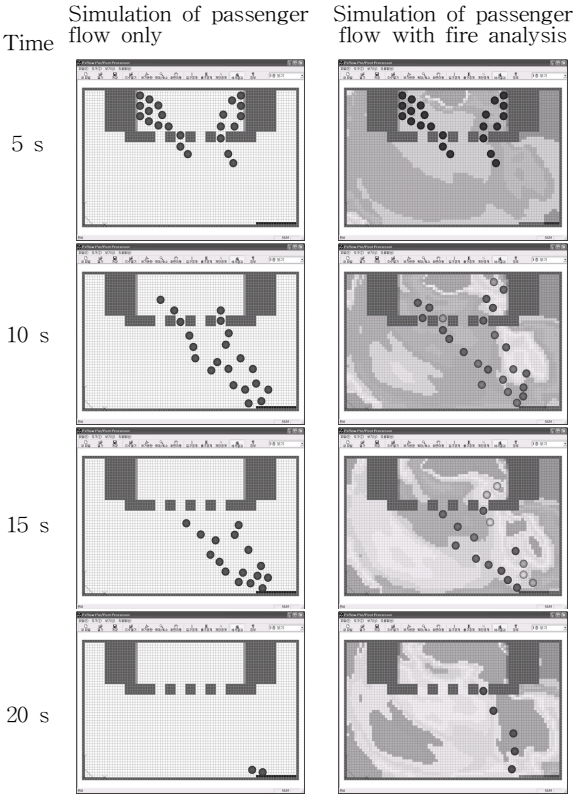


Fig. 8 Passenger evacuation flow simulation only(left) and with fire analysis(right).

에 따라 전소하는 것으로 고려하였다. 화재 발달 곡선에서 화재 강도는 화재 발생 60초 후에 최대치인 20 MW에 도달하며, 화재 발생 300초 후에는 화재가 점차 줄어든다. 화재 시 유독가스와 열 방출율과의 관계(CO 3330 mg/MW)[10]에 따라 20 MW의 화재 강도에서는 CO가 최대 66,600 mg 생성되는 것으로 고려되었다. 이 때, 화재로부터 발생할 수 있는 최대 CO 농도는 약 4500 ppm이다.

4. 화재 시 여객 대피 유동 해석 결과

Fig. 8는 CFD 해석으로 도출된 유독가스가 여객의 대피에 미치는 영향을 보여준다. 여객은 화재 발생 30초 후에 양쪽 입구에서 들어와서 출구를 향하여 대피한다. 화재 CFD 해석 결과에서 질식성 기체 CO의 흐름이 우측 하단의 출구를 향하므로, 여객의 위험도 또한 우측 하단의 출구를 향하여 증가한다. 이와 같은 이유로 오른쪽 입구에 들어오는 여객이 왼쪽 입구로 들어오는 여객에 비하여 위험도가 더 빠르게 증가되는 것으로 예측되었다. 최종적으로 약 5명의 여객이 20초 이후에도 출구로 빠져나가지

못하고 위험도가 치사수준에 도달한 것으로 예측되었다. 본 연구에서 개발된 여객유동과 화재의 연계해석 모델은 화재로 인해 발생하는 유독가스가 여객의 대피에 미치는 영향을 유독성 평가모델로 고려하였기 때문에, 왼쪽 그림과 같이 화재 발생이 없는 경우에는 모든 여객이 출구로 안전하게 빠져나간 것으로 나타났고 오른쪽 그림과 같이 화재가 발생한 경우에는 유독가스가 여객의 이동 능력을 감소시켜 일부 여객이 출구까지 대피하지 못하는 것으로 예측되었다.

5. 결 론

본 연구에서 기존의 0.5 m 격자를 사용한 P*Flow의 여객 유동 해석 알고리즘을 개선하여 세밀한 격자를 사용할 수 있는 여객 유동 알고리즘에 대하여 연구하였고, 그 결과 병목구간에서 여객의 움직임과 다른 여객과 충돌을 피하는 여객의 움직임을 모사할 수 있었다. 개선된 여객 유동 알고리즘을 철도역사의 개찰구와 같이 병목현상이 발생되는 구간에서 여객 유동을 해석하는 도구로 사용할 수 있을 것이다.

또한, 지하철 역사에서 화재 발생 시 여객 대피 유동을 모사하기 위하여 0.125 m 간격의 격자를 사용한 여객 유동 알고리즘과 화재 CFD 해석 결과를 연동하여 화재가 발생한 지하철 역사에서 여객 유동을 예측하였다. 화재 CFD 해석을 통하여 얻은 질식성 기체 CO의 분포를 Purser의 유독성 평가 모델을 사용하여 여객 유동 알고리즘에 적용하였고 이를 사용하여 간략화한 지하철 역사 공간에서 화재 발생 시 질식성 기체 CO가 여객의 대피에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구에서 개발된 여객 유동과 화재 CFD 해석을 연동한 알고리즘은 화재 발생 시 여객 대피 유동과 같이 실험하기 어려운 상황을 수치해석으로 예측함으로써 여객의 안전한 대피를 고려한 지하철 역사의 구조 설계에 반영할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 건설기술기반구축사업인 “철도 역사에서의 여객 유동 평가 프로그램 개발” 과제의 일환으로 진행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Nagel, K. and Scheckenberg, M., 1992, A cellular automation model for freeway traffic, Journal of Physics I France, Vol. 1, pp. 2221-2229.
2. Ilachinski, A., 2001, Cellular automata : A Discrete Universe, World Scientific Publishing Co.
3. Simulex on-line user's manual, 2004, Integrated Environmental Solutions Limited.
4. Galea, E. R., 2002, Principles and Practice of Evacuation Modeling, 7th ed., CMS Press.
5. Nam, S. W., 2005, (in Korean) Development of algorithm for passenger flow analysis based on DEM, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 8, pp. 337-341.
6. Nanbu, K., 1992, Stochastic solution method of the boltzmann equation, The memoirs of the Institute of Fluid Science, Vol. 3, pp. 47-93.
7. Bird, G. A., 1976, Molecular gas dynamics, Clarendon Press.
8. Chin, S. M., Won, C. S., and Hur, N., 2004, (in Korean) Development of a mesh generation program using contour line data, Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 7-12.
9. Purser, D., 1996, Behavioural impairment in smoke environments, Toxicology, Vol. 115, pp. 25-40.
10. Yang, S., Hur, N., Ryou, H. S., Kim, D. H., and Jang, Y. J., 2008, (in Korean) Numerical simulation of smoke ventilation in rescue route and cross passage of railroad tunnel, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, pp. 1-10.