

지하역사 기본 모델에 대한 여객 유동 특성 해석 Analysis of Pedestrian Flow Characteristics in Subway Station

남성원†
Seong-Won Nam

Abstract

Insight into behaviour of pedestrians as well as tools to assess passenger flow condition is important in such instances as planning and geometric design of railway station under regular and safety-critical circumstances. Algorithm for passenger flow analysis based on DEM (Discrete Element Method) is newly developed. There are lots of similarity between particle-laden two phase flow and passenger flow. The velocity component of 1st phase corresponds to the unit vector of calculation cell, each particle to passenger, volume fraction to population density and the particle velocity to the walking velocity, etc. And, the walking velocity of passenger is also represented by the function of population density. Key algorithms are developed to determine the position of passenger, population density and numbering to each passenger. To verify the effectiveness of new algorithm, passenger flow analysis for the basic models of railway station is conducted.

Keywords : Passenger flow(여객유동), DEM(이산요소법), Walking speed(보행속도), Railway station(철도역사), CFD(전산유체해석), Monte Carlo(몬테카를로)

1. 서론

철도역 건물은 과거에는 철도 여행객들만의 승하차용으로 이용되는 것으로 인식되어 왔으나, 최근에는 대도시의 철도역 건물의 복합화, 대형화로 인하여 철도 영업 및 서비스 거점으로서의 중요한 위치 뿐만 아니라 지역을 대표하는 도시 시설중 하나로 여러 가지 부가 기능을 담당하는 장소로 바뀌고 있다. 일반적으로 철도역이 복합화 대형화되면, 역이 갖추어야 할 기본적인 역할 즉, 안전하고 이용하기 편리하며 쾌적한 환경을 만들기 위한 여러 가지 조건이 요구된다. 특히, 도시 철도인 지하철의 일부 환승역의 경우, 여러개의 철도 노선이 교차하여, 구조가 심층 지하화되기 때문에 이용객들의 이동 동선이 길어져 러시아워때의 극심한 혼잡성 문제 뿐만 아니라 화재와 같은 재해 발생시에는 이용객들의 피난 및 안전 확보 문제가 발생하여, 철도역 건축물의 구조 설계의 주요 파라미터로 떠올랐다.

이와 같이 복잡 다양화되는 철도역의 여러 가지 요구조건

을 만족시키기 위하여는 철도역 건축물 설계의 하드웨어적 요소 뿐만 아니라 철도역을 이용하는 사람들의 이동 형태를 동적으로 해석하여 역사의 시설 계획에 반영하는 여객 유동 해석과 같은 소프트웨어적 요소도 고려되어야 한다.

일반적으로 여객 유동은 넓은 의미의 교통류(traffic flow)의 한 부류이며 건축공학 및 교통공학에서는 보행자 유동 또는 승객 유동으로 부르기도 한다. 그러나 철도역을 이용하는 사람들은 교통공학에서 말하는 가로망에서의 단순 보행자와는 목적이 다르고, 혐의의 승객 유동은 차량을 탑승한 사람들을 일컬으므로 본 연구에서는 열차를 타고 내리려는 목적을 가진 사람들의 일련의 행동 패턴, 즉, 보행, 티켓팅, 열차승강 등과 같은 움직임을 나타내는 여객유동으로 표현하였다. 여객 유동 해석용 상용 프로그램으로서 CA(Cellular Automata) 기법[1,2]에 기반을 둔 Simulex[3]나 Exodus[4]가 개발되어 일부에서 사용되고 있으나 이들 프로그램들은 CA기법의 특징인 이진구조를 사용하고 있다. 즉, 여객 개개인을 계산 영역내의 셀로 간주하여 셀을 움직여서 해석하는 기법이다. 그러나, 이진구조를 사용하면, 셀은 항상 인근 셀의 중심 좌표로만 이동한다고 가정하여야 하며, 각각의 셀 속도를 달리 주었을 때 이동하던 인근의 셀들이 중첩되었을

† 책임지자 : 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부
E-mail : swnam@krti.re.kr
TEL : (031)460-5244 FAX : (031)460-5279

때에 처리하는 방법이 어려운 단점이 있다. 또한, 다른 상용 프로그램과 마찬가지로 기존의 프로그램들은 사용자들의 User Input 기능과 후처리 그래픽 기능만 있을뿐 핵심코드는 공개하지 않고, 게다가 사용자가 다양한 특별 상황에 맞게 프로그램을 개조할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 철도 역 모델에 대하여 각각의 여객 유동 해석 목적에 따라 자유로이 모델 설정을 할 수 있는 프로그램을 개발하기 위하여 CFD 기법중 하나인 기체 또는 액체 유동에 고체 입자가 혼입되는 다상유동 해석 방법으로 널리 사용되고 있는 DEM 기법[5,6]을 이용한 여객 유동 해석 알고리즘을 개발하였다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 지하철 역의 기본 모델에 대하여 여객 유동 행태를 해석하였으며, 여객 이동 행태를 정량적 및 정성적으로 분석하였다.

2. 여객 유동 일반

여객 유동 해석에서의 보행속도는 보행자가 평상시 보행하는 속도로서, 일반적으로 평균 보행속도는 매초 0.75 ~ 1.2m 정도이므로 교통공학에서는 1m/sec를 기준으로 신호 주기를 산출하는 예가 많다. 그러나 이것은 단독으로 자유로이 보행할 때를 기준으로 한 것이므로 용량 상태가 바뀌는 경우, 예를 들면, 횡단 보행자가 많아서 자유로운 횡단에 방해 받은 상태뿐만 아니라 연령, 성별, 보행 목적, 보행자의 건강 및 심리상태, 기상 조건에 따라서도 보행 속도가 다소 다르다.

또한, 대도시의 출퇴근 시간과 같이 이용객들이 바쁘게 움직이는 경우 및 화재와 같은 재해 발생시의 주행속도 등의 경우는 평상시의 이동속도 보다 빠른 특별한 조건으로 여객 이동 속도를 정할 수 있다.

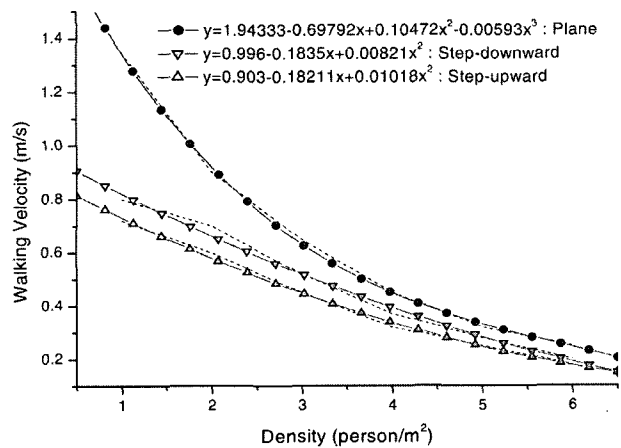


Fig. 1. 여객의 보행 속도

Fig. 1에 평지 및 계단에서의 평균 여객 보행 속도를 단위 면적당 인구 밀도에 따라 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 보행자의 평균 이동속도는 단위 면적당 인구 밀도에 따라 변하며, 보행 조건이 평지, 계단을 올라가는 경우와 내려가는 경우에 따라서도 다르게 주어짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 2에서와 같이 1m² 단위 면적당 최대 수용 인원을 6명으로 하면, 보행 속도 곡선상에서의 인구 밀도 유효 범위는 1 ≤ 보행자 ≤ 6에서 정하여 진다[7,8].

3. 여객 유동 해석 알고리즘

여객 유동 해석과 다상 유동 해석법 사이에는 앞서서도 언급하였듯이, 많은 유사성이 있으므로, 입자유동을 여객 유동 해석에 응용할 수 있다. 다상유동에서는 유체 유동 방정식에 의하여 계산 cell의 대표 유속이 정하여지면, 해당 cell에 있는 입자는 입자의 운동 방정식에 의하여 이동하게 된다. 또한, 특정 cell 내부의 입자의 개수는 입자의 체적분율에 의하여 개수가 제한된다.

이와 마찬가지로, 여객 유동 해석의 경우, 역사 건물의 평면 모형을 격자로 나누어 계산 cell을 구성하고 각각의 cell에 대한 방향 벡터를 부여한다. 방향벡터 부여 방법으로는 여객 유입구로부터 가장 가까이 있는 출구까지의 최단거리 동선 방향의 단위벡터로 방향을 정한다. 각각의 여객은 평지 및 계단에서의 단위 cell내의 인구 밀도에 따라 이동 속도가 다르게 계산되며, 이동하려는 방향의 cell내에 여객이 이미 포화상태에 있으면 정체되어 그 자리에 머무는 것으로 간주할 수 있다. 전보에서 개별 여객의 이동 계산에 사용되는 기본 알고리즘 중에서 개별 여객이 어떤 cell에 속하는지를 판단하는 계산 알고리즘, cell 내에서의 여객 수밀도 계산 알고리즘, cell_(i,j) 전까지의 총 여객수 계산 알고리즘, 각 cell에 있는 여객에 번호 부여 알고리즘 등이 개발되었다[9].

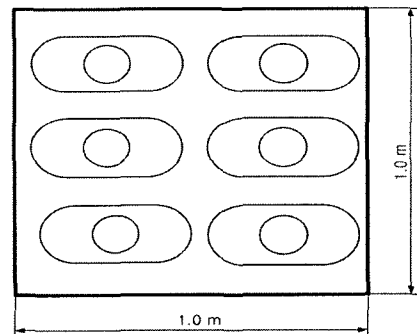


Fig. 2. 계산 Cell에서의 여객 밀도

본 연구에서는 여객 이동에 필요한 potential map과 각 셀의 주방향 벡터 설정 방법, 주방향셀에 이미 여객이 있을 경우에 부차적인 방향 찾기 알고리즘 등을 개발하였다. 계산 영역 내부에 벽과 같은 장애물이 있는 임의의 건축물 내부 모델을 Fig. 3과 같이 Grid로 분할하고, 유동해석에서 입출구 조건을 부여하는 것과 같이 하단부에 출구를, 상단부 2곳에 입구를 설정하여 여객의 유출입 조건을 부여한다. 포텐셜 맵의 기본 개념은 출구 셀의 포텐셜 값을 입력 조건에서 1로 부여하면, 주변 셀들의 포텐셜 값들을 2, 3, 4...로 순차적으로 높여가는 것이다. 그 결과 Fig. 3과 같이 계산영역 내부의 각 셀에 대하여 포텐셜 값을 부여할 수 있다. 각각의 여객은 현재 위치한 셀의 포텐셜 값보다 더 작은 포텐셜 값을 가진 셀을 찾아서 이동시키며, 이동하려는 셀에 이미 다른 여객이 존재하는 경우는 같은 포텐셜 값을 가진 셀로 이

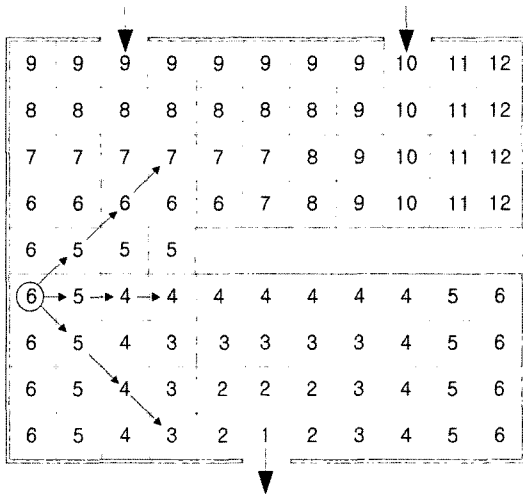


Fig. 3. 포텐셜 맵

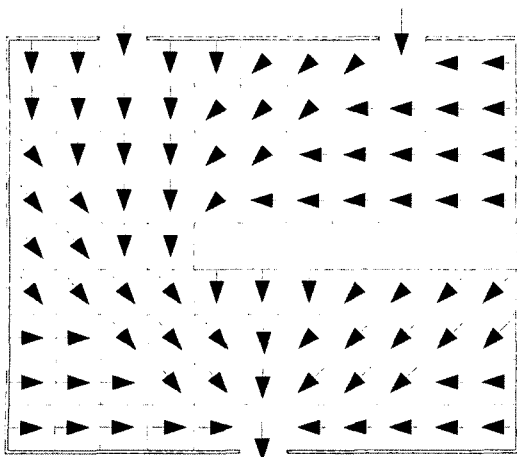


Fig. 4. 셀의 방향 벡터

동한다. Fig. 3에서 보는바와 같이 포텐셜 값 6을 가진 셀의 경우, 1차적으로 주변 셀 중에서 작은 값을 가진 셀을 찾으며, 포텐셜 값 5를 가진 셀이 3개 존재한다. 이러한 경우에는, 각각 그 다음 셀의 포텐셜 값을 비교하여 주방향벡터를 설정한다. 즉, 우하측 방향의 셀들은 5, 4, 3의 값을 가지며, 우측 방향의 셀들은 5, 4, 4를, 우상측 방향의 경우는 5, 6, 7로서, 예제의 셀은 우하측 방향으로 주방향 벡터를 가진다.

주방향의 셀에 이미 여객이 있을 경우에는 2차 주방향 셀을 찾도록 하여야 하며, Fig. 3과 같은 경우, 1차 주방향인 우하측이므로 2차 주방향은 가능한 한 주방향과 인접한 방향, 즉, 우측 또는 하측 방향에서 포텐셜 값이 작은 셀을 찾도록 한다. 그림에서 우측 방향의 포텐셜 값들이 하측보다 작으므로 2차 주방향인 된다. 만약, 2차 주방향 셀에도 여객이 존재하면 같은 방법으로 3차, 4차 주방향을 구하며, 이러한 반복계산은 주방향보다 후퇴하는 방향전까지 시행한다. 이 절차를 거치고도 다음 이동할 방향을 찾지 못할 경우에는 여객이 그 자리에 머무는 것으로 간주한다.

4. 예제 해석 결과

본 연구에서 개발된 여객 유동 해석 프로그램의 유효성을 검토하기 위하여, 지하철 역 건물에서 예상할 수 있는 기본적인 모델들을 기존의 철도역 평면도로부터 작성하여 해석하였다. Fig. 5와 같은 전형적인 지하철 역의 평면도에서 알 수 있듯이 기본모델은 지하 2층의 열차 승강장에서 지하 1층으로 올라가는 부분, 지하 1층의 복잡한 상가 부분, 개찰구 부분으로 채택하였다.

모델 A의 경우, 전동차 출입문으로부터 여객들이 나와 연결통로 또는 위층의 계단출입구로 나가는 경우를 가정한 것이며, 모델 B는 복수의 개찰구를 나온 여객들이 지하역 내부에 있는 각종 시설물을 통과하는 경우를 가정한 모델이다.

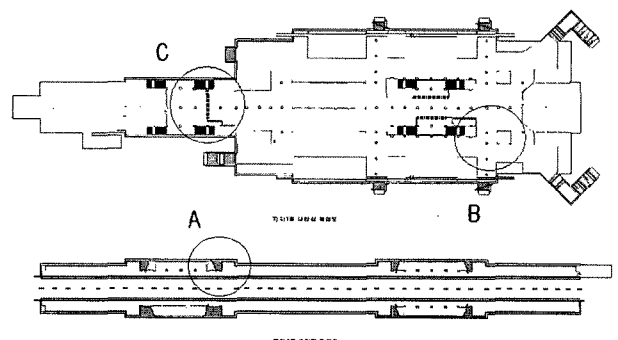


Fig. 5. 강남역 지하 역사의 평면도

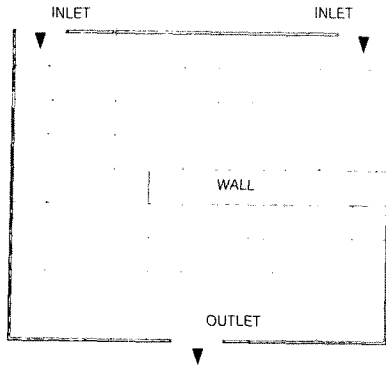


Fig. 6. 계산 모델 A

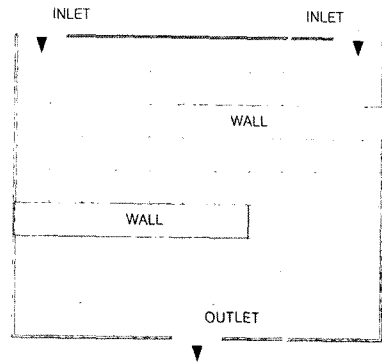
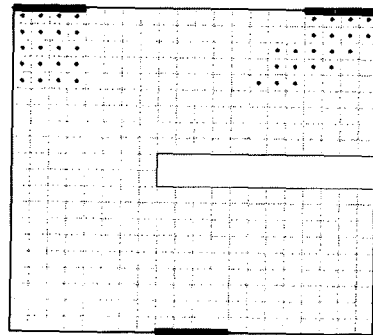
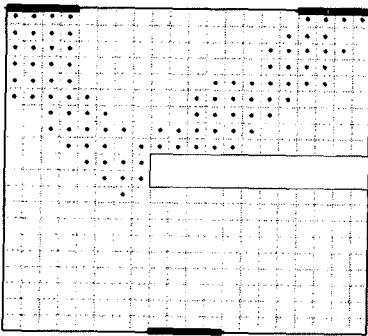


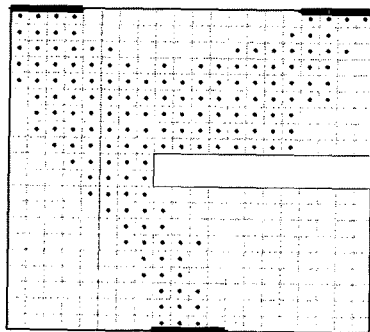
Fig. 8. 계산 모델 B



(a) 5sec

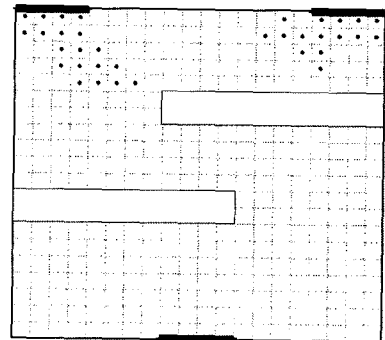


(b) 10sec

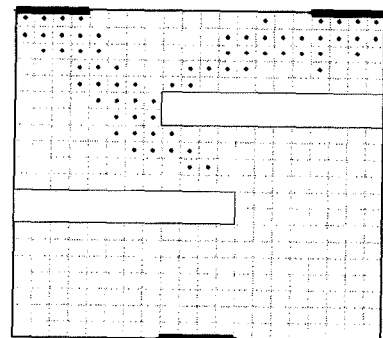


(c) 20sec

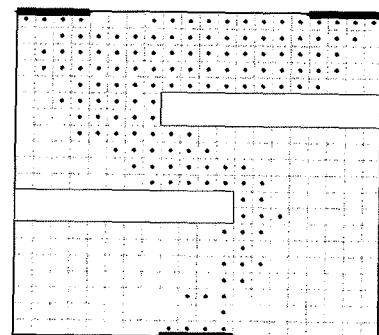
Fig. 7. A 모델에 대한 해석 결과



(a) 5sec



(b) 10sec



(c) 20sec

Fig. 9. B 모델에 대한 해석 결과

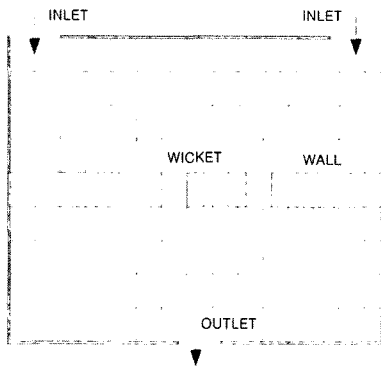
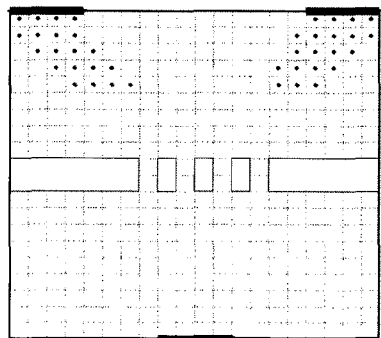
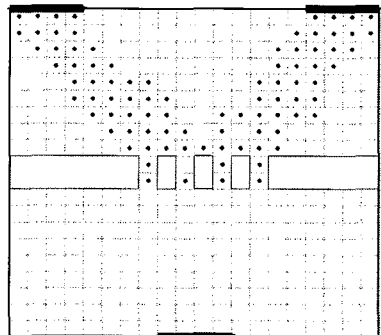


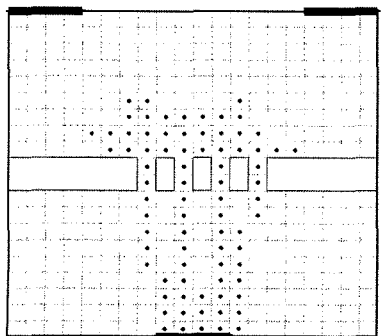
Fig. 10. 계산 모델 C



(a) 5sec



(b) 10sec



(c) 20sec

Fig. 11. C 모델에 대한 해석 결과

모델 C의 경우는 지하 2층의 계단에서 올라온 여객들이 개찰구를 통과하여 이동하는 경우를 가정한 모델이다.

각 모델의 계산 영역은 가로×세로 10×10m이며, 각각의 셀은 0.5×0.5m로 구성하여 1개의 계산 셀에는 1명의 여객만이 점유하는 것으로 하였다.

입구 셀에서 단위시간당 여객들이 1명씩 유입되며, 출구 셀에서 유출된다. 계산 시간은 여객의 정상시의 평균 보행속도가 $V_{ave}=1.0\sim 1.2\text{m/s}$ 이고, 셀의 크기가 $\Delta L=0.5\text{m}$ 이므로, 보행속도의 하한치를 기준으로 $\Delta t = \Delta L / V_{ave} = 0.5\text{sec}$ 로 하였다. 화재 및 피난과 같은 긴급 상황의 경우는 이동속도가 더 빨라지므로 단위 계산 시간의 크기는 이에 반비례하여 작아진다.

모델 A, B의 경우는 입구 셀에서 계속 여객이 유입되는 경우를 가정하여 해석한 경우이며, 모델 C는 일정시간 동안만 여객이 유입되는 경우를 가정한 것이다. 각각의 모델에 대한 해석 결과를 Fig. 6~Fig. 11에 나타내었다. 모델 A, B의 경우, 여객이 유입되는 면적이 유출되는 면적의 2배에 해당되는데다 계산 시간 동안 계속 여객이 유입되므로 입구의 혼잡도가 증가됨을 알 수 있으며, 모델 C의 경우는 일정 시간 이후는 여객이 유입되지 않으므로 건물내부로 유입된 여객들은 시간이 경과함에 따라 점진적으로 유출된다. 또한, 좌우 유입구로부터 개찰구까지의 거리 차이로 인하여 일정 시간 경과후의 좌우 개찰구 근방에 남아 있는 여객 수에도 차이가 남을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 前報 1서 개발한 DEM에 기초한 여객 유동 해석 기본 알고리즘인 개별 여객이 어떤 cell에 속하는지를 판단하는 계산 알고리즘, cell 내에서의 여객 수밀도 계산 알고리즘, cell[i][j] 전까지의 총 여객수 계산 알고리즘, 각 cell에 있는 여객들에 번호 부여 알고리즘에 이어서 여객 이동에 필요한 주방향 벡터 선정 방법, 주방향 벡터로 진행할 수 없을 경우의 후순위 이동방향 벡터를 찾는 알고리즘을 추가로 개발하였다. 그 외에도 인구 밀도에 따른 이동속도 결정, 포텐셜이 낮은 셀의 여객부터 이동시키는 알고리즘, 반복 루프에서 sweep 방향을 순번으로 바꾸는 알고리즘 등을 개발하여 적용함으로써 계산 결과의 유용성 및 재현성을 높였다. 이를 이용하여 다양한 형태로 구성된 철도 역사의 기본 모델들에 대하여 여객 유동을 정량적 및 정성적으로 해석할 수 있었으며, 실제 상황과 유사한 현상을 재현할 수 있었다. 이러한 결과들은 철도역사 시설에 대한 계획 및 설계시, 철도역을 이용하는 여객 유동이라는 소프트웨어적 요

소로 반영할 수 있을 것으로 사료된다. 향후에는 지하철 역 건물의 각 층별로 종합한 전체 모델 및 1~2층을 연결한 복층구조, 승강 및 하강 여객 집단을 동시에 취급하는 여객유동 해석에 대하여 적용할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 건설기술기반구축사업인 “철도 역사에서의 여객 유동 평가 프로그램 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992), “A cellular automation model for freeway traffic”, J. Phys. I France, Vol.2, pp.222-2229.
2. Ilachinski, A. (2001), “Cellular Automata : A Discrete Universe”, World Scientific Publishing Co.
3. Simulex (2004). On-line User's manual.
4. Building EXODUS Ver.4.0 (2004), User Guide and Technical Manual.
5. 森川敬信 (1979), “流體-固體二相流-空氣輸送と水力輸送,” 日刊工業新聞社(in Japanese).
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. 脇田 康隆 외 4人. (1998), “鐵道とコンピュータ”, 共立出版(in Japanese).
8. Takagi, R., Goodman, C. J. and Roberts, C. (2002), “Modelling Aerodynamics of High Speed railway Train”, Progress in Aerospace Science, Vol.38, pp.469-514.
9. 남성원 (2005), “DEM에 기초한 여객 유동 해석 알고리즘 개발”, 한국철도학회논문집, 제8권, 제4호, pp.337-341.