

## DEM에 기초한 여객 유동 해석 알고리즘 개발

### Development of Algorithm for Passenger Flow Analysis based on DEM

남성원\*  
Seong-Won Nam

#### Abstract

Algorithm for passenger flow analysis based on DEM(Discrete Element Method) is newly developed. In the new algorithm, there are many similarity between multi phase flow and passenger flow. The velocity component of 1st phase corresponds to the direction vector of cell, each particle to each passenger, volume fraction to population density and the momentum equation of particle to the walking velocity equation of passenger, 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 simple railway station model is conducted. The results for passenger flow in the model station are satisfying qualitatively and quantitatively.

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

#### 1. 서론

과거의 철도 역사는 주로 철도 여행객들만의 승하차용으로 이용되는 것으로 인식되어 왔으나, 최근에는 대도시의 철도 역사의 복합화, 대형화로 인하여 철도역은 철도 영업 및 서비스 거점으로서의 중요한 위치 뿐만 아니라 지역을 대표하는 도시 시설중 하나로 여러 가지 부가 기능을 담당하는 장소로 바뀌고 있다. 일반적으로 역사가 복합화 대형화되면, 역사가 갖추어야 할 기본적인 역할 즉, 안전하고 이용하기 편리하며 쾌적한 역사를 만들기 위한 여러 가지 조건이 요구된다.

특히, 도시 철도 일부 환승역의 경우, 복수의 철도 노선이 교차하여 그 구조가 심층 지하화되고 여객 이동 동선이 길어져 화재와 같은 재해 발생시에는 이용객들의 피난 및 안전 확보가 철도 역사 구조 설계의 주요 파라미터로 떠올랐다.

이와 같이 복잡 다양화되는 철도 역사의 여러 가지 요구조건을 만족시키기 위하여는 건축물 설계의 하드웨어적

요소 뿐만아니라 역사를 이용하는 사람들의 이동 형태를 동적으로 해석하여 역사의 시설 계획에 반영하는 여객 유동 해석과 같은 소프트웨어적 요소도 고려되어야 한다.

여객 유동 해석용 소프트웨어로 Simulex[1]나 Exodus[2]가 개발되어 일부에서 사용되고 있으나 이들 소프트웨어는 여객유동에 관한 이론적 배경이 불분명한 점이 있으며, 다른 상용 프로그램과 마찬가지로 사용자들의 User Input 기능과 후처리 그래픽 기능만 있을뿐 핵심코드는 공개하지 않고, 게다가 사용자가 다양한 특별 상황에 맞게 프로그램을 개조할 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 각각의 여객 유동 해석 목적에 따라 자유로이 환경 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[3-6]을 이용한 여객 유동 해석 알고리즘을 개발하였다.

#### 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

\* 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 차량기계연구본부  
E-mail : swnam@krii.re.kr  
TEL : (031)460-5244 FAX : (031)460-5279

주기를 산출하는 예가 많다. 그러나 이것은 단독으로 자유로이 보행할 때를 기준으로 한 것이므로 용량 상태가 바뀌는 경우, 예를들면, 횡단 보행자가 많아서 자유로운 횡단에 방해받을 상태 뿐만아니라 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. 1에 평지 및 계단에서의 평균 여객 보행속도를 단위 면적당 인구 밀도에 따라 나타내었다[7]. 그림에서 알 수 있듯이, 보행자의 평균 이동속도는 단위면적당 인구밀도에 따라 변하며, 보행 조건이 평지, 계단을 올라가는 경우와 내려가는 경우에 따라서도 다르게 주어짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 2 에서와 같이 1m<sup>2</sup> 단위면적당 최대 수용 인원을 6명으로 하면, 보행속도 곡선상에서의 인구 밀도 유효 범위는 1≤ 보행자≤6에서 정하여 진다[8].

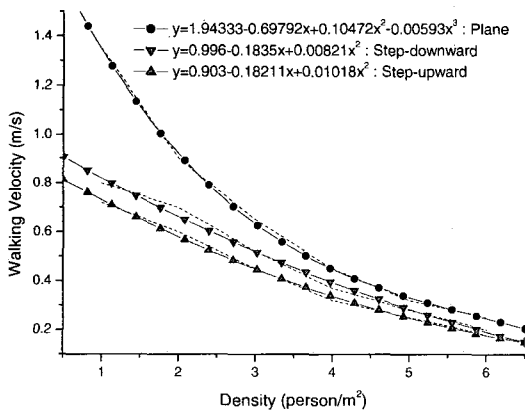


Fig. 1. 여객의 보행 속도

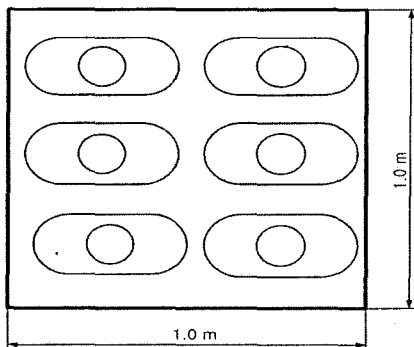


Fig. 2. 계산 Cell에서의 여객 밀도

### 3. 여객 유동 해석 알고리즘

여객 유동 해석과 다상 유동 해석법 사이에는 앞서도 언급하였듯이, 많은 유사성이 있으므로, 기존에 잘 발달된 다상 유동 해석법을 응용하여 여객 유동 해석에 응용할 수 있다. Table 1에 각각의 항목에 대한 비교표를 나타내었다.

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 Fig. 1에 있는 보행속도로 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.

Fig. 3에 여객 유동 해석을 위한 Flow Chart를 나타내었다. 각 단계별 구성은 다음과 같다.

- (1) 해석 대상인 역사의 도면에 기초하여 각 층의 평면을 단위 면적의 cell로 격자를 구성한다. 각각의 cell은 특성별로 평지cell, 계단cell 및 벽면으로 나누고, 계단 cell의 경우도 계단을 오르는 경우와 계단을 내려가는 cell로 구분한다.
- (2) 계산 영역내의 각 cell에 대하여 여객 이동 방향 벡터를 설정한다. 평지 cell의 경우는 여객 유입구에서 유출구로의 최단 이동 동선 방향으로 정하여지며, 계단 cell의 경우, 계단을 올라가는 경우는 위층 방향으로 진행하게 설정한다. 벽면cell의 경우 여객이 이동하지 못하는 것으로 한다.
- (3) 계산 시간을  $t=t+dt$ 로 진행시킨다

Table 1. 다상유동과 여객유동의 유사성

항 목	여객 유동	혼상 유동
Carrier	방향 벡터	母 유체 유동
Mover	여객 개체	입자
Density	인구 밀도	Volume Fraction
Velocity	보행 속도	입자 운동방정식

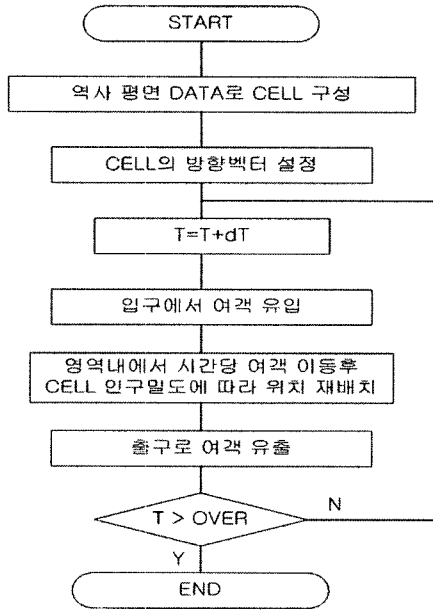


Fig. 3. 해석 프로차트

- (4) 여객 유동 입구, 즉, 승하차장의 경우는 차량 출입문, concourse의 경우는 아래층으로부터 올라오는 계단으로 여객이 계산 영역내로 유입되며, 정해진 시간 간격  $dt$  동안에 각각의 cell 조건에 맞게 여객을 이동시킨다.
- (5) 이동한 여객은 새로이 진행한 cell 내의 인구밀도가 한 계값 이하일 경우, 해당 cell로 이동한 것으로 간주하며, 한계값 이상일 경우, 원래의 위치에 정제된 것으로 간주하여 시간  $t$ 에서의 위치에 머무르게 한다.
- (6) 출구 cell에 도달한 여객은 유출시킨다.
- (7) 시간  $t$ 가 정해진 계산시간보다 큰 지 여부를 판정하여 이하일 경우, 다음 시간 단계로 진행하며, 그 이상일 경우 계산을 종료한다.

### 3.1 개별 여객이 어떤 cell에 속하는지를 판단하는 계산 알고리즘

Fig. 4에 계산에 사용되는 cell 구조를 나타내었다. 계산 영역내에 있는 총 여객수를  $nm$ 개, 여객  $m$ 의  $x, y$ 방향 셀을 각각  $icel[m]$ ,  $jcel[m]$ , 그리고,  $x, y$ 방향 좌표를  $xp[m]$ ,  $yp[m]$ 이라 하면, 다음과 같은 방법으로 각각의 위치 좌표에 따라 속하는 cell을 정할 수 있다. 실제 전산해석에서 알고리즘을 이용할 때에는 프로그램을 통하여 구현되므로 프로그래밍 언어중 하나인 C++ 로 source code를 나타내었다.

또한, 프로그램에 사용되는 변수들을 정의한 계산 영역내의 cell 구조와 번호 및 계산 격자를 Fig. 4에 나타내었다.

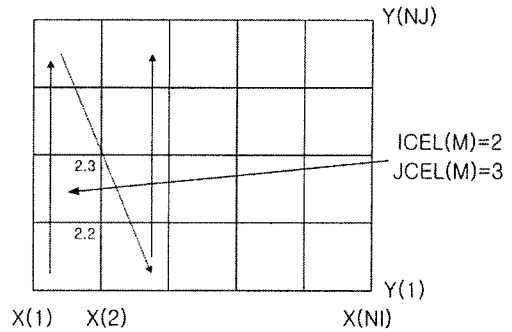


Fig. 4. Cell 구조

```

for ( m=1; m<=nm; m++ ) {
    for ( j=2; j<=nj; j++ ) {
        if ( yp[m] <= y[j] )
            break ;
    }
    jcel[m]=j;
    for ( i=2; i<=ni; i++ ) {
        if ( xp[m] <= x[i] )
            break ;
    }
    icel[m]=i;
}
    
```

### 3.2 cell내에서의 여객 수밀도 계산 알고리즘

cell[i][j] 내에 여객 수밀도를 계산하는 것은 다음과같은 알고리즘에 따라 산정할 수 있다. 여기서,  $np[i][j]$ 는 cell[i][j]내의 여객수를 나타내는 변수명이다.

```

for ( i=2; i<=ni; i++ )
    for ( j=2; j<=nj; j++ )
        np[i][j]=0;
for ( m=1; m<=nm; m++ ) {
    for ( i=2; i<=ni; i++ ) {
        if ( xp[m] <= x[i] )
            break;
    }
    icel[m]=i;
    for ( j=2; j<=nj; j++ ) {
        if ( yp[m] <= y[j] )
            break;
    }
}
    
```

```

    jcel[m]=j;
    np[i][j]++;
}

```

### 3.3 cell[i][j] 전까지의 총 여객수 계산 알고리즘

Fig. 4에서와 같이 cell의 순번을 (2,2) (2,3) (2,4)... (3,2) (3,3) (3,4) 와 같이 정하면 cell[i][j] 이전 cell까지의 총 여객수는 다음과 같이 정할 수 있다. 여기서, 변수 npb[i][j] 는 cell[i][j] 전 cell까지의 총 여객수이다.

```

n=0;
for ( i=2; i<=ni; i++ ) {
    for ( j=2; j<=nj; j++ ) {
        npb[i][j]=0;
        n += np[i][j];
        np[i][j]=0;
    }
}

```

### 3.4 각 cell에 있는 여객들에 번호 부여 알고리즘

Fig. 4에서 cell[2][2]에 2명, cell[2][3]에 1명의 여객이 있다고 가정하면 다음과 같이 각각의 여객에 대하여 일련번호를 부여할 수 있다. 각각의 계산 여객에 일련번호를 부여하는 것은 계산 영역내의 총 여객수 nm을 계산하기 위함이며, 유입구로 신규로 들어오는 여객에 대한 번호 부여와 유출구로 나가는 여객의 번호 박탈 등의 계산에 사용된다. 여기서 lcr(k)는 여객 m에 부여되는 일련 번호이다.

```

for ( m=1; m<=nm; m++ ) {
    i=icel[m];
    j=jcel[m];
    np[i][j]++;
    k=npb[i][j]+np[i][j];
    lcr[k]=m;
}

```

## 4. 예제 해석 결과

위에서 설명한 여객 이동 해석 알고리즘에 기초하여 Fig. 5와 같은 간단한 철도역 건물을 대상으로 시뮬레이션을 하였다. 이와 같은 모델은 지하 2층의 지하철 플랫폼에 내린 여객들이 계단을 통하여 지하 1층으로 올라와 개찰구를 통하여 나가는 것을 가정한 모델이다. 알고리즘의 검증은 위

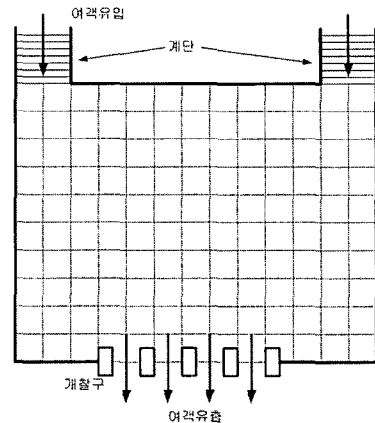


Fig. 5. 계산 모델

하여 설정한 간이 모델은, 계단은 양측의 2곳, 개찰구는 중앙에 위치하는 것으로 구성하였다. 계산 영역은 계단에서 올라오는 부분은 Inlet, 개찰구를 나가는 부분은 outlet, 그 외의 부분은 벽면으로 여객이 이동할 수 없는 조건이다. 그 외에 계산 영역은 가로×세로 13×10m로 각각의 cell은 1×1m로 구성하였다.

계단 입구에서 여객들은 단위 cell내의 인구 밀도에 따라 Fig. 1에 나타난 곡선과 같은 보행속도로 유입되므로 좌우의 계단 입구 4개의 cell에서는 4~6명/sec의 여객이 이동하는 것으로 입구조건을 정할 수 있다.

본 모델에 대한 계산 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 결과 그림에서 알 수 있듯이 계산 시간이 진행됨에 따라 (1sec, 5sec, 10sec, 15sec) 유입된 여객수가 점점 증가하며 계산 시작 후 약 10sec에 선두 여객이 출구 근처에 도달하며, 그 이후에는 개찰구를 통하여 여객이 빠져나가 (d)15sec와 같은 정상 이동 형태가 된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 DEM에 기초한 여객 이동 해석 알고리즘을 개발하였다. 입자를 함유한 다상유동 해석에 널리 사용되는 DEM 해석 기법을 건물 내부 또는 다중 이용 시설내의 여객 이동 해석에 적용하였다. 다상 유동에서는 입자가 함유되는 한계가 체적분율에 의하여 정하여 지지만, 여객 이동에서는 단위 면적당 인구밀도에 의하여 결정되며,

입자 운동방정식은 보행속도로, 개개의 입자는 각각의 여객으로, 유체 유동은 방향벡터로 상사시켜 알고리즘을 개발하였다.

또한, 여객 이동 해석에 핵심이 되는 알고리즘으로서 개별 여객이 어떤 cell에 속하는지를 판단하는 계산 알고리즘,

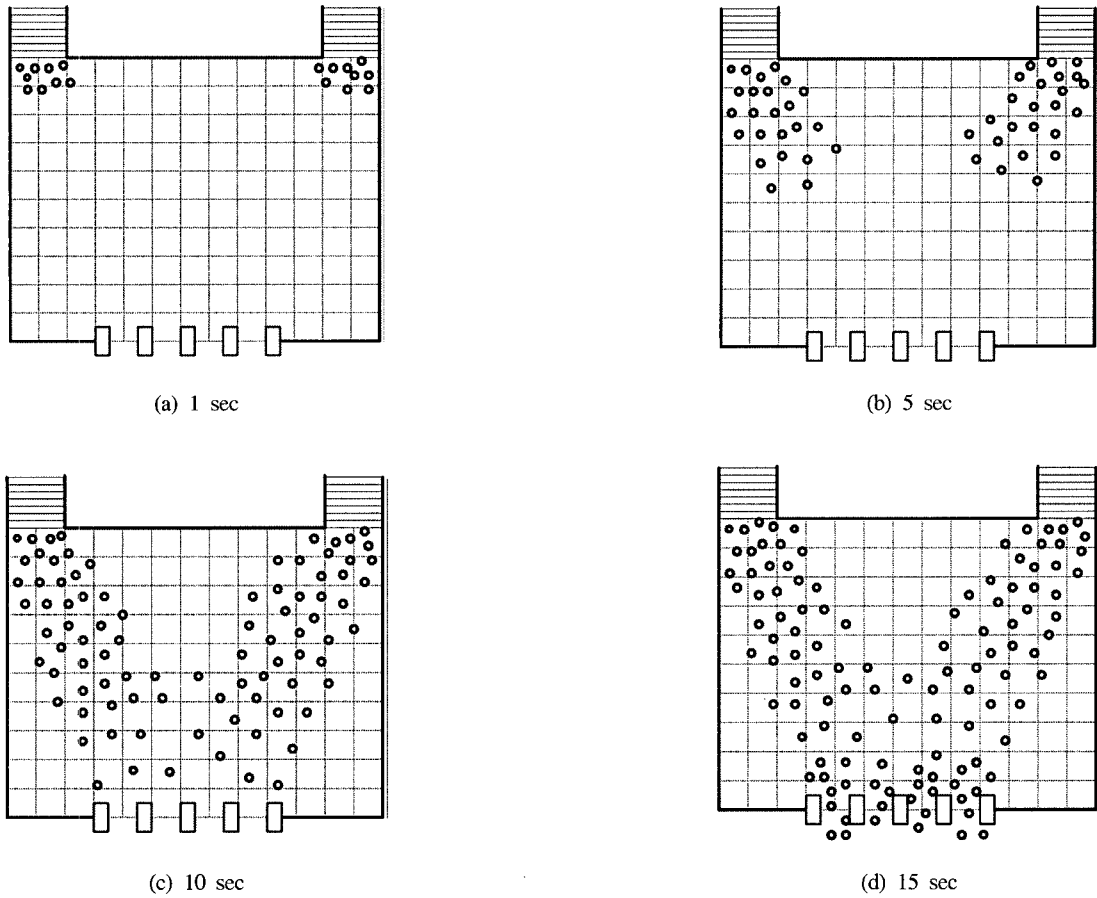


Fig. 6. 계산 결과

cell 내에서의 여객 수밀도 계산 알고리즘, cell[i][j] 전까지의 총 여객수 계산 알고리즘, 각 cell에 있는 여객들에 번호 부여 알고리즘을 개발하였다. 개발된 해석 기법을 적용하여 예제로서 간단한 철도역 건물 모델내에서의 여객 이동을 시뮬레이션 하였으며, 양호한 계산 결과를 얻었다. 향후에는 복층 구조 및 다방향 여객 모델에 대한 기법을 개발할 예정이다.

### 참고 문헌

1. Simulex (2004). On-line User's manual
2. Building EXODUS Ver.4.0 (2004) User Guide and Technical Manual

3. Nam, S.W., Nishiyama, H. and kamiyama, S., (1996). "Numerical Analysis on Plasma Spraying in a DC-RF Hybrid Plasma Reactor," *Int. J. JSME*, Vol.39, No.1, pp.134-140.
4. Nanbu, K., (1992). "Stochastic Solution Method of the Boltzmann Equation," *The memoirs of the Institute of Fluid Science*, Vol.3, pp.47-93.
5. Bird, G. A., (1976) "Molecular Gas Dynamics," Clarendon Press.
6. FLUENT Ver.6.1 (2004). User's Guide Vol.1
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