

열차 주행 시 터널 벽면에서의 속도장 및 압력분포 해석

Velocity and pressure fields on tunnel wall under subway train passing

배현우*, 성재용†

Hyunwoo Bae*, Jaeyong Sung†

Abstract When the train passes through a tunnel, high velocity and strong pressure fields are formed on the tunnel wall. These effects generate vibration, noise and make dust transported to platform. And then, the effects cause inconvenience to passengers. In this study, for improving vibration and noise problem, velocity and pressure fields on the tunnel wall during passing through tunnel are solved using Ansys-Fluent software. Flow in the tunnel is computed by using two-dimensional, compressible, turbulence model. As a turbulence model, RNG k- ϵ model is applied. To implement the train motion, sliding meshes are used. As a result, there forms strong flow velocity more than twice the train speed accompanying with strong negative pressure by the subway train passing.

초 록 열차가 터널 내부에서 주행할 때, 터널 벽면에 높은 속도를 가지는 유동장과 강한 압력파가 발생하게 된다. 이는 진동 및 소음을 발생시키고, 터널 내에서 발생하는 먼지를 플랫폼으로 이동시켜 승객들에게 불편을 유발한다. 본 연구에서는 진동 및 소음문제를 개선하고자 터널에서 열차가 주행 시 벽면에서 생기는 속도장 및 압력분포를 해석하였다. 터널 내 유동은 2차원 압축성 난류 모델을 이용하여 수치해석 하였다. 난류모델로는 RNG모델을 사용하였고, 움직이는 열차에는 sliding method와 layering method를 적용하였다. 그 결과 터널내 열차 주행에 의해 열차 속도의 2배 이상의 유체 속도장이 벽면 근처에 형성되었으며, 강한 음압이 나타남을 알 수 있었다.

주요어 : 압축성 유동, 난류모델, RNG k- ϵ model, sliding method, layering method,

1. 서 론

지하철 터널은 반밀폐된 공간으로, 열차 운행 시 발생하는 피스톤 효과(piston effect)로 발생하는 열차풍(train-induced wind)은 최대풍속이 7.2~100 m/s에 이른다. 이러한 열차풍은 터널 내에서 발생한 분진과 열량을 승강장 쪽으로 이동시킬 뿐 아니라 소음과 진동을 야기시켜 승객들에게 불편을 준다. 실제로 열차 운행중에 발생하는 소음을 개선하기 위한 방법으로 터널이나 지하철의 형상에 따른 유동장 해석이나 열차의 터널 진입시의 압력분포 해석 등의 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 300 m/s 이상의 고속으로 운행하는 KTX나 고속 열차에

† 교신저자: 서울과학기술대학교 공과대학 기계자동차공학과(jysung@seoultech.ac.kr)

* 서울과학기술대학교 대학원 기계공학과

대한 비해 저속이지만 80dB~100dB 정도의 비교적 큰 소음을 유발하는 지하철의 유동에 대한 분석 및 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다[1-3].

이에 본 연구에서는 지하철 운전시 터널 벽면에서의 속도장 및 압력분포를 Ansys Fluent를 이용하여 수치해석을 수행하고 분석하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배방정식

터널 근처에서의 유동해석은 2차원의 압축성 유동으로 가정하였고, RNG k-ε 난류모델을 적용하여 해석하였다. RNG k-ε 모델은 Yakhot과 Orszag [4]가 Renormalization Group(RNG) 방법을 이용해 개발한 난류 해석 방정식으로, standard k-ε 모델과 비슷하지만 평균 전단력(mean shear)과 난류 소실(turbulence dissipation)간의 관계를 나타내는 새로운 형태의 소산율(dissipation rate) ε 을 포함하고 있다. 이 모델은 난류현상 중 스윙이 있는 경우뿐만 아니라 낮은 레이놀즈를 갖는 경우에 대한 해석에 있어서도 높은 정확도를 나타낸다. 본 연구에 적용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 G_k 는 속도구배에 의한 난류운동에너지, G_b 는 부력에 의한 난류운동에너지를 나타내며 α_k 와 α_ε 는 각각 k와 ε에 대한 프란틀 넘버의 역수를 나타낸다.

2.2 수치해석

2.2.1 지하철 모델

시뮬레이션에 사용된 지하철과 터널은 각각 현재 운행중인 서울 매트로의 지하철과 방배-서초간 터널과 비슷한 형상으로 하였다. 지하철은 사각형으로 단순화하여 폭은 3.4m이며 길이는 150m이며, 터널은 4.8m로 지하철과 벽과의 거리는 0.7m이다. 지하철의 속도는 100 km/h로 가정하고 가속운전은 고려하지 않았다.

2.2.2 슬라이딩 격자

Fluent상에서 터널에 따라 열차가 움직이게 하기 위하여 슬라이딩 격자 방법(sliding mesh method)을 적용하였다. 유동 영역은 고정된 영역인 stationary zone과 열차가 유동하는 moving zone으로 분리하였다(Fig. 1). Moving zone에 있는 interface zone은 해당영역이 슬라이딩 하는

기준이 되어 터널을 따라 열차가 움직이게 하는 역할을 한다.

이 때, 전철이 움직임에 따라 stationary zone과 moving zone의 격자가 어긋난 상태에서 각 격자에서 계산된 물리량이 경계면을 넘어가야 하는 상황이 발생한다. 이를 위해 슬라이딩 격자 기법에서는 특별한 방법이 사용된다. Fig. 2는 슬라이딩 기법에 대한 설명을 위한 간단한 격자이다. 두 개의 Interface zone은 A-B, B-C, C-D, E-F, F-G, G-H로 이루어져 있으며 이로 인한 교차점은 a-b, b-c, c-d 등으로 이루어져 있다. 계산에는 각각의 interface zone에서의 물리량 대신 교차점에서의 값을 이용하여 계산된다. IV 영역으로 물리량이 넘어오는 과정을 예로 들면, A-B와 B-C 면은 무시하고 b-c, c-d 영역의 정보를 이용하여 I과 II의 정보를 각각 IV로 전달하게 된다.

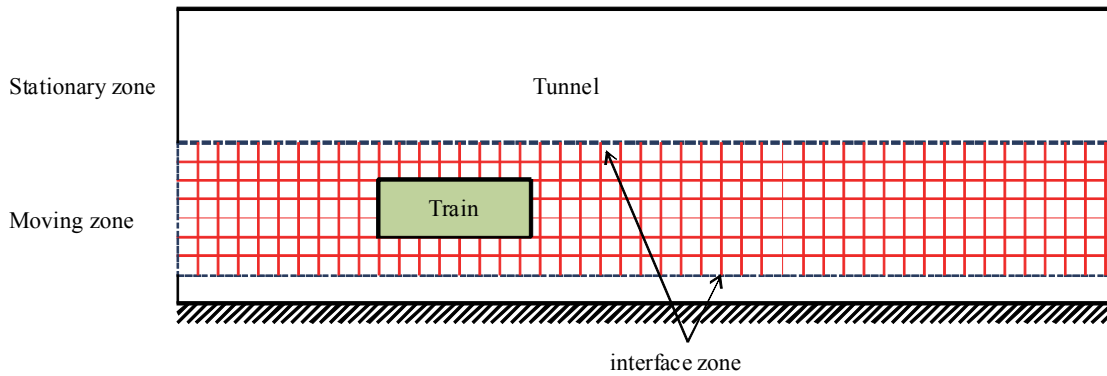


Fig. 1 Schematic of simulation domain

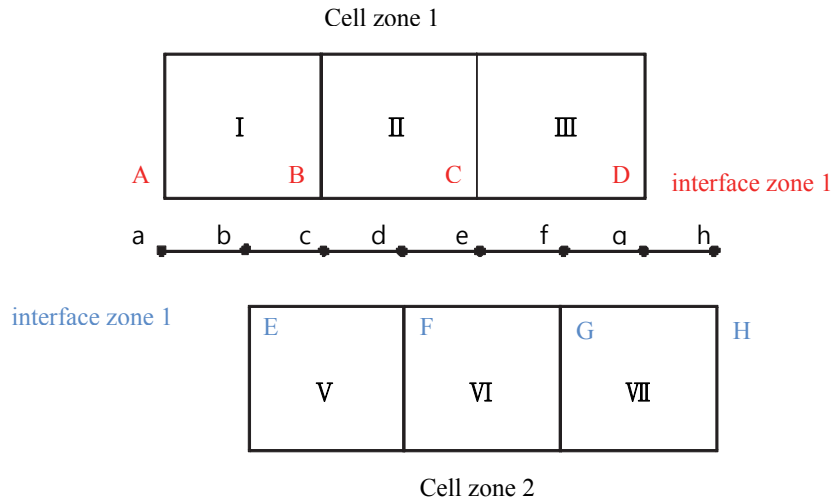


Fig. 2 Schematic diagram of sliding mesh method

3. 시뮬레이션 결과

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 열차가 터널 내에서 유동중일 때 터널 벽면에서의 압력분포와 속도장에 대한 시뮬레이션 결과이다. 열차가 이동함에 따라 터널 벽에서는 3000 Pa 이상의 강한 음압이 나타나는 것으로 확인 되었다. 또한 운행 중 벽면에서는 최대 100 m/s의 속도장이 나타남을 알 수 있다.

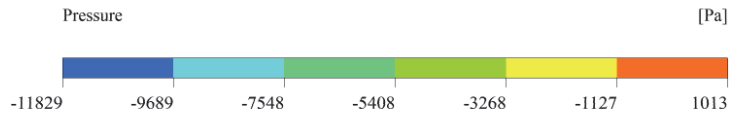


Fig. 3 Pressure distribution during passing through tunnel

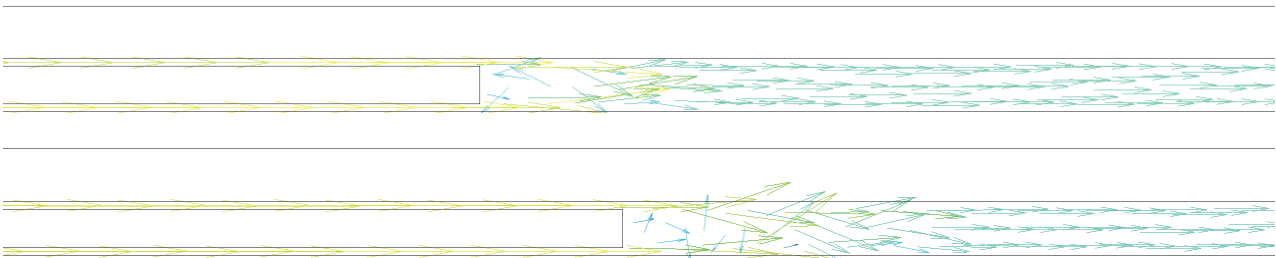
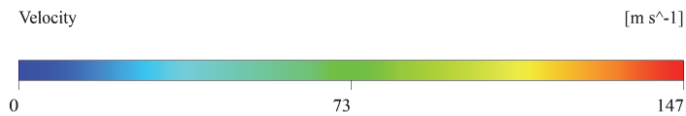


Fig. 4 Velocity fields during passing through tunnel

4. 결론

본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 지하철이 열차 내에서 유동중일 때의 벽면에서의 속도장 및 압력분포에 대한 분석을 하였다. 열차 유동방향으로의 압력은 그리 크지 않지만 열차 주변의 벽면에 가해지는 압력은 상당하였다. 또한, 열차 주변의 벽면에서의 유체 속도 또한 100 m/s로 굉장히 큰을 알 수 있었다. 이는 360 km/h에 해당하는 속도로 열차가 지나가는 영역은

순간적으로 유체가 음속의 속도에 이르게 된다. 이로 인하여 터널 내에서 비교적 느린 속도로 운행하는 데도 불구하고 큰 소음이 발생하게 된다.

후 기

본 연구는 환경부의 환경선진화기술개발사업에서 지원받았습니다.

참고문헌

- [1] T Ogawa, K Fujii (1997) Numerical investigation of three-dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel, *Computer & Fluids*, Vol. 26, No 6, pp 565-586.
- [2] KH. Im, OH Rho (1998) Numerical analysis of flowfield around high speed train, 4th KSME-JSME Fluids Eng Conference, pp 181-184.
- [3] Y Sakuma, M Suzuki, T Maeda (1998) Measurement of flow around a high-speed train, 4th KSME-JSME Fluids Eng Conference, pp 177-180.
- [4] V Yakot, SA Orszag (1986) Renormalization group analysis of turbulence. 1. Basic theory, *Journal of Scientific Computing*, Vol. 1, No. 1.