

# 지하철의 섬식 정거장에 설치된 스크린도어에 가해지는 열차풍압 해석

김 정 엽\*

## Analysis on the Train-wind Pressure applied to Screen Door in Island-type Platform of Subway

Jung-Yup Kim\*

**Key Words** : Screen Door(스크린도어), Train-wind Pressure(열차풍압), Numerical Analysis(수치해석), Subway(지하철)

### Abstract

The screen doors installed in the station of subway are subject to the train-wind pressure caused by the operation of trains. The train-wind pressure has to be correctly estimated for the design of safe structure of screen doors. As three-dimensional numerical flow analysis technology has been significantly developed, the analysis on the train-wind pressure with diverse variables such as train specifications, train speed, tunnel and station configurations, and blockage ratio can be effectively carried out with three-dimensional numerical method. In this study, computational analysis of train-induced wind in a subway tunnel employing the screen doors are carried out by using the three-dimensional numerical method with the model of the moving boundary for the run of trains. While the numerical analysis of train-wind pressure was applied on the one island-type station in the Seoul Subway Line 2, maximum pressure of 494 Pa was estimated on the screen door when two trains pass each other at the speed of 80km/h in the platform.

### 1. 서론

지하철은 반밀폐적 터널공간으로 화재발생시 안전확보에 취약하고 빈번한 열차운행으로 인한 열차풍과 분진, 고온의 기류에 의해 이용환경의 악화가 초래되고 있으며, 또한 승강장에서 추락사고가 지속적으로 발생하는 등, 승객의 안전과 편의 도모에 취약한 시설로 평가되고 있어, 지하철의 환경개선을 위한 기술개발이 절실히 요청되고 있다. 선진국의 경우 이러한 문제를 해결하기 위하여 능동적 개념의 설비시스템으로 스크린도어 시스템(Platform Screen Door System)을 설치, 운영하고 있으며 국내에서도 최근에 건설되는 지하철을 중심으로 도입이 활발히 진행중에 있다.

지하철에 설치된 스크린도어는 열차의 운행에 의해 발생하는 열차풍압을 받게되며 이러한 열차풍압의 올바른 예측을 통해 스크린도어의 안전구조설계를 수행할 수 있다. 한편 3차원 유동 수치해석기법이 발전함에 따라 열차제원, 운행속도, 터널·정거장 구조 및 Blockage ratio 등의 다양한 해석조건이 존재하는 열차풍압 분석은 3차원 수치적 해석방법에 의해 효과적으로 수행될 수 있다.

본 연구에서는 열차이동효과를 반영할 수 있는 수치모델을 바탕으로 3차원 수치해석방법을 통해 지하철의 열차풍 유동을 해석하였다. 섬식 정거장에 설치된 스크린도어에 가해지는 열차풍압을 예측하기 위하여 서울지하철 2호선의 한 역사를 대상으로 두 열차가 역사에서 무정차 교행하였을 경우에 대해 터널내 유동장을 수치해석적으로 분석하였으며, 시간에 따른 스크린도

어에서의 압력변화치를 도출하였다.

### 2. 열차이동 수치모델

지하철 유동에 대한 3차원 수치해석은 유동장에서 이동하는 고체경계(Moving boundary of immersed solid)의 해석방안개발이 핵심사항으로서, 경제성과 정확성 면에서 해석대상인 지하철 환경에 효과적으로 적용할 수 있는 기법의 개발이 필요하다. 이동하는 고체경계에 대한 수치해석방안으로서 크게 고체를 포함하는 격자를 전체 격자계에서 이동시키는 이동격자(Moving grid)기법과 격자의 이동이나 변형이 없이 고체영역 격자의 성질을 변화시켜 고체이동효과를 반영하는 고정격자(Fixed grid)기법이 개발되어서 활용되고 있다. 이전의 연구[1]에서는 각 격자 기법의 종류와 특징을 검토하였으며, 이를 바탕으로 지하철의 열차이동에 대한 수치기법으로 적합하다고 판단되는 고정격자 기법 중 SIM(Sharp Interface Method) 기법[2,3]을 적용하였다. 또한 1/20 scale 규모의 터널 축소모형시험장치를 제작하여 열차의 이동에 따른 유동특성을 측정하고, 수치해석기법의 적용성을 검증하였다. 이에 대하여 개략적으로 기술하면 다음과 같다.

Fig.1은 축소모형 시험장치의 개략도를 보여주고 있다. 축소모형 시험장치는 실제의 모델이 되는 터널에 대하여 1/20 scale로 축소하여 제작되었다. 아크릴로 제작된 터널의 총길이는 39m 이고 터널과 열차의 Blockage Ratio는 0.67이다. 열차는 전단과 후단에 강선으로 연결되어서 가이드레일을 따라 전후로 이동하게 되며, 모터의 회전수를 제어하여 열차의 운행속도를 변경한다. 열차의 운행거리는 33m이다. 그림에서와 같이 터널 입출구에 속도센서를 설치하였고 터널 중간부에 열차의 운행시 시간에

\* 한국건설기술연구원, jykim1@kict.re.kr

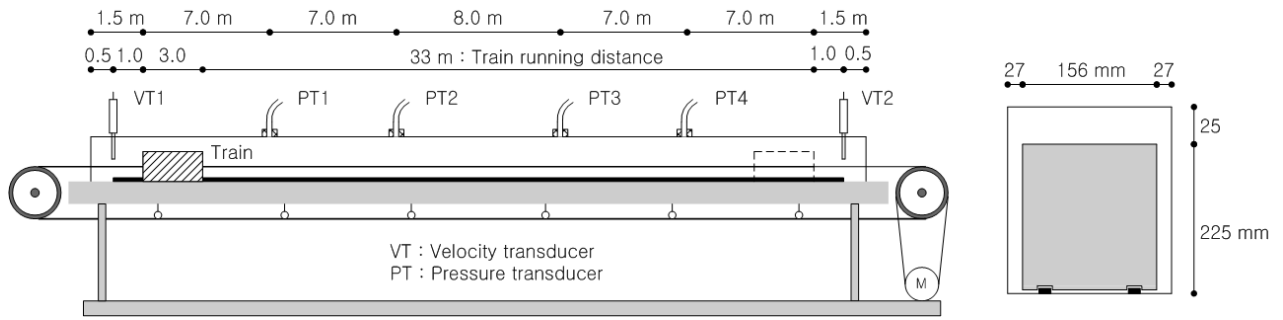


Fig. 1 Schematic diagram of experiment layout.

따른 압력변화를 측정하고자 총 4개의 압력센서를 설치하였다. 속도와 압력 모두 0.1초 간격으로 변화량을 측정하였다. Fig.2는 축소모형실험장치의 실제모습을 보여주고 있다. Fig.3은 실험을 수행한 열차운행조건을 도시하고 있으며, 이때 최대 열차속도 ( $U_{T\_MAX}$ )는 3.0m/s이다. 연구에서는 격자계의 이동이나 변형이 없이 열차의 이동을 모델링할 수 있는 SIM 기법을 도입하였다. SIM 기법에서는 전체계산영역이 Sharp Interface를 경계로 열차영역과 유동영역으로 나뉘지며 열차영역은 SOLID 3D-Boundary로 설정된다. Fig.4에서와 같이 열차영역인 SOLID 3D-Boundary를 Time Step에 따라 이동시키고, 열차전단부에 No-Slip 조건을 적용하여 열차속도를 경계조건으로 설정한다. 수치해석은 축소모형실험과 동일한 기하학적 형상과 열차운행조건을 대상으로 수행하여 각각의 결과를 비교·검토할 수 있도록 되었다. 비정상 유동해석의 Time Step은 0.1초이며, 종방향 (X 축방향) 격자간격은 0.04m로 설정되었다. Fig.5에 열차를 포함하는 격자계를 나타내었다. Y-Z축 단면에서 열차경계에 격자가 집중되었으며 전체유동장은 총 298,350개의 격자로 구성되었다. Fig.6은 이전연구[1]에서 제시된 연구결과의 일부로서, 열차 정차시의 열차후방 4m 지점에서 시간에 따른 압력계수 ( $C_p = p/0.5\rho U_{T\_MAX}^2$ )에 대하여 수치해석과 축소모형실험결과를 각각 도시하고 있다.



Fig. 2 Photograph of experimental apparatus.

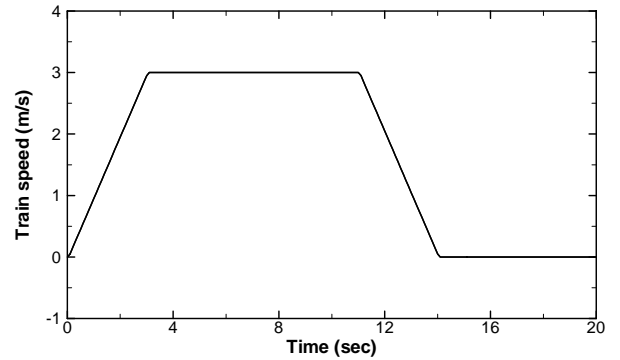


Fig. 3 Schedule of train run.

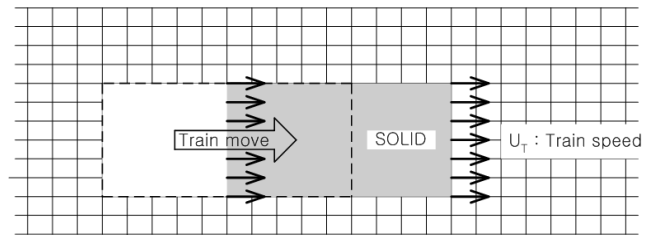


Fig. 4 Diagrammatic representation for numerical model of the train moving.

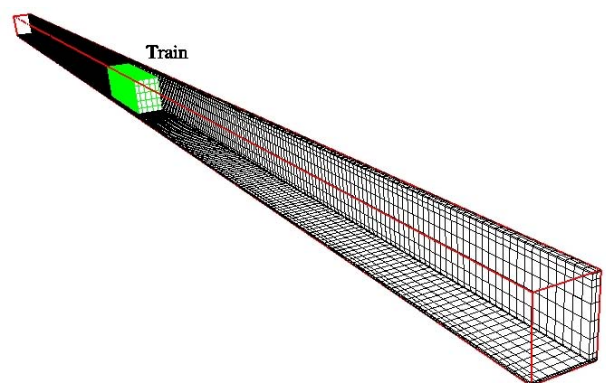


Fig. 5 Solution domain and grid used.

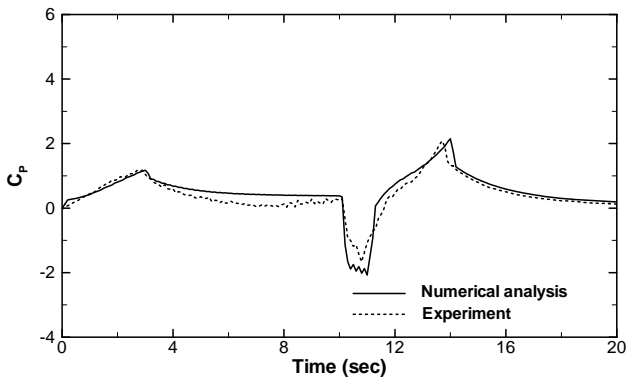


Fig. 6 Comparison of  $C_p$  variations between experimental and numerical results at a position 4m behind the rear of the train in station[1].

### 3. 열차풍압 해석

섬식 정거장에 설치된 스크린도어에 가해지는 열차풍압을 분석하기 위하여 서울지하철 2호선의 한 섬식 역사를 해석대상으로 선정하였다. Fig.7은 대상역사의 단면구조를 보여주고 있고, Fig.8은 본선터널이 분기하여 섬식 정거장과 연결되는 부분의 평면구조를 도시하고 있다. 대상역사의 승강장 길이는 205m이고, 정거장 선로부의 단면적은  $24.94\text{m}^2$ 이다. 운행되는 열차의 길이는 200m이고 열차단면적은  $11.23\text{m}^2$ 으로 되어있다.

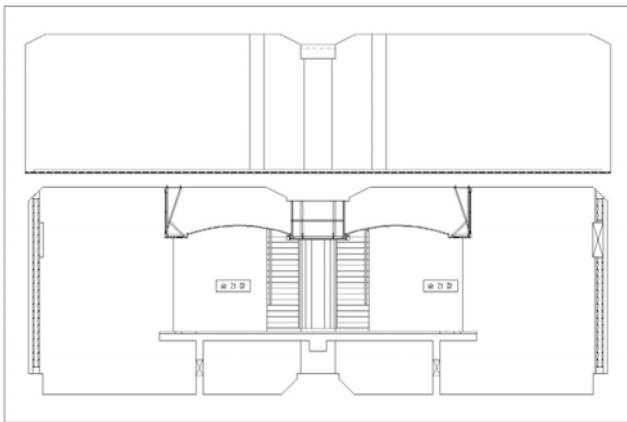


Fig. 7 Sectional view of station.

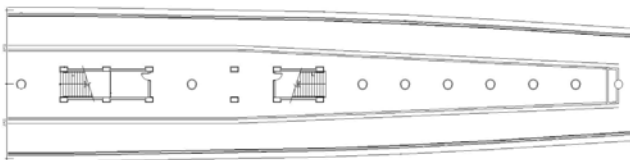


Fig. 8 Top view of connecting section between tunnel and station.

수치해석은 범용유동해석 프로그램인 CFX-4[4]를 이용하였으며, 비정상 비압축성 3차원 유동에 대한 지배방정식으로 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 적용하였다. 한편 열차이동에 대한 수치기법으로는 앞에서 언급한 SIM 기법을 사용하였다. 정거장에 설치된 스크린도어에 최대의 열차풍압이 형성될 것으로 예측되는 조건으로 비상시 두 열차가 정거장을

80km/h의 속도로 무정차 교행하는 경우로 가정하고, 이를 수치 해석조건으로 적용하였다.

Fig.9에서 Fig.13는 3차원 수치해석의 수행결과를 도시하고 있다. 그림에서와 같이 열차가 본선의 분기지점을 지나 정거장으로 진입하면서 정거장 선두부에서의 압력이 큰 폭으로 상승한다. 그후 열차가 정거장에 진입한 후 계속 진행하면서 정거장 스크린도어에 작용하는 압력이 크게 하강한다. 해석결과 비상시 섬식 정거장을 두열차가 동시에 통과하는 상황에서 Fig.13과 같이 스크린도어에는 정압으로 450 Pa, 부압으로 -494 Pa의 압력이 최대로 작용함을 알 수 있다.

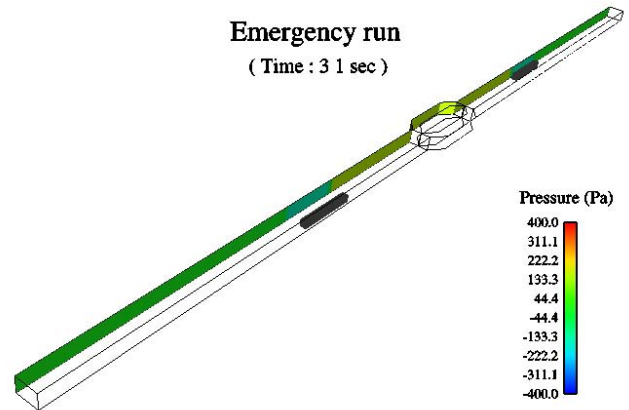


Fig. 9 Pressure distributions at 31.0 s after the start of train.

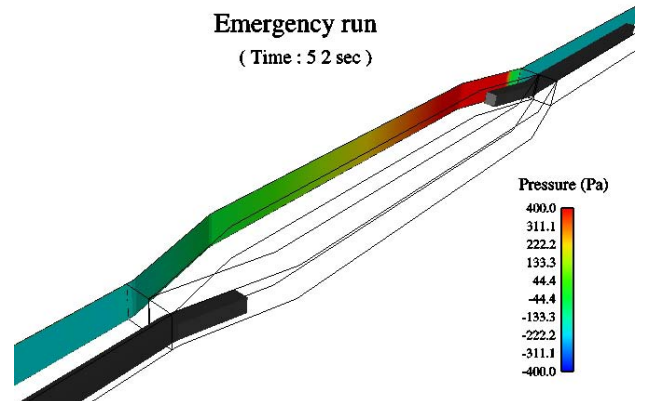


Fig. 10 Pressure distributions at 52.0 s after the start of train.

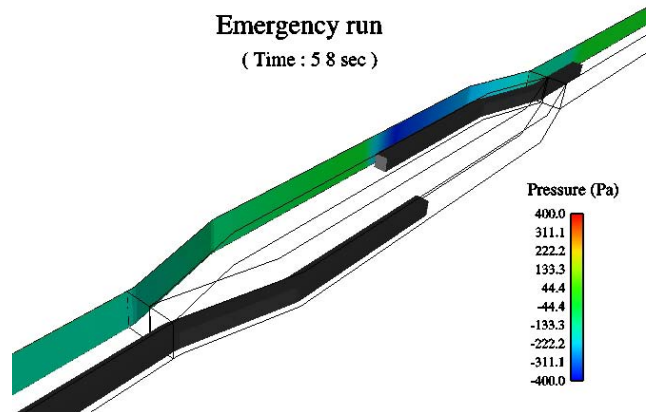


Fig. 11 Pressure distributions at 58.0 s after the start of train.

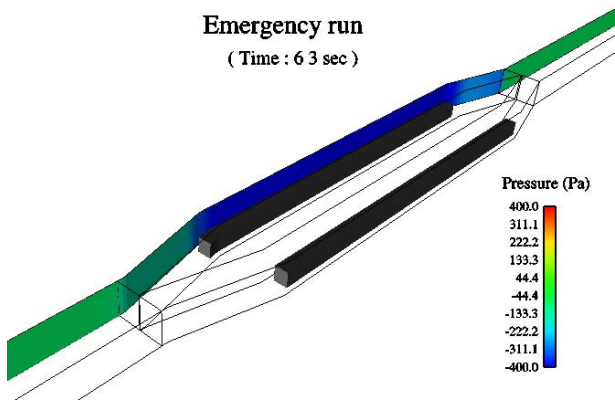


Fig. 12 Pressure distributions at 63.0 s after the start of train.

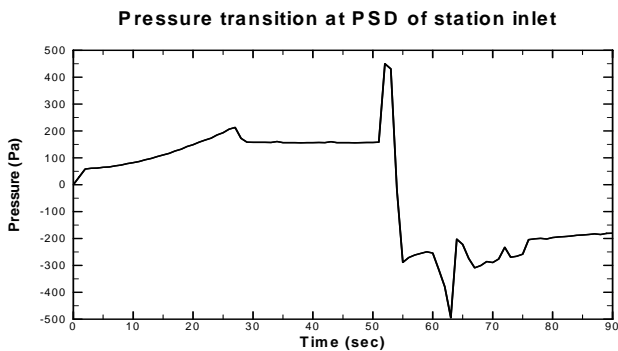


Fig. 13 Pressure variation at position of front region in station

#### 4. 결론

본 연구에서는 지하철의 섬식 정거장에 설치된 스크린도어에 가해지는 열차풍압을 예측하기 위하여 열차이동 수치기법으로 SIM기법을 적용한 3차원 수치해석을 수행하였다. 서울지하철 2호선의 한 섬식 역사를 해석대상으로 하여 두 열차가 역사에서 무정차 교행하였을 경우에 대해 터널내 유동장 해석과 스크린도어에서의 압력변화치를 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지하철의 열차이동에 대한 수치기법으로 고정격자기법의 SIM(Sharp Interface Method) 기법을 사용하였으며, 타당한 해석결과를 보여주고 있다.
- (2) 최대의 열차풍압이 형성될 것으로 예측되는 조건인 두 열차가 비상시 정거장을 80km/h의 속도로 무정차 교행하는 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 주요 시각에 대한 터널 및 정거장에서의 압력분포를 분석하였다.
- (3) 열차가 본선의 분기지점을 지나 정거장으로 진입하면서 정거장 선두부에서의 압력이 큰 폭으로 상승하고, 그후 열차가 정거장에 진입한 후 계속 진행하면서 정거장 스크린도어에 작용하는 압력이 크게 하강한다. 해석결과 비상시 섬식 정거장을 두열차가 동시에 통과하는 상황에서 스크린도어에는 정압으로 450 Pa, 부압으로 -494 Pa의 열차풍압이 최대로 작용한다.

#### 참고문헌

- [1] Kim, J.Y., Kim, K.Y., "Experimental and numerical analysis of train-induced unsteady tunnel flow in subeay", Tunnlling and

- Underground Space Technology, Vol.22 (2007), pp166-172.
- [2] Ye, T., Mittal, R., Udaykumar, H.S., Shyy, W., "An accurate Cartesian grid method for viscous incompressible flows with complex immersed boundaries, J. of Computational Physics, Vol.156 (1990), pp.209-240.
- [3] Udaykumar, H.S., Mittal, R., Rampunggoon, P., Khanna, A., "A sharp interface Cartesian grid method for simulating flows with complex moving boundaries", J. of Computational Physics, Vol.174 (2001), pp.345-380.
- [4] CFX 4.4, CFX-4 documentation, 2001, AEA Technology plc.