



지하철 터널 내 열차풍의 수치해석적 연구

이 준 호,¹ 막슈다 쥬레바,¹ 송 동 주^{*2}

A NUMERICAL ANALYSIS OF THE TRAIN WIND IN THE SUBWAY TUNNEL

J.H. Lee,¹ M. Juraeva¹ and D.J. Song^{*2}

Understanding train-wind is the best method to know how to optimize subway ventilation system. The capacity and efficiency of the subway ventilation system are known by pressure and velocity while train runs.

Analysis of the internal flow in subway tunnel and around subway station are studied using numerical methods. Characteristics of internal flow and influence of subway ventilation system for the subway station with platform screen door and tunnel are analyzed by unsteady state analysis. Velocity and pressure of train wind transformation are compared at around subway ventilation system and the internal flow is investigated at the subway tunnel.

Key Words : Train wind(열차풍), Unsteady-state(비정상해석), Subway ventilation system(지하철 환기 시스템), PSD(Platform screen door)

1. 서 론

점점 심각해지고 있는 대도시의 교통난을 해결하기 위해서는 대중교통이 더 많이 보급되어야 한다. 그중에서도 도시철도는 가장 효과적인 대책이 될 것이다. 지하철은 이용의 편리성과 이동시간을 절약할 수 있다는 점에서 전 세계적으로 수요가 급증하고 있으며, 우리나라에서도 대도시를 중심으로 점점 지하철의 수요가 급증하고 있다. 그러나 초기의 도시철도는 승객의 수송효율에만 치중하여 승강장 및 터널의 환경이 매우 열악한 수준이었다.

그러나 최근에는 생활수준이 높아짐에 따라 승강장에 스크린도어와 효율이 높은 환기구 설치 해 미세먼지가 많이 저감되었지만 터널 내부는 승강장 주변의 환경에 비해 매우 열악한 상태이다. 터널내부의 공기를 직접 사람이 마시지는 않지만 지하철의 냉·난방기 등을 통하여 터널내부의 미세먼지가 지하철 열차내부로 유입될 가능성이 매우 높다 [1][2].

본 연구는 터널내부의 미세먼지를 효과적으로 배출하기 위하여 최근 많이 보급된 PSD가 설치되어 있는 정거장 및 터널

에서의 유동을 열차풍 속도변화에 대해 수치해석 적으로 해석 해 보았다.

2. 수치해석 방법

2.1 기본 모델

본 연구에서는 Fig. 1 (a)에서 볼 수 있는 실제 운행되어지고 있는 서울 지하철 3호선 교대-남부터미널 구간을 모델로 사용하였다. 지하철 터널은 크게 단선과 복선으로 구분되어 있는데 Fig. 1 (b)의 단선구간은 상행선과 하행선이 벽으로 구분되어있어서 서로 영향을 받지 않으나 Fig. 1 (c)의 복선구간은 상행선과 하행선이 서로 위치적으로 붙어 있어 상행선 또는 하행선 열차 운행 시 열차풍이 반대선로의 환기구와 터널에 영향을 줄 수 있다.

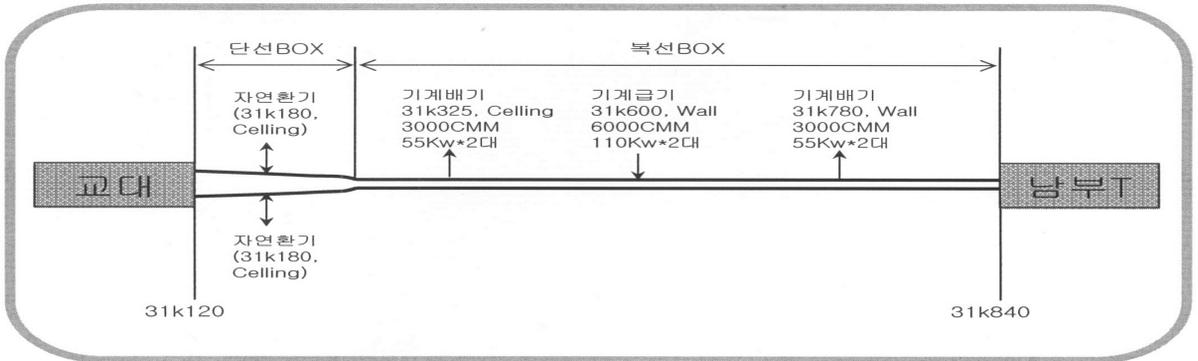
이 구간은 단선구간의 교대역을 출발한 열차가 교대역과 약 130m 떨어진 곳에서 복선구간으로 바뀌고, 남부터미널역을 도착할 때 까지 복선 구간을 유지하는 총 길이 960m의 구간이다. 최근 대부분의 정거장에 PSD가 설치되고 있는 추세라 정거장은 계산영역에 포함시키지 않았다. 계산영역이 매우 크므로 계산시간의 단축과 저장 공간의 이유 등으로 가속도의 변화에 따라 구간을 가속, 등속, 감속 구간으로 나누었고 열차가 가속 상태일 때 단선과 복선의 영향을 모두 알 수 있

1 정희원, 영남대학교 대학원 기계공학과

2 정희원, 영남대학교 기계공학부

* TEL : (053) 810-2449

* Corresponding author, E-mail: djsong@yu.ac.kr



(a) Schematic diagram of subway tunnel(Seoul National Univ. of Education Station-Nambu Bus Terminal Station Section)



(b) Single-track railroad



(c) Double-track railroad

Fig. 1 Ventilation system of subway tunnel

기에 가속구간에서의 해석을 수행하였다.

이 구간에서는 교대역 출발 직 후 하나의 자연환기구가 존재하고 두 곳의 배기구와 하나의 급기구가 존재한다. 교대역과 60m 떨어진 곳의 자연환기구와 205m 떨어진 곳의 기계배기구는 천장에 위치하고, 480m 떨어진 곳의 기계급기구와

660m 떨어진 곳의 기계배기구는 벽에 위치한다. 환기구는 일괄적으로 20m높이로 터널과 연결되어 있다고 가정하고 연구하였다.

열차의 길이는 총 120m로, 1량당 20m길이의 열차 6량으로 모델링 하였다[3].

2.2 격자 체계 및 수치 해석 방법

본 연구는 실제 크기로 모델링 시 길이가 1km에 근접한다. 그러므로 3차원 해석 시 1,000만개 이상의 격자가 소요될 것으로 판단되어져서 연구의 효율을 위해 가속 및 등속구간으로 나누어 연구하였다. 그리고 약 125:1의 종횡비를 가지므로 종횡비 극복을 위해 Fig. 2에서 보듯이 비정규 격자를 이용하였다. 총 격자는 각각의 계산 당 노드 수 130만개의 메쉬로 구성하였다. 해석에 사용된 컴퓨터는 해석 시간을 단축시키기 위해 MPICH-2.0 라이브러리를 이용한 병렬 처리방식을 사용하였다.

본 연구의 해석은 상용 프로그램인 ANSYS CFX 12.0을 사용하여 Unsteady State로 열차의 이동 및 유동해석을 수행하였다. 지하철의 움직이는 방법은 CFX에서 제공되는 Immersed Solid Method를 이용하여 Unsteady State로 해석하였다. Total Time은 지하철이 가속운행을 하는 24초 이고, Time Step을 0.2초로 설정 해 열차 주변의 열차풍 및 압력을 해석하였다. 가속구간에서는 열차가 24초동안 최대속도(80km/h)에 도달할 수 있도록 $0.925m/s^2$ 의 가속도를 주었다. 터널의 압력은 대기압으로 두고 지하철이 움직이기 직전에는 어떠한 유동변화도 없다고 가정하여 연구를 수행하였다 [4]. 난류모델은 Shear Stress Transport를 이용하여 해석하였다 [5][6].

2.3 경계 조건

본 연구는 두 곳의 배기구와 한 곳의 급기구, 그리고 두 곳의 자연환기구를 포함하고 있다. 기계 배기구는 각

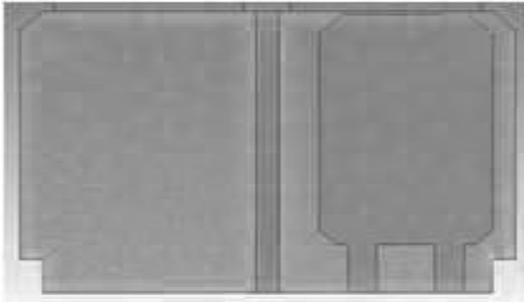


Fig. 2 3-Dimensional grid system

각 3000CMM(m^3/min)의 용량으로 터널 내 공기를 실외로 배기 시키는 Outlet으로 두고 급기구는 6000CMM의 용량으로 외부 공기를 터널로 유입시키게끔 Inlet으로 설계 되어져 있다. 지하철 터널의 양쪽 끝은 Opening 상태로 두어 열차풍의 유출입이 자유롭게 두었다. 지하철 터널 내부는 25 °C의 등온 대기로 가정하였고 초기의 터널 압력은 대기압으로 두었다.

3. 결과 및 고찰

본 계산은 계산 시간의 단축 및 계산의 편의를 위하여 3차원으로 단순화 시킨 모델을 이용하여 실제의 지하철의 운행과 같이 가속, 등속, 및 감속 상태의 지하철 운행 중에서 가속 상태를 Unsteady State로 해석하였다. Fig. 3에서처럼 지하철이 전진하면서 지하철의 압력에 의해 전방의 속도가 점점 빨라지는 것을 볼 수 있으며, 지하철의 후방에는 압력이 점점 낮아짐으로써 열차풍이 발생되는 것을 알 수 있다. 열차가 점점 빨리 전진 할수록 압력변화에 의해 발생하는 열차풍의 속도와 후방으로 영향을 주는 거리는 점점 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 가속 상태의 열차에 의해 생기는 열차풍이 전방과 후방으로 얼마만큼 떨어진 거리까지 영향을 주는가를 보여준다. 승강장에서 출발한 열차는 운행 시작 후 18초가 될 때까지는 일정하게 증가한다. 그러나 18 초가 지난 후 지하철의 속도가 약 16.65m/s가 될 때부터 출발지점의 열차풍은 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 이때의 지하철 최전방과 터널 시작지점의 거리는 약 149.85m이다. 이 결과로 역사에 도달하는 열차풍이 감소하는 시점은 지하철 출발 후 18초가 지나 지하철이 149.85m 운행한 시점인 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 지하철이 단선 및 복선 터널을 통과할 때 지하철 주변의 속도벡터를 나타낸 것이고, Fig. 6은 Time Step 별 지하철 주변의 속도 Contour를 나타낸 것이다.

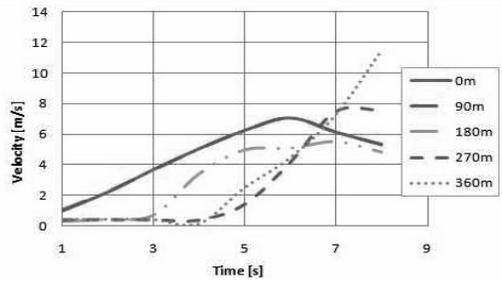


Fig. 3 Velocity distribution along distance

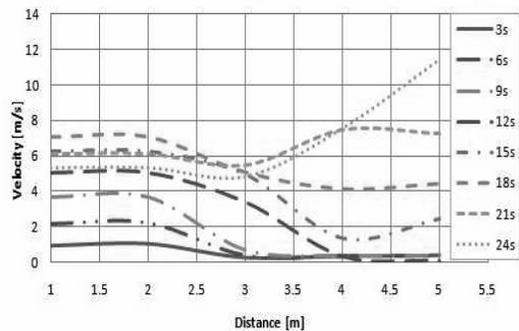
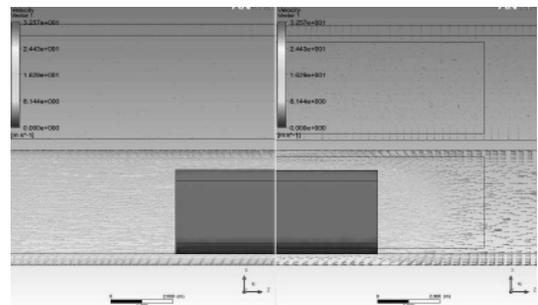
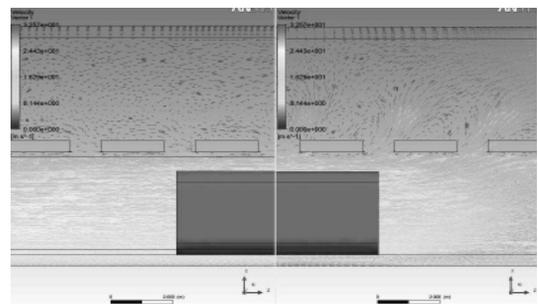


Fig. 4 Velocity distribution along distance of train head and start point

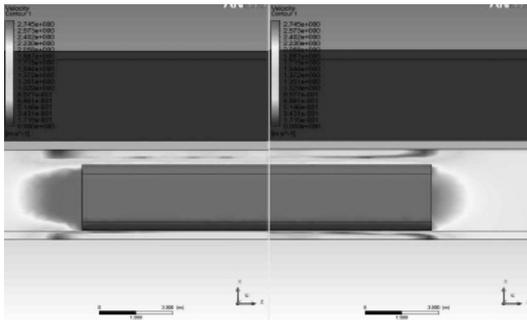


(a) At 12second(Acceleration state)

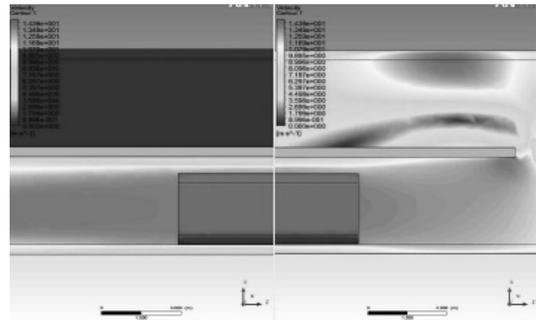


(b) At 24second(Uniform velocity state)

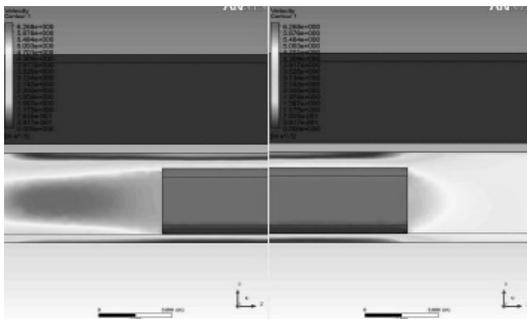
Fig. 5 Velocity vector



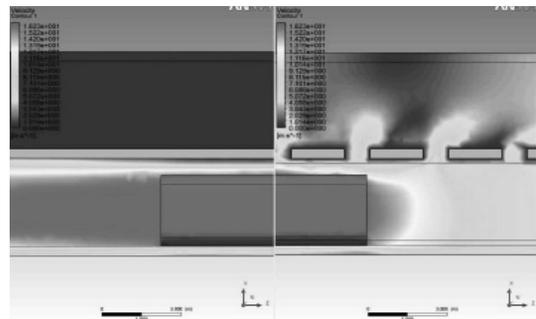
(a) 3sec.



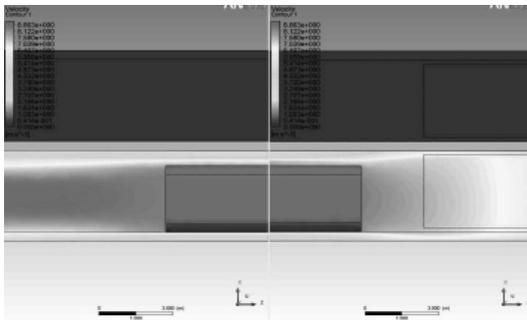
(e) 15sec.



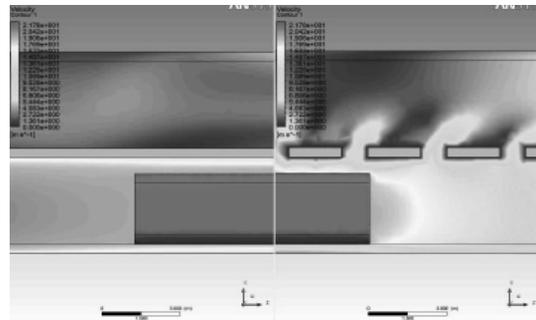
(b) 6sec.



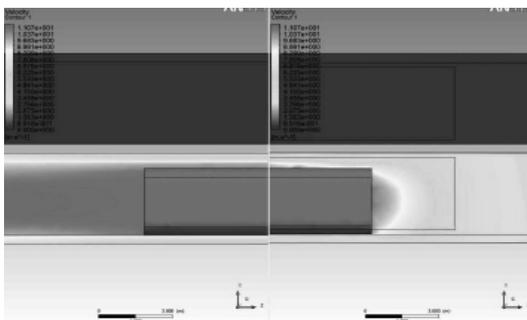
(f) 18sec.



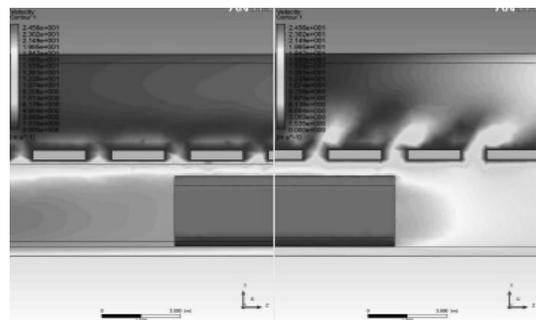
(c) 9sec.



(g) 21sec.



(d) 12sec.



(h) 24sec.

Fig. 6 Velocity contours of each time step

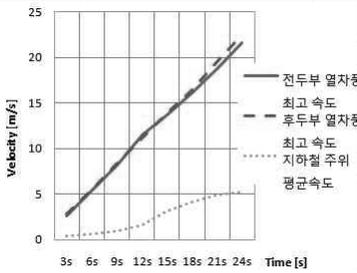


Fig. 7 Train wind velocity around train

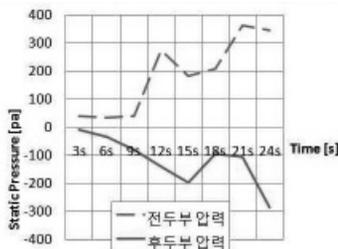


Fig. 8 Pressure distribution of train front and rear

Fig. 7은 지하철 운행 시작부터 최고속도에 도달할 때 까지 지하철 전두부 및 후두부 주변의 속도 분포이다. 시간이 지나고 속도가 빨라질수록 열차 전두부와 후두부에 발생하는 열차풍의 최대속도 및 평균속도는 점점 증가하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 단선구간에서 복선구간으로 진입 하여도 지하철 주위의 열차풍 속도는 떨어지지 않고 지하철의 속도가 일정하게 증가하고 있는 상태라 열차풍도 점점 증가하고 있다. Fig. 7은 Fig. 5와 Fig. 6의 수치적 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 여기에서는 지하철이 단선에서 복선으로 진입하는 시점에도 전두부 및 후두부의 최대 속도는 지하철 속도의 증가에 따라 큰 변함없이 증가 하나 지하철 열차 주변의 평균 속도는 상승폭이 다소 줄어들었음을 알 수 있다. 이것은 열차풍이 반대편 선로에 큰 영향을 줄 수 있으며 반대 선로의 환기 성능에도 큰 영향을 미칠 수 있게 된다.

Fig. 8은 지하철 전두부 및 후두부의 시간에 따른 압력 변화를 나타낸다. 출발 후 약 9초까지는 압력 변화가 크게 없으나 9초가 지난 이후로는 전두부의 압력이 크게 증가하고 후두부의 압력은 크게 감소하게 된다. 12초가 지난 시점에 전두부의 압력이 감소하는데 지하철 전두부가 복선구간에 진입하게 되면서 압력이 감소하게 된다. 지하철 열차의 길이가 120m로 전두부와 후두부가 매우 멀리 떨어져 있어서 후두부는 전두부가 12초에 압력이 증가하다 감소한 것에 비해 약 3초 후 압력이 감소하다 증가하게 된다.

4. 결 론

상용 유체해석 프로그램인 ANSYS CFX 12.0을 이용하여 Unsteady state의 지하철 유동해석을 수행하였다. 지금까지 일반적으로 연구했던 방법과는 다르게 지하철의 속도가 일정하게 움직이는 것이 아니라 이동속도에 변화를 줘 $0.925m/s^2$ 의 가속도를 가지고 움직이는 경우에 대하여 해석하였다. 지하철이 터널을 이동할 때 피스톤 효과에 의하여 지하철 전면에는 압력이 증가하고 후면에는 압력이 감소하면서 빠른 속도의 열차풍이 생성됨을 알 수 있다. 속도가 증가할수록 전면에서 생기는 압력은 증가하고 후면에 생기는 압력은 감소함을 알 수 있다.

앞으로 등속운동과 감속운동 하에서 열차풍의 수치해석적 연구와 구간을 나누지 않고 가속, 등속, 감속의 연속적인 경우에 대하여도 추가 연구를 해 볼 예정이다.

후 기

본 연구는 2009년도 한국건설교통기술평가의 미래도시철도 기술개발사업-도시철도 터널 및 차량의 공기 질 개선 기술개발 과제에 의한 지원으로 수행하였습니다.

참고 문헌

- [1] 2004, Jeong, H.K., Ha, M.Y., Kim, K.C., Jeon, C.H., Choi, H.J., Joo, J.C., Mun, J.M. and Hwang, S.K., "Simulation of Fluid Flow Inside the Subway Station with PSD," *대한기계학회 2004년도 추계학술대회 논문집*, pp.1430-1435.
- [2] 1999, Ham, H.D. and Jeong, Y.T., "A Numerical Study on Thermal and Fluid Characteristics for Ventilation Type in Subway Tunnel," *공기조화 냉동공학회 99' 동계학술발표회 논문집*, pp.320-327.
- [3] 2001, Jang, D.S. and Lee, Y.W., "On Fluid Flow and Pressure Fields around the Subway Train Passing through Tunnel and Platform," *한국풍공학회지*, 제5권, 제2호, pp.180-186.
- [4] 1998, Lee, J.H. and Oh, M.D., "Train Wind in the Subway Tunnel," *공기조화·냉동공학*, 제27장 제2호, pp.109-114.
- [5] 1999, Lee, B.S., Lee, S.S. and Lee, D.H., "Computation of Oscillating Airfoil Flows with SST Turbulence Model," *한국전산유체공학회지*, pp.131-136.
- [6] 1994 Menter, F.R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence model for engineering applications", *AIAA J.*, Vol.32, No.8, pp.1598-1605.