

상대식 승강장에서 열차 운행에 의한 지하철 승강장 스크린 도어 풍압해석

이명성,¹ 이상혁,¹ 허남건^{*2}WIND PRESSURE TRANSIENTS ON PLATFORM SCREEN DOOR OF SIDE PLATFORMS
IN A SUBWAY STATION CAUSED BY PASSING TRAINSMyungsung Lee,¹ Sang Hyuk Lee¹ and Nahmkeon Hur^{*2}

In the present study, the wind pressure transients on platform screen door in side platforms caused by passing trains have been investigated numerically. The transient compressible 3-D full Navier-Stokes solution is obtained with actual operational condition of subway train and the moving mesh technique is adopted considering the train movement. To achieve more accurate analysis, the entrance and exit tunnel of platform are included in a computational domain and detailed shape of train is also modeled. Numerical analyses were conducted on five operational conditions which are different velocity variation of subway train, existence of stationary train and passing each other trains. The results show that pressure load on platform screen door is maximized when the two trains are passing each other. It is also seen from the computational results that the maximum pressure variation was found to be satisfactory to various foreign standards.

Key Words : 풍압(Wind Pressure), 승강장 스크린 도어(PSD, Platform Screen Door), 상대식 승강장(Side Platforms), 터널 (Tunnel), 압축성 유동(Compressible flow), 전산유체역학(CFD), 이동격자(Moving Mesh)

1. 서 론

근래 국내에 도입되고 있는 승강장 스크린 도어(PSD, Platform Screen Door)는 승강장에서 대기하는 승객에게 불쾌감을 주는 열차풍을 차단하여 보다 쾌적한 역사 환경을 조성하고, 낙상 및 지하철 화재와 같은 인명 사고를 예방하는 등 많은 장점을 가지고 있다. 따라서 보다 안전한 PSD 사용을 위해 PSD 설치에 따른 풍압 환경 평가가 필요함은 당연하며 이에 따라 설계 조건이 안전 기준에 합당한지 검토해야 한다.

역사 내 풍압환경을 평가하기 위하여, 최근에는 실험적 연구와 더불어 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 역사 내의 복잡한 유동 현상을 해석하고, 설계를 개선하는 사례들이 많이 보고되고 있다. 국내에서 CFD가 적용된 연구로서 경부고속철도의 건설과 관련하여 남서울역사(현 광명역사)에서 열차가 역사 내

부를 통과하는 경우 승객의 안전과 쾌적성을 위한 역사내부의 풍압 환경에 관한 연구[1]이 수행되어 역사 설계에 반영되었다. 또한 천안역사[2]와 대전통합역사[3]에 대한 풍압연구도 진행되어 안전한 역사 환경 설계 자료로 활용되고 연구의 결과가 국내외에 소개되어 좋은 평가를 받았다[4-7]. 이러한 수치해석 방법은 천안아산 역사에서 고속열차가 300 km/h로 통과할 때 역사 내에서 실험 장치를 이용한 실제 측정 결과와 비교하여 정성적·정량적으로 근접한 결과를 얻었으며[8] 이를 통하여 수치해석 결과의 신뢰성 및 정확성을 확보하였다. 이러한 검증을 바탕으로 신정주역사 풍압 연구[9], 인천공항철도[10]에도 CFD가 적용되어 설계 자료로서 활용되었다.

위와 같은 연구에서 열차의 자세한 형상을 모델링하고 다른 역사와 연결되는 터널 구간을 해석 격자에 포함하였으므로 본 연구 역시 실제 열차의 형상과 터널 구간을 모사하여 실제적인 해석 결과를 도출하였다. 또한 상대식 승강장에서 무정차 통과 및 정차, 역사 내 타 열차의 정차 여부 그리고 교행하는 두 열차와 같이 다양한 해석 조건을 설정하여 열차 풍에 의해 PSD에 작용되는 풍압을 수치 해석하였다. 최종적으로 수치 해석 결과를 검토하여 PSD 및 건축마감에 미치는

1 서강대학교 기계공학과 대학원

2 종신회원, 서강대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

압력을 구하고, 설계의 적정성 및 신뢰성을 평가하기 위해 PSD가 설치된 선례의 풍압 조건과 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 대상

본 연구에서는 신설되는 지하철 9호선 923 공구 역사를 3차원 모델링하였다. 위 역사는 상대식 승강장으로 상, 하행 열차 노선이 승강장 사이에 위치한 구조이다. 전체 해석 격자는 Fig. 1과 같이 역사와 양끝의 운행 터널로 구성되었다. 역사 설계 도면에 의거한 해석 영역에서 승강장의 길이는 165 m이고 터널 효과 및 유동을 발달시키기 위한 진입터널과 출구터널의 길이는 승강장 길이의 2배인 330 m이며 역사를 운행하는 열차의 길이는 6량으로 길이는 120 m이다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 열차 상부의 에어컨과 같은 실제적인 열차의 형상을 모사하여 보다 정확한 해석 결과를 도출하였다. 총 해석 격자는 2,200,000개로 열차의 운동을 표현하기 위한 이동격자는 440,000개이고 나머지 부분인 유동장은 1,760,000개이다. 경계조건으로 터널 양 끝단은 대기 압력 조건을 적용하였고 양 끝단이 아닌 다른 부분은 벽 조건이 적용되었다.

2.2 해석 방법

열차의 운동을 모사하기 위해 이동 격자(Moving Mesh) 방법을 사용하였다. 풍압해석을 위한 열차 운행조건은 총 5가지로서 열차가 57 km/h의 속도로 역사에 진입해서 정차할 때 역사에 정차한 열차가 없는 경우와 있는 경우 그리고 열차가 역사를 80 km/h의 속도로 통과할 때 역사에 정차한 열차가 없는 경우와 있는 경우 마지막으로 두 열차가 80 km/h의 속도로 역사를 교행 하는 경우이다. 위 해석 조건은 Table 1에 정리하였다. 열차 운행에 의한 풍압해석은 3차원 압축성 난류 유동으로 가정하여 연구하였다. 개활지에서 고속 전철이 300 km/h로 운행하는 경우에도 마하수가 0.3보다 작기 때문에 비압축성 유동으로 해석 가능하지만 터널이나 역사와 같이 밀폐된 공간에서 열차가 운행되는 경우 피스톤이나 주사기와 같은 효과가 발생하여 압력의 변화가 매우 커지므로 압축성 효과가 고려되어야 한다. 수치해석을 위하여 상용 프로그램인 STAR-CD v3.24를 사용했으며, Intel Xeon 2.4 GHz Linux Cluster 을 이용하였다.

3. 결과 및 토의

열차의 운행조건에 따라서 PSD에 작용하는 풍압 변화를 알기 위해 2가지 방법을 사용하였다. 첫 번째는 Fig. 3과 같이 두 PSD를 이동 열차 측(A, C, E)과 정차 열차 측(B, D, E)으

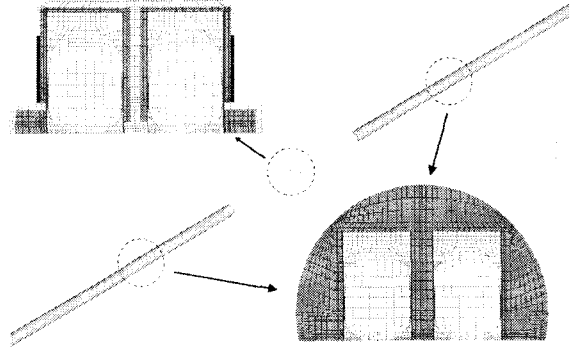


Fig. 1 Cross sectional mesh of computational domain

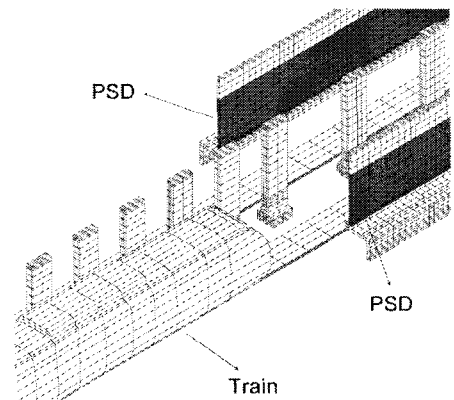


Fig. 2 Detailed mesh for train and platform

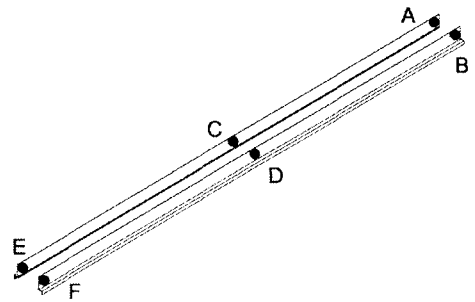


Fig. 3 Pressure measurement positions on PSD

Table 1 Cases of train movement

Case	Train 1	Train 2
1	Deceleration	None
2	(57 km/h → 0 km/h)	Stop
3	Penetration	None
4	(80 km/h)	Stop
5	Passing each other in the opposite direction (80 km/h, respectively)	

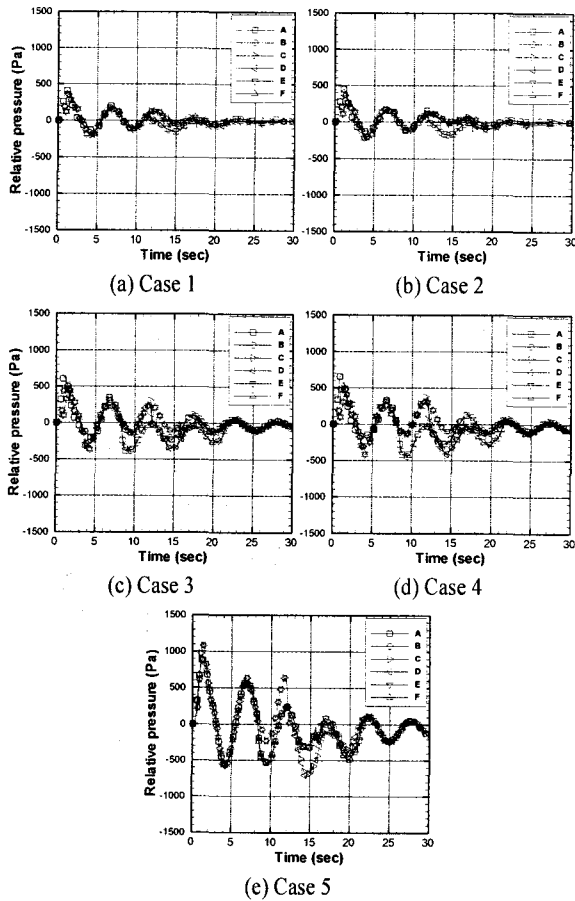


Fig. 4 Pressure transients history at each measurement point on PSD

로 각각 양쪽 끝 부분과 가운데 부분을 측정 위치로 정하여 총 6곳의 측정위치에서 시간에 따른 압력 변화의 차이를 비교하였고, 두 번째는 PSD에 작용하는 압력 분포(contours)를 열차의 위치와 함께 시간에 따라서 연속적으로 도시함으로써 역사 내부의 압축파와 팽창파로 인해 발생하는 양압과 부압의 위치를 파악하였다. 양압(+)은 열차 측에서 PSD 방향으로 밀어내는 힘을 의미하고, 부압(-)은 열차 측에서 PSD를 당기는 방향의 힘을 나타낸다.

Fig. 4 (a), (b)는 열차가 57 km/h의 속도로 감속하여 정차할 때 역사 내 정차열차가 없는 경우와 있는 경우의 시간에 따른 풍압 변화이다. 열차가 역사에 가까이 접근함에 따라 PSD에 작용하는 압력은 양압과 부압이 교대로 반복되고 약 11.8초에 열차의 선두부와 만나는 PSD영역(원형과 사각형 표식)의 압력이 부압으로 변하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 열차의 선두부가 지나가기 이전의 PSD영역은 압축파에 의한 양압이 작용하지만 일단 선두부가 지나가면 팽창파로 인해 PSD에 작용하는 압력이 부압으로 변하기 때문이다. 정차

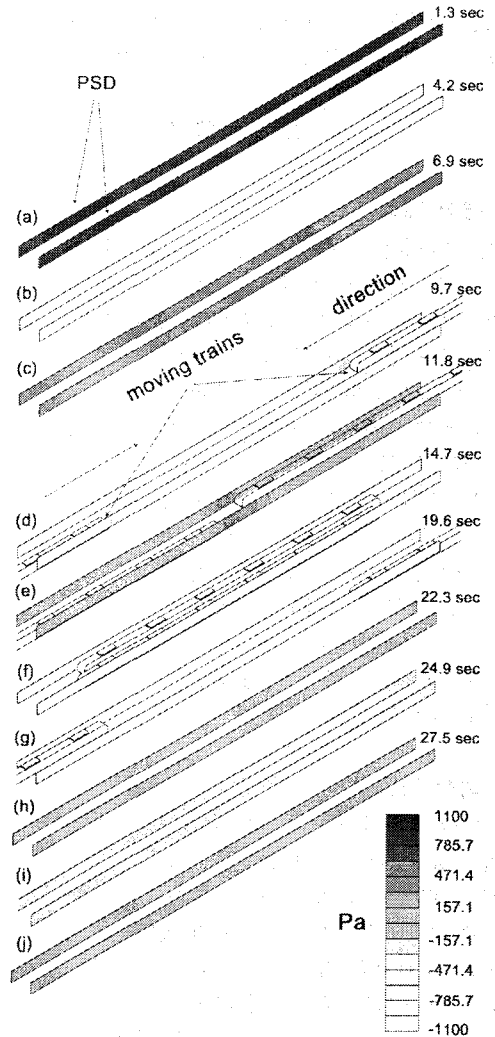


Fig. 5 Pressure distributions on PSD (case 5)

열차가 있는 Case 2의 경우 열차가 통과하는 단면적이 감소하므로 압력은 Table 2와 같이 Case 1보다 소폭 상승한다.

Fig. 4 (c), (d)는 열차가 역사를 80 km/h의 속도로 통과할 때 역사 내 정차열차가 없는 경우와 있는 경우이다. Case 1, 2와 마찬가지로 열차가 역사에 진입하기 전에 PSD에 양압과 부압이 교대로 작용하는 것을 볼 수 있다. 8.4초일 때 원형과 사각형 표식의 압력이 양압에서 부압으로 변하는 것은 각각의 표식에 해당하는 PSD 영역이 열차의 선두부가 지나간 후에 팽창파의 영향을 받기 때문이다. 그리고 12초에서 15초 사이의 PSD에 작용하는 압력 중에서 삼각형(F)과 역삼각형(E) 표식(PSD 영역 중 열차의 선두부가 가장 마지막에 지나가는 끝 부분)이 다른 값보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 해당 지점(F, E)은 아직 열차의 선두부가 통과되지 않고 열차의 선두부가 접근하면서 압축파의 영향을 받는 지점

Table 2 Maximum pressure for each cases of train movement

Case	Max. positive pressure (kPa)	Max. negative pressure (kPa)	Velocity (km/h)
1	+0.415	-0.245	57
2	+0.450	-0.260	57
3	+0.630	-0.400	80
4	+0.688	-0.420	80
5	+1.110	-0.622	80

Table 3 Foreign standards on the PSD

Title	Pressure (kPa)	Velocity (km/h)	Company
Hong Kong MTRC TKE Line	+1.50 -0.90	80	Nabco
Hong Kong KCRC WR Line	±2.70	120	Nabco
Taiwan Xinzhuang Line	±1.73	80	Nabco
Taiwan Lucho Line	±1.20	80	Nabco
BangKok Blue Line	±0.75	80	Faiveley
Shanghai line No. 4	±0.90	90	Faiveley
LAR MTRC Hong Kong	+1.38 -3.26	110	Faiveley

이기 때문이다. 22초 이후에 열차가 PSD의 모든 영역을 지나고 역사를 빠져나가면서 PSD에 작용하는 압력은 전 영역에 걸쳐 고르게 되고 양압과 부압이 교대로 반복되면서 그 크기가 점차 감소되어 안정된다. Case 1, 2와 마찬가지로 정차 열차가 있는 Case 4의 경우에 열차가 통과하는 단면적이 감소되어 Table 2와 같이 PSD에 작용하는 압력은 Case 3보다 소폭 상승하였다.

마지막으로 Fig. 4 (e)는 두 열차가 역사를 각각 80 km/h의 속도로 서로 마주보며 통과하는 경우이다. 다른 Case와 마찬가지로 열차가 역사에 진입하기 전에 PSD에 양압과 부압이 교대로 반복되는 것을 볼 수 있다. 이렇게 반복되는 양압과 부압의 크기는 열차의 속도가 클수록 증가하여 Case 1, 2보다는 Case 3, 4가 더 크고 Case 5에서 최대가 된다. Fig. 5는 Case 5의 시간에 따른 PSD의 풍압 분포를 열차의 위치와 같이 나타낸 것으로 Fig. 4 (e)와 비교하기 용이하다. 앞서 언급된 Fig 4 (e)에서 8.4초 이전에 양압과 부압이 반복되는 현상은 Fig. 5의 (a)-(c)에서 확인된다. Fig. 4 (e)에서 10초에서 12초 사이에 PSD 중간 지점에 해당하는 왼쪽 삼각형(D)과 오른쪽 삼각형(C)의 압력값이 다른 값보다 더 큰 것을 볼 수 있는데 이것은 Fig. 5 (d), (e)와 같이 두 열차의 선두부가 중간 지점에 점차 접근함에 따라 압축파의 영향으로 압력이 상승하기 때문이다. 한편 Fig. 4 (e)의 약 12초 이후에는 반대로 PSD 중간 지점(D, C)의 압력이 부압으로 바뀌는 것은 열차의 선두부가 해당 지점을 지나간 후에 팽창파의 영향으로 부압이 작

용하기 때문이다. Table 2와 같이 모든 운전 조건 중에서 열차 2대가 교행 하는 경우인 Case 5일 때 가장 큰 압력이 PSD에 발생한다.

4. 결론

본 연구에서는 상대식 승강장 구조인 지하철 923 공구 역사를 3차원 모델링하여 5가지 운행 조건에 따라 PSD에 작용하는 풍압을 수치 해석하였다. 모든 Case에서 PSD 영역 중 열차 선두부의 앞부분에서는 압축파로 인해 최대 양압이 발생하고 선두부가 지나가면서 양압에서 부압으로 바뀐다. 또한 열차 선두부와 후미부 사이의 PSD 영역에서 팽창파로 인해 발생하는 부압은 열차의 후미부가 지나간 후에 다시 양압으로 바뀐다. 그리고 최대 양압과 최대 부압의 차이는 두 열차의 교행으로 인해 상대 속도가 최대인 Case 5에서 최대가 된다. 각각의 열차 운행 조건마다 설계 안전의 기준이 되는 양압과 부압의 최대값은 Table 2와 같다. 결과적으로 Table 3과 같은 PSD의 선례 및 풍압조건과 비교해 볼 때 지하철 2호선 PSD의 설치에 대한 설계 및 시공 조건은 설계 안전 기준에 부합되며 적절한 설계가 이루어졌다고 생각된다.

참고문헌

- [1] 허남건, 1997, “경부고속철도 남서울역사 신축설계 학술연구용역 최종 보고서(풍압),” 무형 종합건축사 사무소.
- [2] 허남건, 1995, “경부고속철도 천안역사 풍압연구보고서,” 한국고속철도 건설공단.
- [3] 허남건, 1997, “경부고속철도 대전통합역사 신축설계 학술연구용역 최종 보고서(풍압),” 단우 종합건축사 사무소.
- [4] 허남건, 김욱, 이상열, 1997, “경부고속철도 남서울역사의 풍압해석,” STAR-CD Users' Conference 논문집.
- [5] 허남건, 김희동, 1998, “고속전철 분야의 유동해석,” 대한기계학회 유체공학학부 학술강연회 논문집, pp.121-132.
- [6] N. Hur, S. R. Kim, W. Kim and S. Lee, 1998, “Wind Pressure Transients inside a Station Caused by a Passing High Speed Train,” Proc. of 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf., pp.173-176.
- [7] 1999, “CFD in the station,” Passenger Terminal World, p.11.
- [8] 허남건, 2002, “경부고속철도 신경주역사 신축설계 현장측정 및 학술연구용역 관련 비교검토서,” (주)포스에이씨.
- [9] 허남건, 2005, “경부고속철도 신경주역사 신축설계 풍압연구보고서,” (주)포스에이씨.
- [10] 허남건, 2002, “인천공항철도 승강장 스크린 도어 풍압해석,” (주)현대엘리베이터.