

상대식 승강장에서 열차 운행에 의한 지하철 승강장 스크린 도어 풍압해석

이 명 성,¹ 이 상 혁,¹ 허 남 건^{*2}

WIND PRESSURE TRANSIENTS ON PLATFORM SCREEN DOOR OF SIDE PLATFORMS IN A SUBWAY STATION CAUSED BY PASSING TRAINS

Myungsung 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 used with actual operational condition of subway train by adopting the moving mesh technique considering the train movement. To achieve more accurate analysis, the entrance and exit tunnel connecting the stations are included in a computational domain with modeling the detailed shape of the train. Numerical analyses are conducted on five operational conditions which include the variation of the train speed, case with or without the train stopped in the other track, and case for two trains passing each other inside the station. 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 for the cases considered in the present study is 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

지하철 역사 내의 사고로 인한 물적, 시간적 및 인명의 손실을 방지하기 위해 단계적으로 전 역사에 설치중인 승강장 스크린 도어(PSD, Platform Screen Door)는 역무원의 업무부담 감소, 환기 및 냉방시설의 건축, 운용비용 감소, 지하철 터널 안 유해물질의 승강장 유입과 열차 통과시 발생하는 강풍을 방지하여 승강장의 쾌적한 환경을 유지하는 등 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 열차 운행 시 발생하는 여러 요소에 대해 설계 조건이 안전기준에 부합하는지에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이 중에서 PSD의 안전한 사용을 위한 PSD에 작용하는 풍압에 대한 평가가 필요하며 이로부터 안전 기준을 만족하는 설계가 이루어져야 한다.

최근 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)의 발달로 인해 역사 내 풍압환경에 대해 실험적 연구와 더불어 수치해석을 통한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이와 같은 수치해석을 통한 역사 내의 풍압 해석을 통해 역사 내의 복잡한 유동 현상을 분석하고 설계를 개선하는 사례들이 늘어나고 있다. 고속철도의 운행은 열차 주변에 압축파 및 팽창파를 크게 발생시켜 역사에 설치되어 있는 PSD와 같은 주변 시설에 큰 영향을 미치게 된다. 이로 인해 경부고속철도 건설과 관련하여 남서울역사(현 광명역사)에서 열차가 역사 내부를 통과하는 경우 승객의 안전과 쾌적성 검토를 위해 CFD를 이용한 역사내부의 풍압 환경에 관한 연구[1-3]가 수행되었다. 또한 천안역사와 대전통합역사와 같은 고속철도 승강장에서 고속철도가 300 km/h로 통과할 때 실험 장치를 이용하여 역사 내 실제 측정 결과와 수치해석 결과를 비교하여 정성적, 정량적으로 근접한 결과를 얻었으며 이와 같이 신뢰성 및 정확성을 검증받은 풍압 환경에 대한 수치해석 결과를 역사 환경 설계 자료로 활용하고 있다[4]. 한편, 지하철 역사 환경에 대한 수치해석 연구도 활발히 진행되고 있다. Ke 등[5]은 역

접수일: 2007년 3월 16일, 심사완료일: 2007년 11월 26일.

1 서강대학교 기계공학과 대학원

2 종신회원, 서강대학교 기계공학과

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

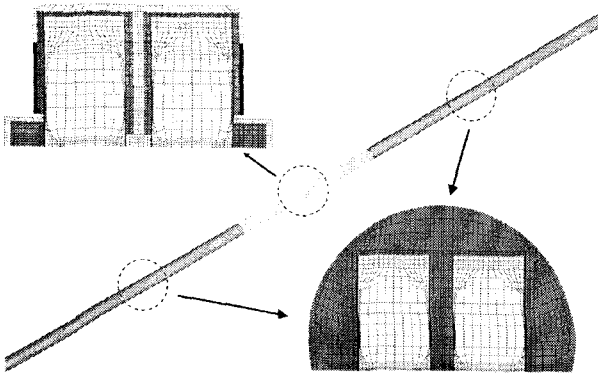


Fig. 1 Cross sectional mesh of computational domain

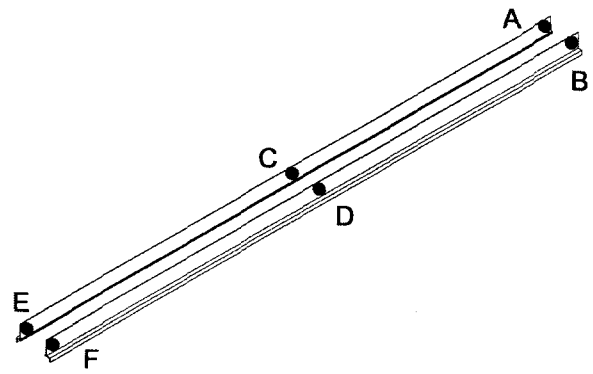


Fig. 3 Pressure monitoring positions on PSD

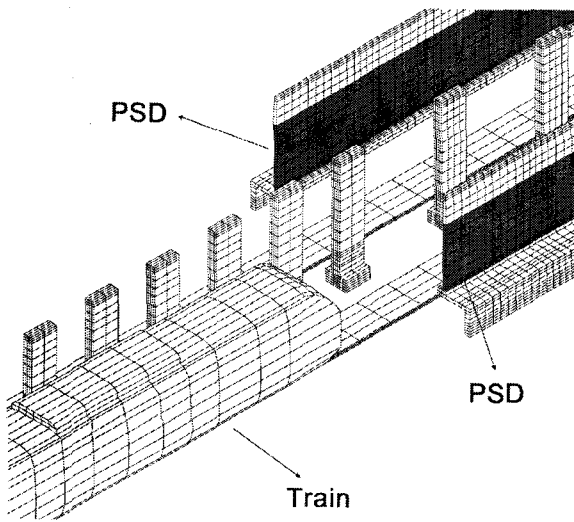


Fig. 2 Detailed mesh for train and platform

사 내 환기 시스템의 영향 및 지하철의 운행에 따른 PSD에 작용하는 풍압에 대해 분석하였다. 정해권 등[6]은 사직역에서 열차 운행에 의한 PSD에 작용하는 압력을 수치 해석하였고, 김정엽[7]은 단선 터널 구조의 정거장에서 열차풍이 PSD에 미치는 압력과 기류 분포를 예측하였다. 또한 이재열 등[8]은 동래역에 열차가 진입시 PSD에 미치는 풍압 결과를 구조 해석에 적용하여 구조 안정성 평가를 수행하였다. 이와 같은 CFD를 통한 해석은 승강장 내 열차 주변 시설물의 설계 자료로 활용되고 있다.

본 연구에 앞서, 이명성 등[9]은 섬식 지하철 승강장에서 열차 운행에 따른 PSD에 작용하는 풍압에 대한 영향을 해석하여 이하의 결과를 얻었다. 즉, 열차의 운행은 지하철 승강장 내에서 공기의 압축성 효과를 일으키게 되고 이로 인한 압축파와 팽창파가 생성, 소멸되어 PSD에 양압 및 부압으로 작용하게 된다. PSD에 작용하는 최대 압력은 열차 운행 속도와 관계가 있으므로 실제 승강장에 진입하는 열차의 운행 조

건을 고려한 수치해석으로부터 섬식 승강장에 설치되어 있는 PSD에 작용하는 최대 압력을 구하였다. 이 때, PSD에 작용하는 최대 압력은 설계 및 시공에 대한 안전 기준에 부합하는 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 앞의 논문과 마찬가지로 열차의 자세한 형상을 모델링하고 다른 역사와 연결되는 터널 구간을 해석 격자에 포함하여 실제적인 해석결과를 구하였다. 그리고 수치해석은 상대식 승강장에서 무정차 통과 및 정차, 역사 내 타 열차의 정차 여부 그리고 교행하는 두 열차에 대하여 수행하였으며, 그 결과로부터 열차풍에 의해 PSD에 작용되는 풍압을 분석하였다. 최종적으로 풍압 분석 결과를 검토하여 PSD 및 건축마감에 미치는 압력을 구하고, 설계의 적정성 및 신뢰성을 평가하기 위해 PSD가 설치된 선례의 풍압 조건과 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 대상

본 논문에서 신설되는 지하철 9호선 923 공구 역사를 해석 대상으로 하여 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 승강장

Table 1 Cases of train movement

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

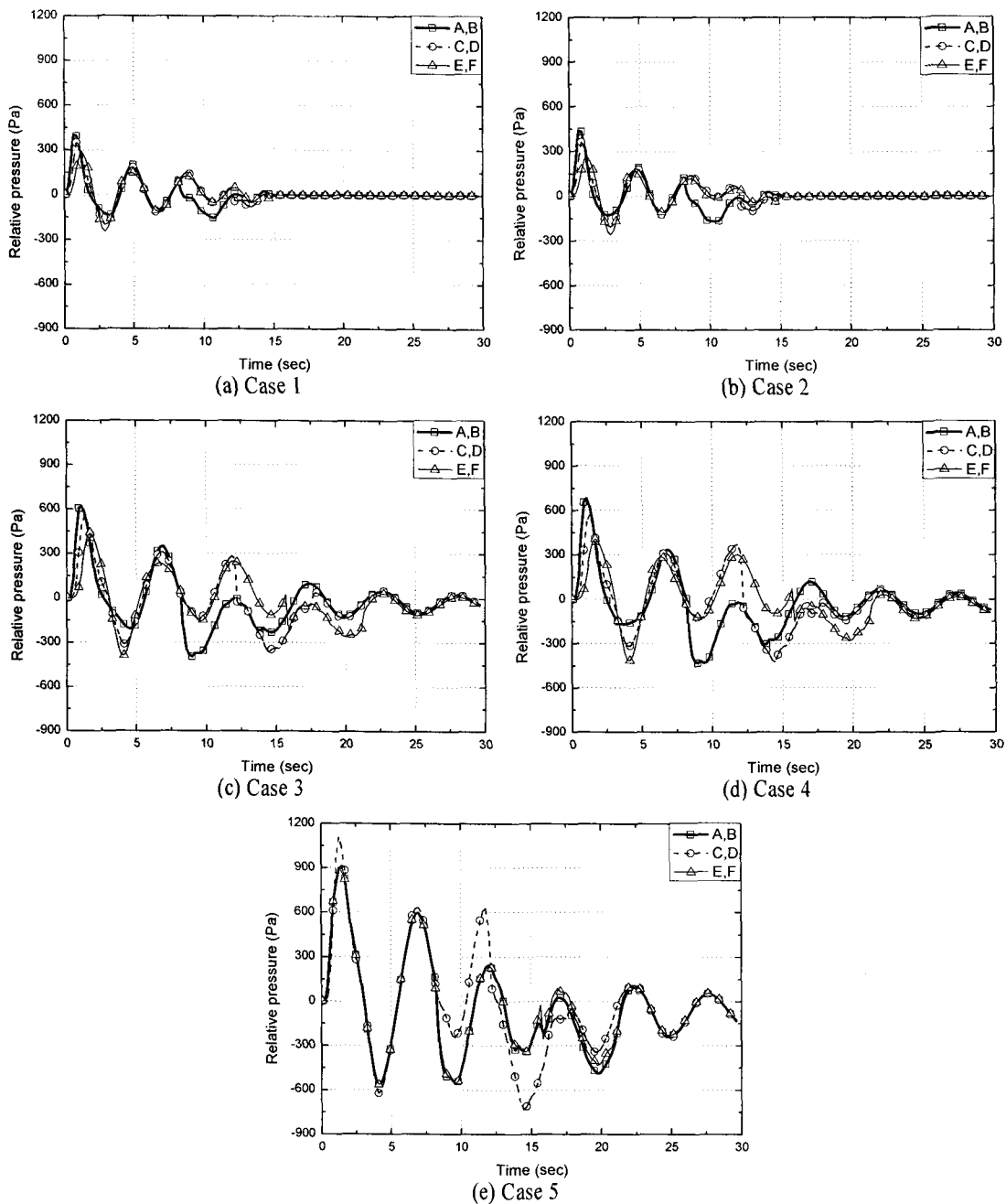


Fig. 4 Pressure transients history at each measurement point on PSD

의 길이는 165 m이고 터널 효과 및 유동을 발달시키기 위한 진입터널과 출구터널의 길이는 각각 승강장 길이의 2배인 330 m이며 역사를 운행하는 열차는 6량으로 구성되어 길이는 120 m이고 Fig. 2와 같이 열차 상부의 에어컨 형상도 모사하였다. 총 해석 격자는 2,200,000개로 열차의 운동을 표현하기 위한 이동격자는 440,000개이고 나머지 부분인 유동장은 1,760,000개이다.

2.2 수치해석 방법 및 경계조건

열차의 운동을 모사하기 위해 이동 격자(Moving Mesh) 방법을 사용하였다. 또한 열차 운행에 의한 풍압해석은 3차원 압축성 난류 유동으로 가정하였다. 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

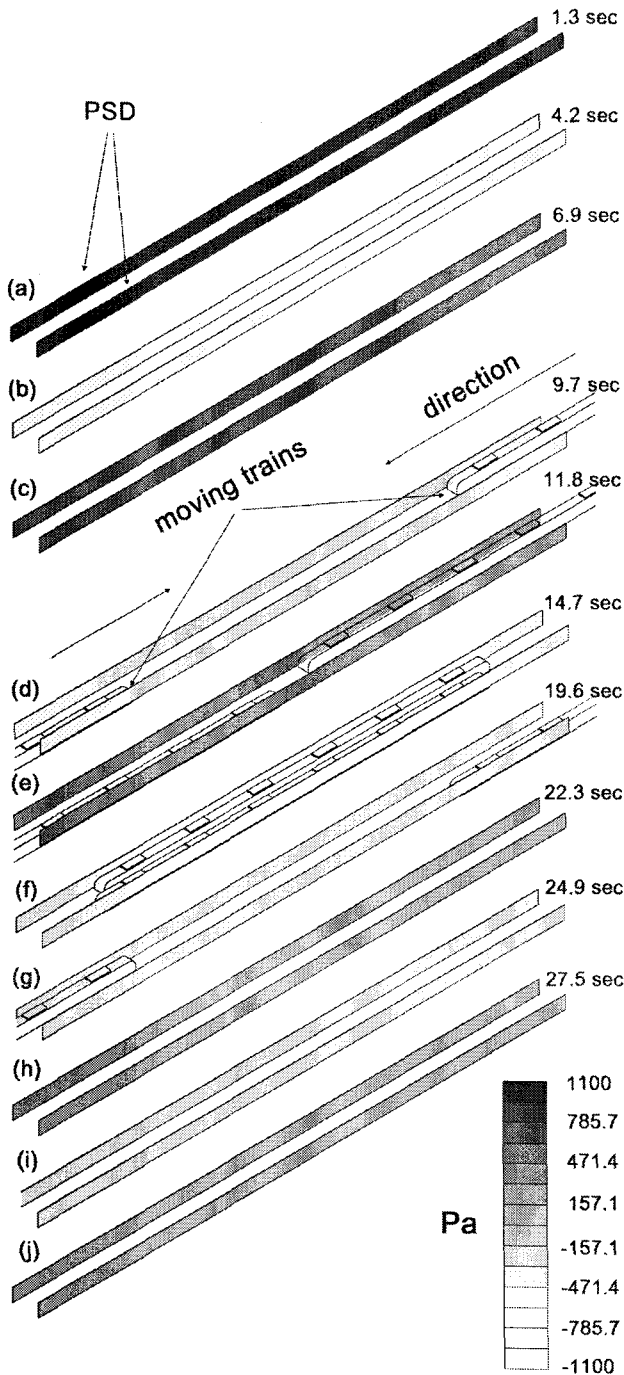


Fig. 5 Pressure distributions on PSD (case 5)

같은 효과가 발생하여 압력의 변화가 매우 커지므로 압축성 효과가 고려되어야 한다. 본 논문에서는 압축성을 고려하기 위하여 이상기체방정식을 사용하여 밀도를 구하였다. 또한 온도는 별도로 해석하지 않았기 때문에 등온으로 가정하여 압력과 밀도 관계식을 사용하였다. 한편 터널 양 끝단은 대기 압력 조건을 적용하였고 양 끝단이 아닌 다른 부분은 벽 조건이 적용되었다.

2.3 수치계산 조건

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. 수치해석을 위하여 상용 프로그램인 STAR-CD v3.24[10]를 사용했으며, Intel Xeon 2.4 GHz Linux Cluster 의 1개 CPU를 사용하여 Case 별로 약 60시간이 소요되었다.

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, F)으로 각각 양쪽 끝 부분과 가운데 부분을 관측 위치로 정하여 총 6곳의 관측위치에서 시간에 따른 압력 변화의 차이를 비교하였고, 두 번째는 PSD에 작용하는 압력 분포(contours)를 열차의 위치와 함께 시간에 따라서 연속적으로 도시함으로써 역사 내부의 압축과 팽창과로 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. 4는 열차의 운행 조건(Table 1)에 따른 관측위치(Fig. 3)에서의 압력 변화이다. 열차의 운행에 의해 발생하는 압축 및 팽창과는 Fig. 4와 같이 PSD에 양압이나 부압으로 작용하게 된다. 이 때, 같은 위치에 있는 이동 열차와 정차 열차 측의 PSD에서 압력 차이(A-B, C-D, E-F)는 최대 5 Pa 정도 발생하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 이동 열차와 정차 열차 측과 같은 PSD가 설치되어 있는 방향보다는 열차의 운행에 따라 열차 위치의 영향이 더 큰 것을 나타낸다.

3.1 열차 정차 (CASE 1 & 2)

Fig. 4 (a), (b)는 열차가 57 km/h의 속도로 감속하여 정차할 때 역사 내 정차열차가 없는 경우와 있는 경우의 시간에 따른 풍압 변화를 보인다. 열차가 역사에 가까이 접근함에 따라 압축과의 영향으로 PSD에 작용하는 압력은 양압과 부압이 교대로 반복되어 열차 선두가 역사에 진입하기 전에는 열차 출발 후 약 3초와 8초에 PSD에 부압이 작용하고, 열차 선두가 진입 터널을 지나고 역사에 진입한 후에는 열차 출발 후 약 11.8초에 열차의 선두부와 만나는 PSD영역(사각형 표식)의 압력이 부압으로 변하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 열차의 선두부가 지나가기 이전의 PSD영역은 압축과에 의한 양

압이 작용하지만 일단 선두부가 지나가면 팽창파로 인해 PSD에 작용하는 압력이 부압으로 변하기 때문이다. 정차열차가 있는 Case 2의 경우 열차가 통과하는 단면적이 감소하므로 압력은 Table 2와 같이 Case 1보다 소폭 상승한다.

3.2 열차 통과 (CASE 3 & 4)

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 사각형 표시의 압력이 양압에서 부압으로 변하는 것은 표시에 해당하는 PSD 영역이 열차의 선두부가 지나간 후에 팽창파의 영향을 받기 때문이다. 그리고 12초에서 15초 사이의 PSD에 작용하는 압력 중에서 삼각형(E, F) 표시(PSD 영역 중 열차의 선두부가 가장 마지막에 지나가는 끝 부분)이 다른 값보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 해당 지점(E, F)은 아직 열차의 선두부가 통과되지 않고 열차의 선두부가 접근하면서 압축파의 영향을 받는 지점이기 때문이다. 22초 이후에 열차가 PSD의 모든 영역을 지나고 역사를 빠져나가면서 PSD

에 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.

3.3 열차 교행 (CASE 5)

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 원형(C, D)표시의 압력 값이 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(C, D)의 압력이 부압으로 바뀌는 것은 열차의 선두부가 해당 지점을 지나간 후에 팽창파의 영향으로 부압이 작용하기 때문이다. Table 2와 같이 모든 운전 조건 중에서 열차 2대가 교행 하는 경우인 Case 5일 때 가장 큰 압력이 PSD에 발생한다.

이와 같이 상대식 승강장에 설치된 PSD에 미치는 풍압은 섬식 승강장[12]과 같이 열차의 속도와 밀접한 관계가 있다. 또한, 상대식 및 섬식 승강장 모두 열차가 역내를 통과하는 단면적에 따라 열차 운행으로 인한 압축 및 팽창파의 크기가 변하게 되며, 단면적이 작아질수록 더 큰 풍압이 PSD에 작용하게 된다. 이에 따라 같은 조건으로 열차가 운행되었을 때, 양방향 열차 선로가 같이 있는 상대식 승강장에 설치된 PSD가 더 작은 풍압의 영향을 받게 된다. 그러나 상대식 승강장의 경우 양방향 열차가 교차 운행이 가능하여 교차 운행시 열차 사이에 더 큰 압축 및 팽창파가 발생하여 더 큰 풍압이 PSD에 작용하게 된다.

4. 결 론

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 받

Table 2 Maximum pressure for each cases of train movement

Case	Max. positive pressure (kPa)	Max. negative pressure (kPa)	Speed (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 for the pressure on the PSD

Title	Pressure (kPa)	Speed (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

생하고 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 9호선 PSD의 설치에 대한 설계 및 시공 조건은 설계 안전 기준에 부합되며 적절한 설계가 이루어졌다고 생각된다.

참고문헌

- [1] 2001, 허남건, 김사량, "고속전철 열차풍 시뮬레이션," 설비공학논문집, 제18권, 제5호, pp.60-78.
- [2] 2001, 조두신, 허남건, 김사량, "한국고속전철(KTX)이 역사를 통과할 때 격벽의 높이에 따른 풍하중의 변화에 대한 수치해석 연구," 한국전산유체공학회지, 제6권, 제1호, pp.56-62.
- [3] 2004, Hur, N., Kim, S. R., Kim, W. and Lee, S., "Wind Pressure Transients in the Tunnel inside a Station Caused by a Passing High Speed Train," *KSME International Journal*, Vol.18, No.9, pp.1614-1622.
- [4] 1998, Hur, N., Kim, S. R., Kim, W. and Lee, S., "Wind Pressure Transients inside a Station Caused by a Passing High Speed Train," *Proc. of 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf.*, pp.173-176.
- [5] 2002, Ke, M.-T., Cheng, T.-C. and Wang, W.-P., "Numerical Simulation for Optimizing the Design of Subway Environmental Control System," *Building and Environment*, Vol.37, pp.1139-1152.
- [6] 2004, 정해권, 하만영, 김경천, 전충환, 최호진, 주재천, 문정만, 황성기, "PSD 설치에 따른 지하철 내부 유동장 계산," *대한기계학회 추계학술대회*, pp.1430-1435.
- [7] 2001, 김정엽, 신현준, 조정식, "지하철 정거장에서의 열차진입시 열차풍 해석," *대한설비공학회 하계학술발표회*, pp.791-795.
- [8] 2006, 이재열, 신광복, 류봉조, 김동현, 이은규, "열차 진입 시 풍압에 의한 완전 밀폐형 승강장 스크린 도어(PSD) 시스템의 구조 안정성 평가," *한국철도학회논문집*, 제9권, 제5호, pp.594-600.
- [9] 2007, 이명성, 원찬식, 허남건, "섬식 승강장에서 열차 운행에 의한 지하철 승강장 스크린 도어 풍압 해석," *한국전산유체공학회지*, 제12권, 제3호, pp.1-7.
- [10] 2004, STAR-CD Manual, Ver. 3.24, Computational Dynamics Ltd.