



# 열차 운행에 따른 상대식 승강장에서 지하철 승강장 스크린 도어 풍압해석

이 명 성,<sup>1</sup> 안 혁 진,<sup>1</sup> 원 찬 식,<sup>2</sup> 허 남 건<sup>\*3</sup>

## THE PRESSURE-TRANSIENT ANALYSIS ON THE PLATFORM SCREEN DOORS OF THE SIDE PLATFORMS IN A SUBWAY STATION WITH VARIOUS OPERATING CONDITIONS

Myungsung Lee,<sup>1</sup> Hyuk Jin Ahn,<sup>1</sup> Chan-Shik Won<sup>2</sup> and Nahmkeon Hur<sup>\*3</sup>

*The pressure-transient on platform screen doors in side platforms caused by passing trains with various operating conditions have been investigated numerically. The transient compressible three-dimensional flow simulations are performed with actual operating conditions of two trains by adopting moving mesh technique. To achieve more realistic results, the detailed shape of train and the subway station including tunnels connecting the adjacent stations are represented in the computational domain. Numerical analyses are carried out for cases considering arriving/passing/departing train with or without train stopped on the opposite track, and both trains on the move in opposite direction. From the numerical results, the maximum pressure on the platform screen doors, which is predicted in the case of two passing trains, satisfied the design standards for similar stations.*

**Key Words :** 풍압(Wind Pressure), 승강장 스크린 도어(Platform Screen Door, PSD), 상대식 승강장(Side Platform), 전산유체역학(CFD)

### 1. 서 론

지하철은 대도시 교통을 대표하는 운송 및 여객 수단으로써 신속성과 정확성, 안정성을 이유로 많은 시민들이 이용하고 있다. 지하철을 이용하는 시민이 점점 늘어나면서 지하철 역사에서의 안전사고와 화재사고의 위험성이 커지고 있다. 또한 지하철이 역사에 진입할 때의 열차풍은 승객에게 불쾌감을 줄 수 있으며, 심한 경우 이로 인한 인명 사고를 초래할 수 있다. 위와 같은 이유로 지하철 역사의 안전을 시설확보에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구 사항에 부합하는 기술로 선진국에서는 승강장 스크린 도어(Platform Screen Door, PSD)를 도입하여 사용하고 있으며, 현재 국내에서도 다양한 역사에서 적용하고 있고 향후 확대 설치될 예정이다. 다양한 효율성을 지닌 승강장 스크린 도어를 설치하기 위해서는 열

차에 의해 발생하는 열차풍 및 역사 내부의 풍압 환경에 대한 연구가 필요하며, 승강장 스크린 도어의 설계 조건이 안전 기준에 부합하는지 평가가 필요하다.

근래에는 전산유체역학의 발달로 인해 역사 내 풍압환경에 대해 실험적 연구와 더불어 수치해석을 통한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 정해권 등[1]은 사직역에서 열차 운행에 의해 PSD에 작용하는 압력을 수치해석하였고, 김정엽 등[2]은 단선터널 구조의 정거장에서 열차풍이 PSD에 미치는 압력과 기류 분포를 예측하였다. 또한 이재열 등[3]은 동래역에 열차가 진입 시 PSD에 미치는 풍압결과를 구조해석에 적용하여 구조 안정성 평가를 수행하였다. 또한 본 연구에 앞서 이명성 등[4,5]은 섬식 승강장과 상대식 승강장에서 지하철 운행에 의한 승강장 스크린 도어에 미치는 풍압에 대하여 수치해석을 수행하였다.

본 논문에서는 열차의 자세한 형상을 모델링하고 터널 구간을 해석 격자에 포함하여 보다 실제적인 해석을 수행하였다. 상대 선로에 정차 열차가 있는 경우와 없는 경우, 열차 1대가 진입/진출/통과하는 경우와, 열차 2대가 동시에 진입/진출/통과하는 경우에 대하여 수치해석을 수행하고, 열차풍에

1 서강대학교 기계공학과 대학원

2 정희원, 서강대학교 기계공학과

3 종신회원, 서강대학교 기계공학과

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



의해 PSD에 작용하는 압력을 분석하였다. 또한 풍압 해석 결과를 외국 PSD 설계 조건과 비교하여 설계의 타당성을 검토하였다.

### 2. 수치해석

#### 2.1 해석 대상

본 연구의 해석 대상인 지하철역은 상대식 승강장으로 양쪽으로 구분된 두 개의 승강장과 그 사이에 두 열차가 운행되는 선로로 구성되어 있다. Fig. 1의 역사 도면을 참고하여 승강장 스크린 도어와 역사 및 터널 내부의 기둥과 같은 역사 내의 건축물들을 실제 도면에 따라 모델링하여 해석 격자를 구성하였다. Fig. 2에는 전체 해석 격자를 나타내었다. 본 해석에서 열차 운행 시 터널에 의한 피스톤 효과를 고려하고, 열차의 운행에 의해 발생하는 유동을 충분히 발달시키기 위하여, 대상 역사와 이웃하는 두 역사 사이의 터널을 해석격자로 구성하였다. 이 때 이웃하는 두 역사 사이의 터널의 길이는 역사(L=205 m)의 5배 이고, 역사와 양쪽 터널로 구성되는 전체 해석격자의 총 길이는 2,255 m (11L, 열차 길이의 약 19 배)이다.

#### 2.2 해석 방법

열차의 운행을 모사하기 위해 이동 격자(Moving Mesh) 방법을 사용하였다. 해석 조건은 Table 1에 정리하였다. 풍압해석을 위한 열차 운행조건은 총 9가지로서 반대 선로에 정차 열차의 유무에 따라 각각 열차가 진입, 통과, 진출하는 경우(Case 1-6)와 두 열차가 각각 진입, 통과, 진출하는 경우(Case 7-9)이다. 열차 운행에 의한 풍압 해석은 3차원 압축성 난류 유동으로 가정하여 해석하였으며, 일반적인 수치해석 연구의

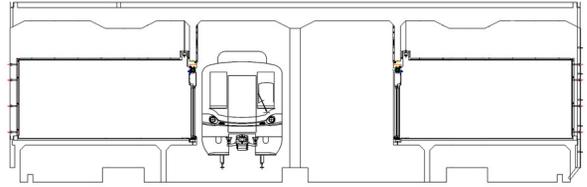


Fig. 1 Cross-sectional view of a subway station and a train

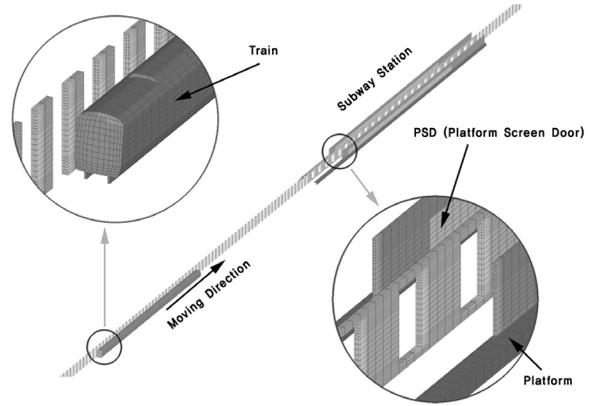


Fig. 2 Computational grid for the train and the subway station including the platform screen doors

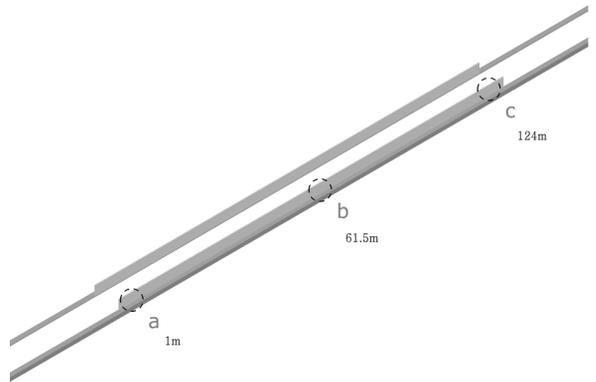


Fig. 3 Pressure measurement points on the platform screen door

Table 1 Cases for different driving condition of trains

Case	Train 1	Train 2
1	Deceleration	X
2	Penetration	
3	Departure	
4	Deceleration	Stoped at the station
5	Penetration	
6	Departure	
7	Deceleration	
8	Penetration	
9	Departure	

비압축성 유동은 열차가 진입하는 순간의 압력 변동은 잘 모사하는 반면 시간에 따라 압력이 변하는 유동 현상에 대한 결과는 부정확하기 때문에, 본 연구에서는 압축성 유동을 가정하여 수치 해석하였다. 터널이나 역사와 같이 밀폐된 공간에서 열차가 운행되는 경우 피스톤과 같은 효과가 발생하여 상대적으로 낮은 속도에서도 압력의 변화가 매우 커지므로 압축성효과가 고려되어야 한다. 수치해석에는 상용 프로그램

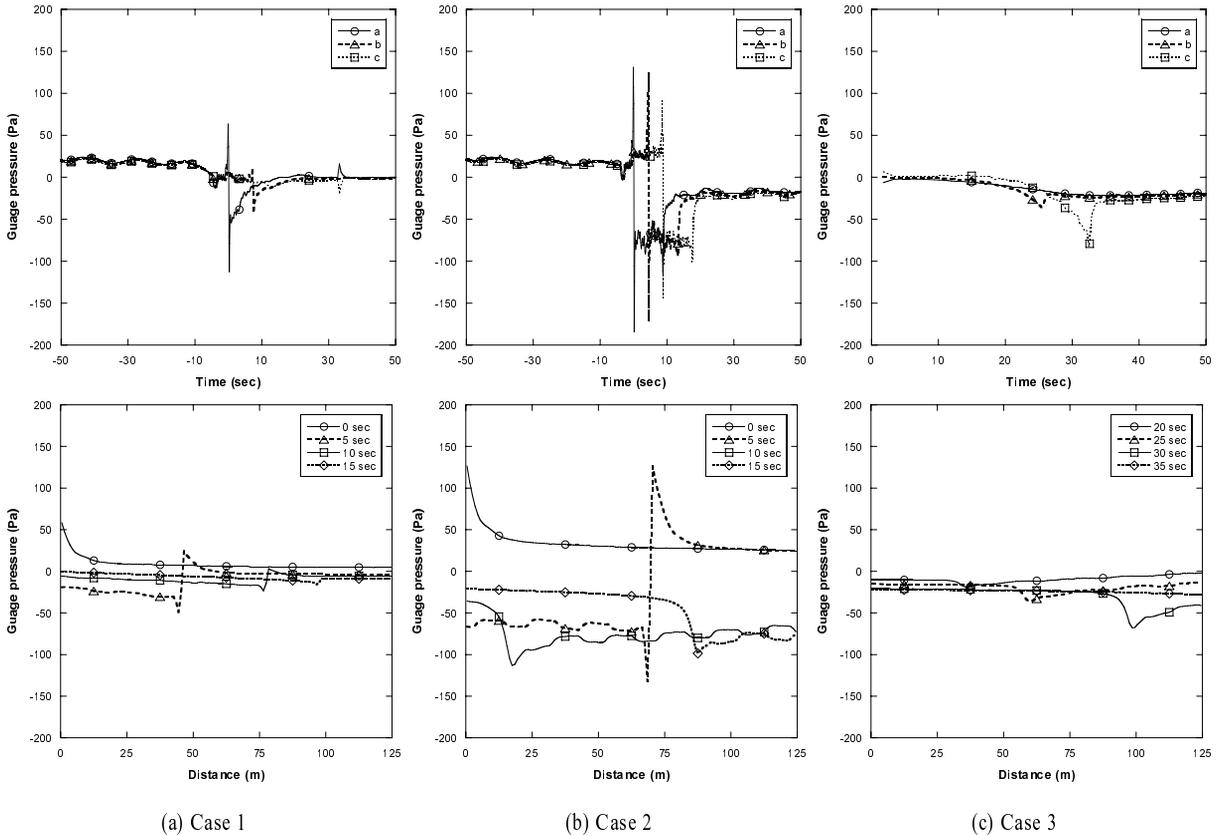


Fig. 4 Pressure transients histories at each measurement points on the platform screen door (upside) and pressure distributions along the platform screen door (down) of the Case 1-3 while the train arrives/passes/departs without the train stopped in the other track

인 STAR-CD V3.24를 사용했으며, 64 bit AMD Opteron 2.4 GHz 1 CPU Linux machine를 이용하였고, 계산에 소요된 시간은 Case별로 약 3일 정도이다.

### 3. 결과 및 토의

열차의 운행 조건에 따라 PSD에 작용하는 압력분포를 얻기 위하여 다음의 2가지 방법을 사용하여 분석하였다. Fig. 3에 도시된 압력 측정 지점에서 시간에 따른 압력 분포를 Case별로 비교하였고, 열차의 운행 조건에 따라 일정 시간에서 PSD의 길이 방향으로 작용하는 압력을 그래프로 도시하였다. 압력 측정 위치는 승강장 바닥에서 스크린 도어의 높이 방향의 중간 지점이다. 열차가 역사로 진입하거나 통과하는 경우일 때, 열차의 선두가 PSD와 처음 만나는 시점을 기점 (0.0 sec)으로 하였으며, 열차가 역사에서 진출하는 Case에서는 열차의 진출 시점을 기점으로 하였다.

### 2.1 반대편 선로에 정차 열차가 없는 경우(Case 1-3)

#### 2.1.1 열차 1대가 역사로 진입해 정차하는 경우(Case 1)

Fig. 4(a)에서 열차의 선두 부분에 걸리는 양압이 선두가 통과하는 순간 음압으로 바뀐다. 역사 내에 진입한 열차가 정차할 때까지 압력은 진동하고, 열차가 감속함에 따라 진동하는 압력의 크기가 감소한다. 이는 압축성 유동을 고려하였기 때문에, 압축파/팽창파의 진행에 따라 압력이 주기적으로 변동하고, 열차가 감속함에 따라 압력 변동이 소산되면서 PSD에 영향을 주기 때문이다. PSD에 작용하는 압력은  $+8.1 \text{ kgf/m}^2 \sim -12.0 \text{ kgf/m}^2$ 의 범위이다. PSD에 작용하는 양압은 열차가 통과하는 순간 급속하게 감소하여 음압으로 변한다. 열차가 감속하면서 양압에서 음압으로의 진동 폭이 점차 줄어들고, 열차가 완전히 정차하는 33 초 이후는 전 스크린 도어에 걸쳐 압력이 회복된다.

#### 2.1.2 열차 1대가 역사를 통과하는 경우(Case 2)

Fig. 4(b)는 상대 선로에 정차 열차가 없는 경우 열차 1대

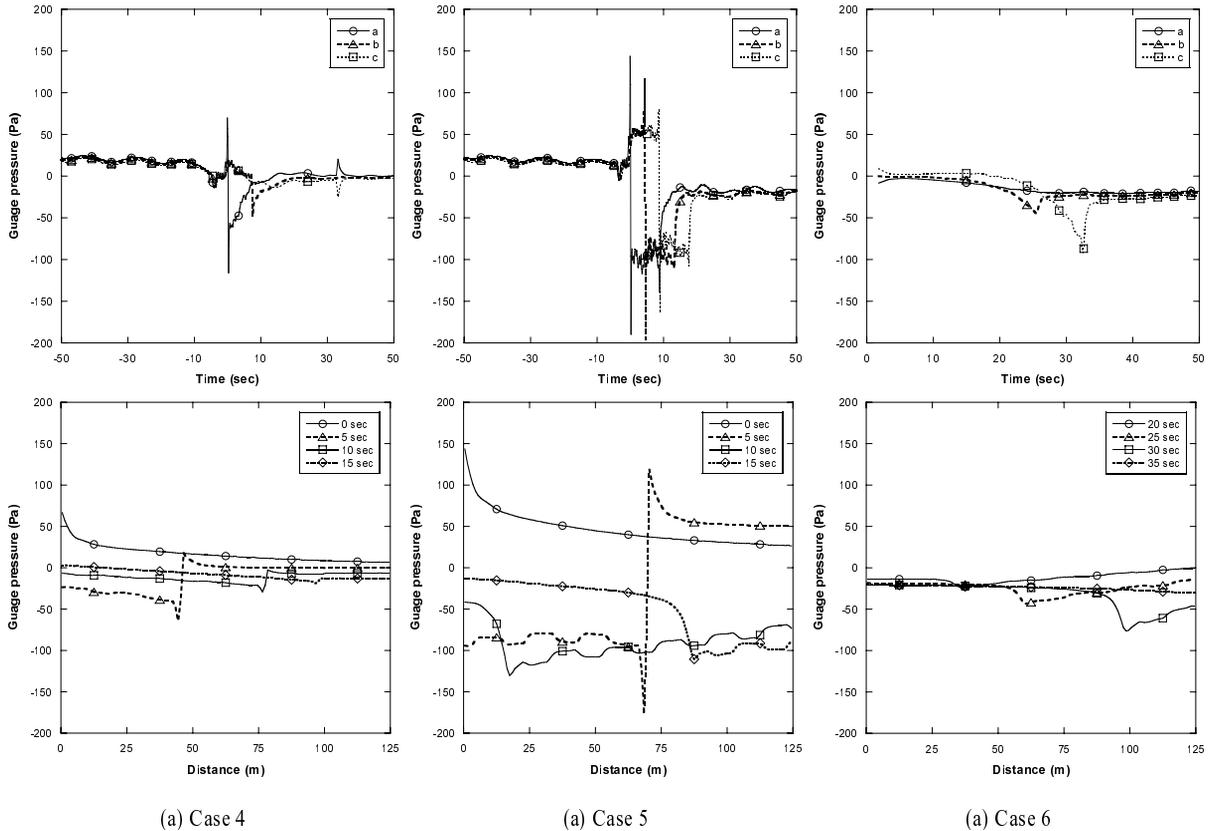


Fig. 5 Pressure transients histories at each measurement points on the platform screen door (upside) and pressure distributions along the platform screen door (down) of the Case 4-6 while the train arrives/passes/departs with the train stopped in the other track

가 역사를 최대 속도(50 km/h)로 통과하는 경우에 PSD에 미치는 풍압을 나타낸다. Case 1과 마찬가지로, 열차 선두의 앞부분에 가장 높은 압력이 발생하고, 열차 선두가 PSD를 지나가면서 압력이 급격하게 감소한다. Case 2와 같이, 반대편 선로에 열차가 정차해 있지 않은 경우 PSD에 작용하는 최대 압력 변동은  $+18.2 \text{ kgf/m}^2 \sim -20.4 \text{ kgf/m}^2$ 로 나타났다.

### 2.1.3 열차 1대가 역사에서 진출하는 경우(Case 3)

Fig. 4(c)와 같이 열차가 승강장에서 출발하는 순간부터 열차 뒷부분에 음압이 발생하는 것을 볼 수 있다. 열차가 역사를 완전히 빠져나가는 순간인 32 초에 가장 높은 음압( $-8.5 \text{ kgf/m}^2$ )이 PSD에 작용한다. 열차가 역사를 출발하는 경우에는 PSD의 길이 방향으로 음압이 점진적으로 발달하다가 다시 양압으로 회복된다. 열차 후미부에서 팽창된 공기로 인한 압력이 열차가 지나간 뒤 다시 회복된다.

## 2.2 반대편 선로에 정차 열차가 있는 경우(Case 4-6)

### 2.2.1 열차 1대가 역사로 진입해 정차하는 경우(Case 4)

Fig. 5(a)에서는 반대편 선로에 열차가 있는 경우, 열차가 역사로 진입할 때, PSD와 열차의 시점부가 처음 만나는 지점에서 최대 양압( $8.1 \text{ kgf/m}^2$ )이 발생하고, 열차의 선두가 통과한 직후에 최대 음압( $-12.1 \text{ kgf/m}^2$ )이 나타난다. 또한 터널에서 운행하는 열차에 의한 유동의 피스톤 효과로 인해 열차의 진행 방향으로 압축파/팽창파가 교대로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 열차가 감속함에 따라 압력의 변동은 소산되어, 열차가 완전히 정차하는 32초 이후에는 압력이 거의 회복된다. 상대 선로에 정차 열차 없는 경우에 역사에 정차하는 Case 1에서와 마찬가지로 PSD에 작용하는 양압은 열차의 선두에서 피스톤 효과에 의한 공기의 압축에 의해 발생한 것으로, 열차가 PSD의 한 지점을 지나갈 때, 열차 선두의 뒷부분과 만나는 PSD에서 압력이 상당히 감소한다. 열차가 감속함에 따라 양압에서 음압으로의 변동 폭도 또한 점차 줄어든다.

### 2.2.2 열차 1대가 역사를 통과하는 경우(Case 5)

Fig. 5(b)와 같이 열차가 역사로 진입하여 열차의 선두가

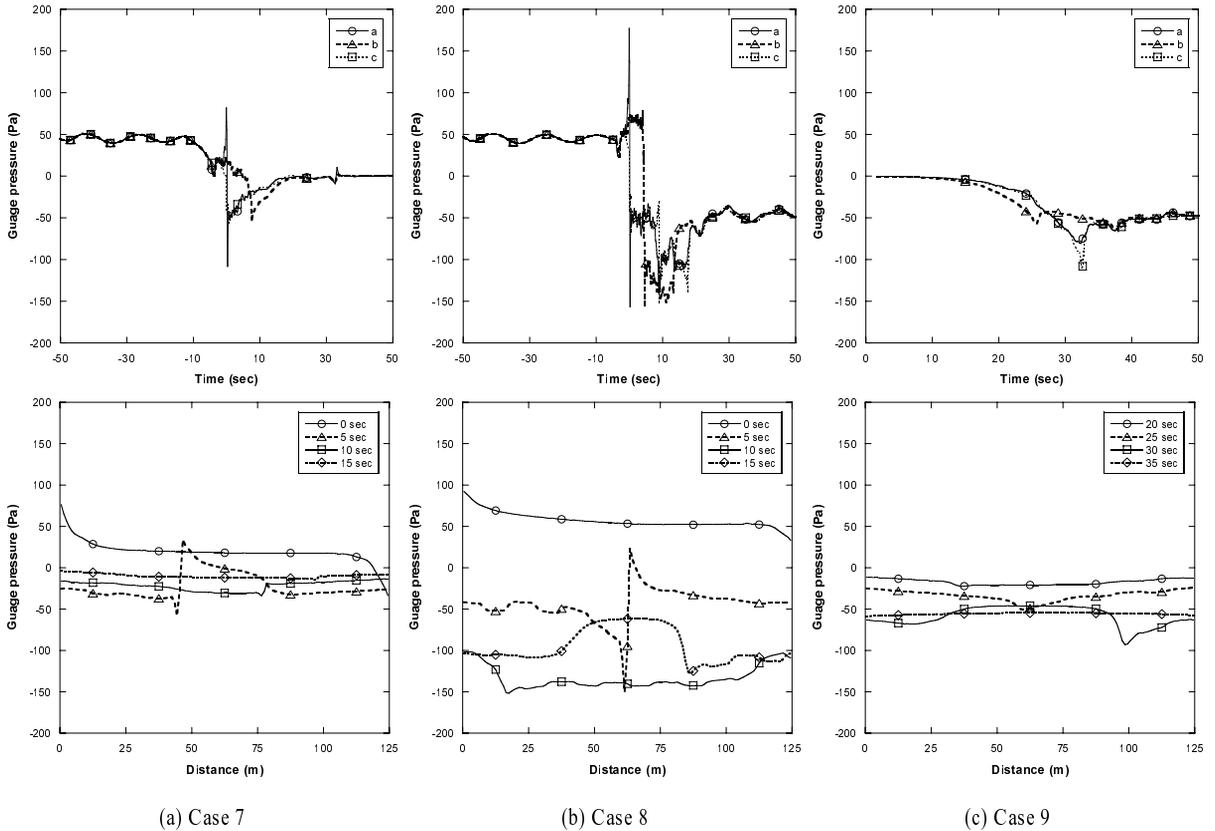


Fig. 6 Pressure transients histories at each measurement points on the platform screen door (upside) and pressure distributions along the platform screen door (down) of the Case 7-9 while both trains are arriving/passing/departing at the same time in opposite direction

PSD와 처음 만나는 순간에 최대 양압(16.8 kgf/m<sup>2</sup>)이, 선두가 지나간 후에 최대 음압(-22.7 kgf/m<sup>2</sup>)이 PSD에 작용한다. 압력의 변동은 열차가 역사를 벗어난 뒤에도 이어지게 되어 PSD에 영향을 미친다. 반대편 선로에 열차가 있기 때문에 열차가 역사를 통과할 때 유동 단면적이 감소하게 되므로 PSD에 작용하는 압력의 변동 폭은 Case 4에서 예측한 값을 상회하는 것을 알 수 있다. 이와 같이, 반대편 선로에 열차가 정차해 있는 경우, 열차가 역사를 최고속도로 통과할 때, PSD에 작용하는 압력 변동 폭은 +16.8 kgf/m<sup>2</sup> ~ -22.7 kgf/m<sup>2</sup>)이다.

2.2.3 열차 1대가 역사에서 진출하는 경우(Case 6)

Fig. 5(c)에서 역사를 벗어나는 순간에 PSD의 압력 측정 지점 중 c에 최대 음압(-9.5 kgf/m<sup>2</sup>)이 작용한다. Case 3과 비교했을 때 더 넓은 압력 범위를 갖는데, 이는 반대편 선로에 열차가 정차해 있기 때문에 단면적이 감소하였기 때문이다. 열차가 가속함에 따라 열차의 후미에서 공기의 팽창으로 인해 발생된 음압이 열차 진행방향으로 발달하고, 발달한 음압은 열차가 역사를 통과한 뒤에 점차 회복된다.

2.3 두 열차가 동시에 운행하는 경우(Case 7-9)

2.3.1 열차 2대가 역사로 진입해 정차하는 경우(Case 7)

Fig. 6(a)에서 두 열차가 역사로 진입하여 PSD와 처음 만나는 순간 최대 양압(10.5 kgf/m<sup>2</sup>)이 발생하였고, 열차의 선두가 통과한 직후에 최대 음압(-11.8 kgf/m<sup>2</sup>)이 PSD의 시점부(a)에 나타났다. 이는 터널에서 운행하는 열차에 의한 유동의 피스톤 효과 때문에 열차의 진행 방향으로 압축파/팽창파가 교대로 발생하기 때문이다. 열차가 감속함에 따라 압력의 변동이 소산되어 열차가 완전히 정차하는 35초 이후에는 압력이 거의 회복된다. 이때 최대 양압이 Case 1, 4 보다 크게 작용하는 이유는 열차 한 대가 운행할 때보다 2 대가 운행 할 때 열차 앞의 공기가 더 많이 압축되기 때문이다. Case 1, 4에서와 마찬가지로 PSD에 작용하는 양압은 열차의 선두에서 피스톤 효과에 의한 공기의 압축에 의해 발생한 것으로, 열차의 선두가 통과하는 지점에서 상당히 감소하여 음압으로 바뀐다.

2.3.2 열차 2대가 동시에 역사를 통과하는 경우(Case 8)

Fig. 6(b)에서 두 열차가 역사로 진입하여 최고 속도로 교



행할 때, 두 열차의 선두가 만나기 직전에 최대 양압(22.3 kgf/m<sup>2</sup>)이, 두 열차의 선두가 서로 지나친 직후 최대 음압(-19.5 kgf/m<sup>2</sup>)이 PSD에 작용한다. 압력의 변동은 열차가 역사를 벗어난 뒤에도 이어지게 되어 계속 영향을 미친다. 열차의 진행 방향인 서로 다른 반대 방향에서 발달한 양압은 두 열차가 교행한 직후에 급격하게 음압으로 변한다. 이 때 압력의 변동폭은 본 연구에서 고려한 모든 Case에서 얻은 결과중에서 최대값을 나타낸다. 두 열차가 역사에 진입하기 시작할 때 PSD의 시작부분에서 압력은 가장 큰 폭으로 상승하고, 두 열차가 교행한 직후에 압력은 크게 감소하여 가장 높은 음압이 PSD에 작용한다. 이에 따라, 본 연구에서와 같이 상대식 승강장 형태인 역사에 PSD를 설치할 경우, Case 8에서 나타나는 압력 범위(+22.3 kgf/m<sup>2</sup> ~ -19.5 kgf/m<sup>2</sup>)를 만족하는 설계 및 시공이 이루어져야 한다.

2.3.3 열차 2대가 동시에 역사에서 진출하는 경우(Case 9)

Fig. 6(c)와 같이 두 열차가 동시에 출발하여 역사를 벗어나는 순간 측정 지점 c에 최대 음압(-16 kgf/m<sup>2</sup>)이 작용한다. 본 해석 Case를 Case 3, 6과 비교할 때 더 넓은 압력 범위를 갖는 이유는 열차 한 대가 운행할 때보다 2 대가 서로 반대 방향으로 역사를 빠져 나가면서 피스톤 효과가 더 강하게 작용하기 때문이다. 열차가 출발하여 가속하면서 열차의 후미에서 팽창된 공기로 인해 발생하는 음압이 열차 진행방향으로 발달한다. 이 때 발달한 음압은 열차가 역사를 빠져나간 이후부터 점차 회복된다.

Table 2 Maximum predicted pressure on the PSD for each cases

Case	Operating Condition	Pressure (kgf/m <sup>2</sup> )
1	Deceleration	+8.1 ~ -12.0
2	Penetration	+18.2 ~ -20.4
3	Departure	+0.7 ~ 8.5
4	Deceleration	+8.1 ~ -12.1
5	Penetration	+16.8 ~ -22.7
6	Departure	+0.9 ~ -9.5
7	Deceleration	+9.7 ~ -11.8
8	Penetration	+22.2 ~ -19.5
9	Departure	+0.1 ~ -11.5

4. 결 론

본 연구에서는 여러 가지 열차운행 방식에 따른 상대식 승강장에 설치되는 승강장 스크린 도어(Platform Screen Door, PSD)에 작용하는 풍압을 수치 해석하였다. 풍압 해석을 위한 열차 운행 조건은 두 열차의 운행 조건에 따라 크게 세 가지로 분류되었다. 첫째, 반대편 선로에 정차한 열차가 없을 때 열차가 승강장에 진입하여 정차하는 경우, 최고 속도(50 km/h)로 통과하는 경우, 승강장에 정차해있던 열차가 출발하여 터널로 빠져 나가는 경우를 고려하였다. 둘째, 반대편 선로에 정차한 열차가 있을 때도 마찬가지로 위의 세 가지 경우(진입, 통과, 출발)를 수행하였다. 마지막으로 두 열차가 승강장에 진입하여 동시에 정차하는 경우, 최고 속도로 교행하는 경우, 정차해 있던 두 열차가 출발하여 터널로 빠져 나가는 경우를 고려하였다.

해석 결과 열차가 승강장을 통과하는 경우인 Case 2, 5, 8에서 최대 양압과 최대 부압이 예측되었다. 최대 음압은 반대편 선로에 열차가 정차해 있는 경우, 열차가 역사를 최고속도로 통과하는 Case 5에서 -22.7 kgf/m<sup>2</sup>로 나타났다. 그리고 최대 양압은 두열차가 동시에 최고속도로 역사를 교행하는 경우인 Case 8에서 +22.3 kgf/m<sup>2</sup>로 예측되었다. 두 대의 열차가 역사를 향하여 동시에 운행하는 Case 8에서는 한 대의 열차가 운행하는 Case 5보다 열차풍에 의한 압축효과가 증가하므로 상대적으로 높은 양압을 볼 수 있다. 본 연구에서 수행된 모든 해석 Case 중에서 예측된 최대 양압과 최대 부압은 Table 3과 같은 외국의 실제 적용 사례에 나타난 풍압기준에도 부합하는 충분한 설계조건임을 나타낸다. 또한 실제적인

Table 3 Foreign standards on the PSD[6]

Title	Pressure (kgf/m <sup>2</sup> )	Train velocity (km/h)	Company name
Hong Kong MTRC TKE Line	+153 ~ -92	80	Nabco
Hong Kong KCRC WR Line	±275	120	Nabco
Taiwan Xinzhuang Line	±176	80	Nabco
Taiwan Lucho Line	±122	80	Nabco
Bangkok Blue Line	±76	80	Faiveley
Shanghai Line No. 4	±92	90	Faiveley
LAR MTRC Hong Kong	+141 ~ -332	110	Faiveley



설계조건이  $138 \text{ kgf/m}^2$ 인 것을 고려하면 시뮬레이션 결과  $-22.7 \text{ kgf/m}^2 \sim +22.3 \text{ kgf/m}^2$ 의 풍압이 작용하므로 약 6의 안전율로 설계되었으므로, 해석 대상인 상대식 승강장에 설치되는 승강장 스크린 도어의 설계 및 시공 조건은 여러 가지 열차 운행조건을 고려할 때 설계 안전 기준에 부합하다고 생각된다.

### 참고문헌

- [1] 2004, 정해권, 하만영, 김경천, 전충환, 최호진, 주재천, 문정만, 황성기, “PSD 설치에 따른 지하철 내부 유동장 계산,” *대한기계학회 추계학술대회논문집*, pp.1430-1435.
- [2] 2001, 김정엽, 신현준, 조정식, “지하철 정거장에서의 열차 진입시 열차풍 해석,” *대한설비공학회 하계학술대회논문집*, pp791-795.
- [3] 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.
- [4] 2007, 이명성, 원찬식, 허남건, “섬식 승강장에서 열차 운행에 의한 지하철 승강장 스크린 도어 풍압해석,” *한국전산유체공학회지*, 제12권, 제3호, pp.1-7.
- [5] 2007, 이명성, 이상혁, 허남건, “상대식 승강장에서 열차 운행에 의한 지하철 승강장 스크린 도어 풍압해석,” *한국전산유체공학회지*, 제12권, 제4호, pp.1-6.
- [6] 2006, 허남건, 원찬식, 이명성, *지하철 2호선 서울대 입구역 열차 운행에 따른 풍압 해석*, (주)삼중테크 보고서.
- [7] 2004, CD-adapco, *STAR-CD Version 3.24 Methodology*, Computational Dynamics Ltd.