PSD 설치에 따른 지하철 내부 유동장 계산

정해권[†] · 하만영[*] · 김경천[*] · 전충환[*] · 최호진[**] · 주재천[***] · 문정만[***] · 황성기[****]

Simulation of Fluid Flow Inside the Subway Station with PSD

Hae-Kwon Jeong, Man-Yeong Ha , Kyung-Chun Kim, Chung-Hwan Jeon, Ho-Jin Choi, Jae-Chun, Joo, Jeong-Man Mun and Seong-Ki Hwang

Key Words: PSD(플랫폼 스크린 도어), Train velocity(열차속도), Train wind(열차풍)

Abstract

According to the development of the economy and to the improvement in life quality, it is increased for the desire for the comfortable circumstance in the underground subway station. And recently, an accident, fire, suicide and so on have been risen. An advanced countries have introduced PSD, and they satisfies with the effect of PSD. The optimum design standard to set up PSD have to satisfy the by train wind beyond the maximum static pressure. This paper includes the maximum static pressure what can be applied to the PSD installation design.

1. 서 론

경제가 발전하고 이에 따라 시민들의 의식이 높아감에 따라 지하철 승강장의 쾌적한 환경요구에 대한 욕구가 증대되고 있고, 근래에 들어서는 지하철의 안전사고가 연이어 발생함에 따라 PSD(Platform Screen Door)의 도입의 추진이 확대되고 있다. PSD는 본선과 승강장을 분리하여 화재발생시 고온의 연기와 열을 차단하고 비상시 안전한 대피통로로 제공 될 수 있을 뿐만 아니라 평상시는 승객의 추락방지 및 자살시도의 차단역할을 한다. 이미 선진국들은 PSD를 도입하여 지하철 열차풍에 의한 분진, 소음, 안전사고에 대하여 많은 성과를 거두고 있을 뿐만 아니라 공조시스템의 설치나 운전에서도 에너지를 절약함으로서 PSD의 우수성을 보이고 있다.

본 연구에서는 열차풍에 의해 PSD에 미치는 풍압조건을 도출하고, 해외 선 사례와 비교분석 후 PSD설치에 있어서 최적의 내풍압조건을 산출하고자 한다.

현재까지 지하철 환기나 재연에 관한 Simulation은 SES(Subway Environment Simulation)를 이용하였다. SES는 1차원 계산을 수행한 후 Database를 통하여 3차원 조건을 적용하는 방식을 채택하였으나, 3차원 해석에 있어서 교통류에 대한 묘사에 한계가 있어 실질적인 해석이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 FLUENT를 이용한 본 연구에서는 3차원 모델링을 통하여 실제 현상에 가장 근접한 환경을 조성하였으며, MDM(Moving Deforming mesh)기법을 이용하여, 실제 열차 주행을 묘사하였으며, 보다 현실적인 결과를 얻기 위하여 2차원 경향테스트를 실시하여 3차원 결과를 보정하였다.

† 부산대학교 기계공학과 대학원
E-mail : haegoni@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3090 FAX : (051)512-9835
* 부산대학교 기계공학부
** 부산대학교 기계공학과 대학원
*** 대림 I&S (주)
**** 부산교통공단

2. 본론

2.1 지배방정식

본 연구에서는 상용 program인 FLUENT 6.1.22를 사용하여 열차 주행 및 유동해석을 수행하였다. 유동장 해석의 경우, 지배 방정식은 비압축성 유동해석을 위한 Continuity 방정식과 Navier-Stokes 방정식으로 구성되며, 열차 벽면과 PSD벽면 근처에서 운동량의 전달 특성에 의해 중요한 난류유동이 형성될 수 있기 때문에 $k-\varepsilon$ model을 이용하여 해석하였다. 시간에 따른 열차의 위치와 속도에 유동장이 영향을 받으므로 Unsteady상태로 해석하였다. PSD를 경계로 승강장과 선로부분이 격리되어있고, 열차풍에 의한 외부 도입 기류는 실제 승객들이 대기하는 장소에 미치지 못하며, 그에 따른 온도변화는 고려할 필요가 없기 때문에 에너지 방정식은 포함시키지 않았다.

본 연구에서 사용한 비 압축성 유체의 비정상 및 2차원 질량 및 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \qquad \text{-- (1)}$$

$$\rho\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left\{\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right\} - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{u_i' u_j'}) \qquad \text{-- (2)}$$

여기서 $-\rho\overline{u_i u_j}$ 는 Reynolds응력으로 Boussinesq 가정에 의해 다음과 같다.

$$-\rho\overline{u_i u_j} = \mu_i\left[\frac{\partial u_i}{\partial u_j}+\frac{\partial u_j}{\partial u_i}\right] - \frac{2}{3}\left[\rho k + \mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right]\delta_{ij} \qquad \text{-- (3)}$$

μ_i 는 난류량 전달방정식에서 얻어지는 k, ε 로 표현된다.

대기류 해석 측면만을 고려하여, Standard $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였다.

$$\rho\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + G_k - \rho\varepsilon$$

$$\rho\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \text{-- (4)}$$

G_k 는 난류응력에 의한 난류운동에너지 생성항으로, $G_k = \mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ 로 표현된다.

Eddy Viscosity μ_t 는 $k-\varepsilon$ 모델에서 난류운동에너지 k 와 난류 에너지 소산률 ε 으로 표시하며, 다음과 같이 표현한다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

각 전달 방정식 식(4)에서 사용되는 모형상수들의 값은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09,\ C_{1\varepsilon} = 1.44,\ C_{2\varepsilon} = 1.92,$$
$$\sigma_k = 1.0,\ \sigma_\varepsilon = 1.3$$

2.2 Moving Deforming Mesh 기법

MDM(Moving Deforming Mesh)에서 일반적인 스칼라 ϕ, 임의의 검사체적 V 에 대한 보존방정식의 적분형은 다음과 같다..

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho\phi dV + \int_{\partial V}\rho\phi(\mathbf{u}-\mathbf{u}_g)\cdot d\mathbf{A} = \int_{\partial V}\Gamma\nabla\phi\cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \qquad \text{-- (5)}$$

강체의 움직임을 표현하는 MDM에서 물체의 움직임을 표현하는 기법은 2가지 종류가 있다.

- Spring-based smoothing
- Dynamic layering

본 연구에서는 spring-based smoothing기법을 이용하여 simulation하였다.

이 기법에서 두개의 노드는 sping효과를 내는 가상의 선으로 연결이 되어있다. 경계가 운동을 하기 전에 각각의 노드는 최초 지정된 위치를 유지하고 있다. 각 경계에 위치한 노드에 변위가 생기면 적정한 비율에 의해 가상의 선이 spring효과를 내면서 인접노드의 위치를 변화시키는 것을 원리로 한다.

노드의 움직임을 지배하는 Hook's law는 다음과 같이 기술된다.

여기서, $\Delta\mathbf{x}_i$ 와 $\Delta\mathbf{x}_j$ 는 노드의 변위, i 노드의 인접노드 j 의 변위이다. n_i 은 노드 i 와 연결된 인접 노드의 개수이고, k_{ij} 은 노드 i와 j사이의 스프링상수이고 다음과 같이 표현된다.

$$k_{ij} = \frac{1}{\sqrt{\left|\vec{x_i} - \vec{x_j}\right|}}$$

2.3 경계 조건

전체 계산영역은 Fig. 1과 같으며, 1.8 : 245.4 : 1 (x:y:z) 로 종횡비가 크게 설정되어있다. 이러한 조건에서 열차의 위치를 실제의 조건과 동일하게 설정할 경우 격자가 600만개 이상 소요되기 때문에 계산시간과 computing power에 결정적인 문제가 발생한다. 따라서 열차는 터널 및 승강장 중앙에 위치하도록 배치하고, 직선으로 움직이도록 설정하였다.

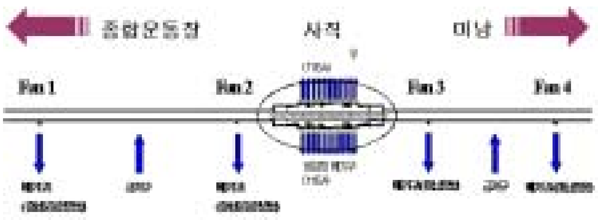


Fig. 1 계산 영역 및 덕트의 위치

격자의 구성은, 종횡비를 극복하고, MDM을 표현하기 위한 격자를 형성해야하므로, 등간격 비정렬격자를 사용하였다.

PSD로 승객 대기 지역과, 선로지역이 격리되기 때문에 승객 대기 지역은 계산영역에 포함시키지 않았다.

아래의 Table 1, Table 2의 경계조건, 초기 설정, 물성치 값은 모든 case에 동일하게 적용이 된다. 단 2차원 경향테스트의 경우 사직역 바닥으로부터 1m지점에서의 단면을 계산에 이용하였으며, 열차의 위치나 제원은 동일하고, 승강장 하부에서의 배기구는 제외하였다.

Table 1 터널지역 경계조건

계산영역	본선	본선	비고
총길이(m)	612.8	612.8	승강장 기준
급기구 위치(m)	373.6	309.6	
급기구 댐퍼면적(m^2)	6.4×3.2	6.4×3.2	
급기 유량(kg/s)	106	184	
배기구 위치(m)	122.4, 624.8	122.4, 538.4	
배기구 댐퍼면적(m^2)	4.8×2.4	4.8×3.2	
열차 초기 위치(m)	624.8	624.8	

Table 2 승강장 지역 경계조건

계산영역	지하 승강장	비고
총길이(m)	148.8	
배기구 수(개)	11 × 2	좌우측 (각각11개)
배기구 댐퍼면적(m^2)	0.8 × 0.4	
PSD단면적(m2)	297.6	

승강장에서 본 PSD설치 위치는 Fig. 2와 같으며,승강장에 진입하는 열차와는 400mm 간격을 두었다. 열차의 경우 실제 Rounding된 열차의 형상과는 다르게, 최대의 항력을 받도록 직사각형으로 모델링하였다.

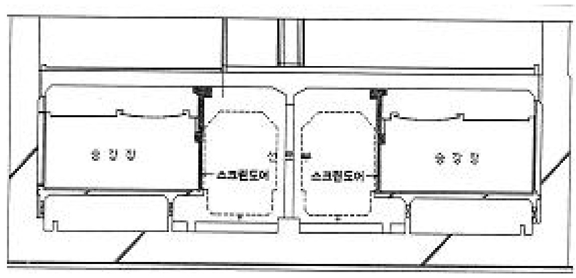


Fig. 2 승강장 단면도

열차의 주행은 Fluent 프로그램에서 지원되는 MDM(Moving Deforming Motion)모듈을 사용하였다. 이 모듈은 지하철을 하나의 강체로 생각하여, 주어진 속도와 방향으로 실제 이동하면서 주위의 압력장과 속도장을 실시간으로 표현하는 모듈이다. 지하 구간에서는 2가지 case에 대하여 계산하였다.

첫 번째는 등속주행, 두 번째는 실제 지하철의 운행속도를 고려한 감속운행이다. FLUENT의 UDF(User Defined Function)을 이용하여 등속 주행은 부산 지하철 3호선이 가질 수 있는 최고의 속도인 22.4 m/s(80km/h)의 동일한 속도로 승강장을 통과하도록 프로그래밍 되어 있으며, 감속주행은 그림 Fig. 3과 같이 등속주행 후 일정가속도로 감속하여, 승강장 중앙에서 정지, 다시 가속 후 등속에 이르는 과정으로 표현하였다.

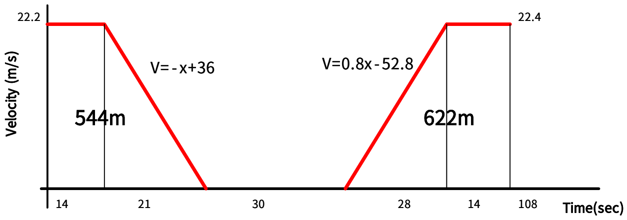


Fig. 3 열차 주행 속도분포
(Non-Uniform Velocity)

PSD에 가해지는 풍압을 결정하는 중요한 요인 중의 하나가 승강장 진입속도이다. 본 계산은 등속주행시 80km/h, 감속주행시 60km/h로 승강장에 진입하는 것으로 표현하였다.

2차원 경향테스트에서도 이 조건은 그대로 사용되었다.

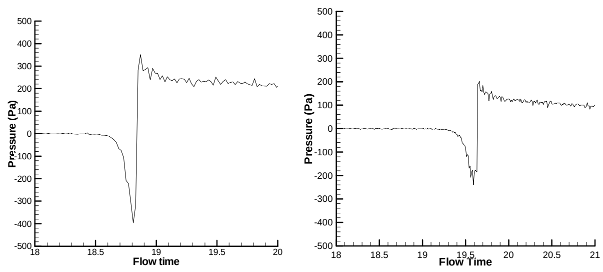
3. 계산 결과

3.1 3차원 해석

실제 열차의 승강장 진입시 PSD에 미치는 풍압을 계산하였으며, 앞에서도 언급하였듯이 2차원 경향테스트를 통하여 보정하였다.

Fig. 4(a)는 열차가 승강장내 진입 직전·후 시간대에 대한 그래프이다. 18.5초에서 승강장에 가장 근접하여, 승강장에 진입함과 동시에 PSD 전체에 걸리는 압력은 최저로 감소하며, 승강장 진입 직후에 최대압력으로 상승한다. 이후 압력이 서서히 감소하는 경향을 보이며, 이 또한 광주 지하철역 실측결과와 비슷하다.

Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)와 마찬가지 시점에서의 그래프이다. 등속 주행에 비해 열차의 승강장 진입 시점이 약 1초정도 늦다는 것을 알 수 있다. 열차 주행 조건(속도)에서 보았듯이, 승강장 근처에서 감속을 실시하며, 승강장 통과속도는 60 km/h 정도 이다. PSD의 압력 분포는 등속 주행과 같은 경향성을 가지며, 단지 절대값의 차이가 있을 뿐이다. 충분히 예상할 수 있는 결과로써, 베르누이 방정식(V2∝P)에 의해 진입속도가 약 20km/h가 감소하였기 때문에, 압력은 약 200 Pa정도 감소되어야 한다. 이론적으로도 타당한 결과가 도출되었다. 이 결과에 따르면, 광주 지하철(금남로4가)에서의 승강장 진입속도(약 33km/h)를 고려한다면, 63.1 Pa이 된다. 실측치와 비교가 가능한 계산 결과이다.



(a) Uniform Train Velocity (b) Non-Uniform Train Velocity

Fig .4 열차 주행시 PSD 평균압력 분포

3.2 2차원 경향 테스트

본선 및 승강장의 길이에 비해 열차와 터널 벽 사이의 간격이 아주 작기 때문에 3차원 수치 계산은 열차를 터널 중앙에 위치시킨 후 실시하였다. 실제와 동일한 위치에 열차를 위치시키면 격자수가 600만개 이상으로 늘어날뿐더러 계산을 위한 Time Step이 0.001초 미만으로 작아지기 때문에 엄청난 계산시간이 요구된다. 이를 보완하기 위해 2차원 경향테스트를 추가하여 보정함으로써 보다 실제에 가까운 경우에 대해 결과값을 도출하였다.

2차원 경향테스트는 다음과 같은 과정으로 실시하였다.

- 열차의 위치에 따른 PSD에 미치는 최고압력의 상관관계.
- 열차위치를 터널 중앙으로부터 400mm씩 이동 총 6개의 CASE를 계산.
- 등속, 감속의 경우 각각 계산 수행.

3차원 모델링과 동일한 크기의 2차원 평면으로 모델링 하였으며, 2차원이라는 특성을 고려, 승강장내 배기구는 생략하였다. 본 경향테스트에서는 PSD에 미치는 압력의 절대값이 아닌 본선 내 열차 위치(진행방향에 수직)에 따른 PSD압력변화에 초점을 두었다. 본선 중심으로부터 6개의 단계로 터널벽으로 열차 위치를 변경(Fig. 5)하여 계산을 반복 수행하였다.

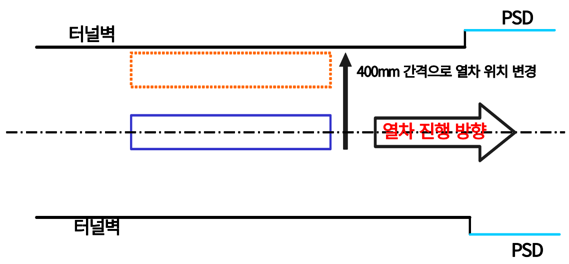
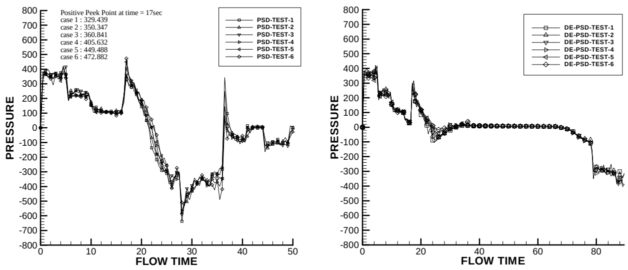


Fig. 5 2차원 열차 위치에 따른 PSD 압력변화 경향 테스트

Table 3 2차원 경향테스트 - 열차위치

TEST	열차 위치	비고
CASE 1	0	본선 중앙
CASE 2	400 mm	
CASE 3	800 mm	
CASE 4	1200 mm	
CASE 5	1600 mm	
CASE 6	1800 mm	터널벽면과 400mm 유지

본 경향테스트의 목적은 3차원 계산에 있어서, CASE 6과 같이 터널벽과 열차 사이의 거리를 400mm로 유지하게 될 때 사용되는 격자의 수가 최소 600만개에 이르기 때문에 계산 시간과 용량 문제로 계산하는데 큰 어려움이 있기 때문에 상대적으로 계산시간을 단축할 수 있는 2차원 테스트를 통하여, 열차의 위치에 따른 PSD평균압력의 최대치를 고려, 열차의 위치와 압력과의 상호관계를 알아내어 3차원 계산에 보정하는 것을 목적으로 하였다.

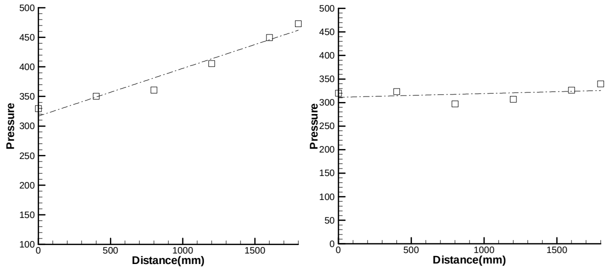


(a) Uniform Train Velocity (b) Non-Uniform Train Velocity

Fig. 6은 열차의 등속, 감속 주행시 열차 위치에 따른 PSD의 압력분포를 나타낸다. 모든 경우 열차의 위치에 관계없이 동일한 압력분포를 가진다.

Fig. 6 Case별 압력 분포

열차가 출발할 때부터 PSD에 미치는 압력은 큰값을 가지나 차츰 그 값이 줄어든다. 압력이 감소하는 지점은 본선 내 환기구 근처이며, 승강장 진입시에는 3차원 결과와는 다른 경향을 가진다. 이는 3차원계산과 비교했을 때, 본선 내 송풍 조건은 동일하게 주었으나, 승강장내 배기가 없으며, 승강장에서의 공간적인 확장성이 3차원에 비해 작기 때문으로 판단된다.



(a) Uniform Train Velocity (b) Non-Uniform Train Velocity

Fig. 7 열차 위치에 따른 PSD 압력분포

Fig. 7은 열차의 위치(터널 중심으로부터 이격거리)에 따른 PSD면적평균압력 분포를 나타낸다. 전체적으로 선형성을 가지며, 감속의 경우, 기울기가 0에 가깝다. PSD에 미치는 최대압력을 계산하려할 때 Fig. 7(a)의 선형성을 3차원 등속 주행 계산 결과에 적용한다면, 보다 신뢰성 있는 압력값을 얻을 수 있을 것이다.

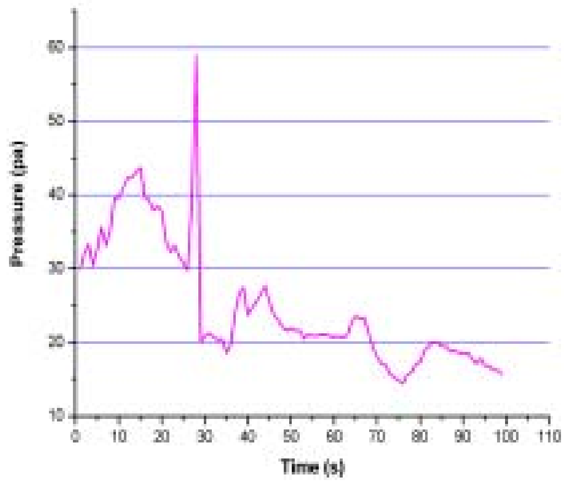


Fig. 8 광주 지하철(금남로4가) 실측데이터

4. 결론 및 향후 전개 방향

최초 3차원 계산 결과는 실제와는 다른 열차 배치를 가지고 있다. 따라서 바로 그 결과를 PSD 설계에 적용한다는 것은 약간의 무리가 있다. 따라서 2차원 계산을 통한 보정이 필요하다. Fig. 7의 데이터를 이용하여, 3차원 등속 주행 결과를 선형 보간하면 PSD 면적평균압력은 559.8Pa이 된다.

이를 검증하기 위해 실측치에 적용을 해보면, 위의 3 ㅏ원 계산결과로부터 실측치를 유도했을때 58.8Pa . 2 ㅏ원 경향테스트로부터 계산되어진 PSD ㅑ력을 가지고 실측치를 유도했을때, 78.72Pa ㅣ 도출된다.

Fig. 8은 광주 지하철(금남로4가) 승강장에서 열차 진입시(30km/h) 측정한 데이터이다. 열차가 승강장에 진입한 후 최고 압력이 발생하며 그 수치는 59 Pa에 이른다. 수치 계산 결과와 비교하였을 때 수치계산이 약간 높게 나타나는 이유는 금남로4가 승강장이 섬식의 형태이므로 상대식인 경우보다 열차풍에 의해 승강장으로 유입되는 유량이 작고, 승강장의 크기가 작기 때문이다. 이 모든 차이점을 고려했을 때 본 수치계산 결과는 오차범위 ± 6.8%의 신뢰성이 있다.

Table 4 Loading requirement references for PSD design pressure

Subway Station	PSD design Pressure	Train Velocity
Bankok Blue Line	±750 Pa	80 km/h
Shanghai Line 4	±900 Pa	90 km/h
Guangzu Line 1	+1800 Pa to -2300 Pa	
Orange Line Taiwan	±1727 Pa	130 km/h
LAR MTRC Hong Kong	+1380 Pa to -3260 Pa	110 km/h
Pusan Line 3	±900 Pa	80 km/h

지하 승강장의 경우 3차원 수치계산과 2차원 경향테스트를 통해 보정된 PSD 면적 압력 평균값은 559.8Pa로써 외국의 사례 Table 4와 비교하여 낮은 수치이다.

지하 승강장내의 PSD에 미치는 압력은 열차의 승강장 진입속도에 의존하는 경향을 띠고 있으며, 광주 지하철에서의 PSD 압력값을 유추할 수 있었다.

본 결과는 외국의 선례와 광주지하철의 실측데이타를 검토하고 시뮬레이션에 의한 결과를 통해 최종적으로 PSD에 미치는 풍압을 제시하였다.

Table 4에서 PSD 실시설계 내 풍압조건과 같이 지하역사에서는 시뮬레이션 결과 값인 +559.8 N/m2 to -200N/m2 을 만족하고 시뮬레이션 결과값 보다 높은 상하이 4호선에 설치한 PSD 설계기준 값인 ± 900 N/m2 을 선정하였으며, 제시한 PSD풍압조건은 시뮬레이션 결과 치와 비교해보면 안전계수를 1.6 ~ 2를 적용한 값으로 PSD 실시설계에 적용되는 풍압조건으로 무리가 없으며, 외국 선례와 광주지하철 실측값을 종합적으로 비교분석 했을 때 합리적인 값으로 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 부산교통공단의 부산지하철 3호선 PSD 설치로 인한 기계설비 설계(안) 제시 사업에 의해서 수행되었다.

참고문헌

(1) 신현준 외 2명, 2000, 대구지하철 2호선 2공구 본선 환기시스템 컴퓨터시뮬레이션에 관한 연구 보고서, 한국건설기술연구원

(2) 박경진 외 13명, 2003, 부산지하철 3호선 1구간 기계설계 실시설계 보고서, 부산교통공단

(3) FLUENT Version 6.1.22 TUTORIAL GUIDE, FLUENT. Inc.

(4) 김정엽, 신현준, 조정식, 2001, 지하철 정거장에서의 열차진입시 열차풍 해석, 대한 설비공학회 2001 하계학술발표회 논문집, pp.791-796

(5) 차철현, 1998, 지하철 환경과 열차풍의 영향에 관한 연구, 공기조화 냉동공학회 98동계학술발표회 논문집, pp.489-493

(6) J.H. Lee, M.D. Oh, 1983, Train Wind in the Subway Tunnel, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering of Korea, Vol. 10, pp109-114

(7) 강기훈, 김원갑, 한화택, 차철현, 2001, 지하철 본선 터널의 환기방식이 역내 환경에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구, 대한설비공학회 2001동계학술발표회 논문집, pp. 389-394