

지하철 역사 형상을 고려한 PSD 비정상 풍압해석

Unsteady Wind Pressure Analysis on PSD Considering Subway Station Configurations

김유성* · 김동현† · 김요한* · 신광복** · 이은규***

Yu-Sung Kim · Dong-Hyun Kim · Yo-Han Kim · Kwang-Bok Shin, Eun-Kyu Lee

Abstract In this study, unsteady wind pressure analyses on platform screen door (PSD) have been conducted considering the flow interference effects between the moving train and the configuration of subway station. The major role of PSD prevents passenger accidents, wind pressure, polluted dust and noise when the train is entering the station platform. Computational fluid dynamic method with moving grid algorithm has been adopted to accurately predict unsteady pressure levels exerted on the PSD. Closed and open type station configuration are considered. Also, wind pressure levels for passing and stopping drive motion of the entering train are presented and practically compared each other.

Keywords : Platform Screen Door, Computational Fluid Dynamics, Wind Pressure, Unsteady Flow, Moving Grid Method

요 지 본 연구에서는 열차와 지하철 역사 형상간의 유동 흐름에 대한 상호작용을 고려하여 승강장 스크린도어(PSD)의 비정상 풍압해석을 수행하였다. PSD의 주목적은 열차가 역사 안으로 진입할 때, 인명사고를 예방하고 풍압, 오염된 분진, 소음 등을 차단하는데 있다. PSD에 대한 비정상 풍압수준을 정확하게 예측하기 위하여 이동격자법을 활용한 전산 유체역학 기법이 적용되었다. 개방형 및 밀폐형 역사가 고려되었으며, 열차가 역사를 통과하는 경우와 역사에서 멈추는 경우에 대한 풍압 수준을 상호 비교하였다.

주 요 어 : 승강장 스크린 도어, 전산유체역학, 풍압, 비정상 유동, 이동 격자법

1. 서 론

현재 대도시에 설치된 지하철은 우수한 정시성과 쾌속성 등을 바탕으로 핵심 교통수단으로 정착되고 있다. 그러나 지하철은 승강장 내에서의 안전사고와 열차의 가감속 운행에 따른 열차풍 발생과 분진, 고온 기류 등에 기인한 지하철 이용환경에 대한 문제가 야기되곤 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 선진국에서는 능동적 개념의 설비 시스템인 승강장 스크린 도어(PSD)를 설치, 운영하고 있으며, 우리나라에서도 이미 많은 지하철 역사에서 설치 및 운용되고 있다.

스크린 도어는 우선적으로 승강장 내에서 발생 가능한 추락 및 충돌 인명사고를 사전에 방지하고, 열차 주행에 기인한 열차풍과 오염된 분진, 소음 등을 상당부분 차단하여 지하철 이용환경을 개선시키는 역할을 한다[1].

스크린 도어는 그 특성상 밀폐형 또는 반밀폐형 공간인 터널에 설치되어 열차의 지속적인 운행에 따른 열차풍 영향을 반복적으로 받게 된다[2-4]. 이는 장기간 스크린 도어 운용 시 구조 안정성에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 설계된 역사 형상과 이동하는 열차의 간섭 효과를 고려하여 PSD에 유발되는 풍압 수준(하중)을 예측하는 것은 안전하고 효율적인 구조설계를 위한 필수사항에 해당한다[5]. 스크린 도어에 작용하는 정확한 풍압을 예측하기 위해서는 실제 열차 운용 조건을 적용하여 터널과 PSD 사이를 이동하는 열차를 고려한 비정상 유동해석을 수행하여야 한다. 최근에는 컴퓨터의 비약적인 성능향상과 전산유체역학 해석기법의 발달로 인해,

† 책임저자, 회원, 국립경상대학교, 기계항공공학부 교수
E-mail : dhk@gnu.ac.kr
TEL : (055)751-6125 FAX : (055)755-2081

* 국립경상대학교, 기계항공공학부 대학원

** 한밭대학교, 기계설계공학과 교수

*** (주)우진산전, 기술연구소

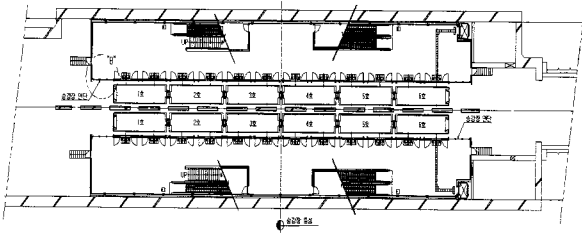


Fig. 1. Planform view of the station

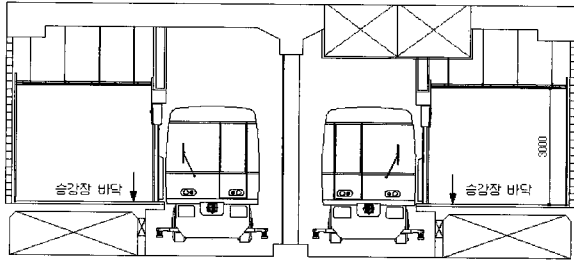
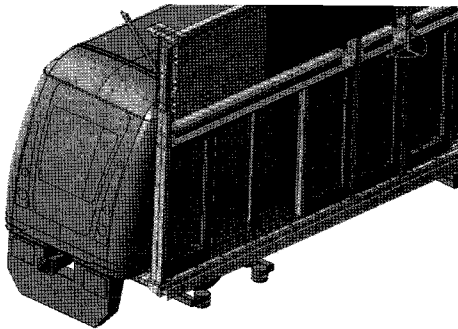


Fig. 2. Front view of the station



열차와 역사, 스크린 도어의 형상, 열차 속도 등 복합적인 조건을 동시에 고려한 3차원 유동해석이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 밀폐형과 반 개방형의 전형적인 역사 형상을 고려하여 열차의 서로 다른 이동조건에 대한 비정상 유동 해석을 수행하였다. 수치해석은 상용 CFD 해석프로그램인 Fluent (Ver.6.2)[6]를 활용하였다. 또한 열차가 승강장으로 진입하여 정차하는 조건과 등속으로 통과하는 조건을 모사하기 위해 동적이동격자 개념과 자체적으로 작성한 UDF 코드와 연계하는 방식을 적용하였다.

2. 모델링 및 해석기법

2.1 스크린 도어의 형상 및 모델링

본 연구에서 고려한 역사의 형상은 선로를 가운데 두고 플랫폼이 마주보는 형태의 상대식 역사이다. Fig. 1은 동래역 지하역사의 평면도를 나타내고 있으며, Fig. 2는 지하 역사 플랫폼

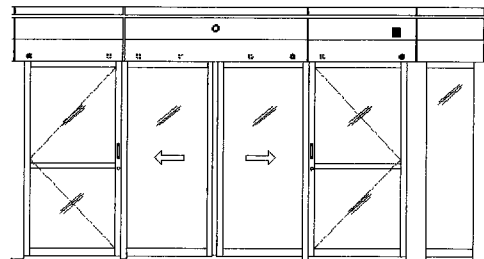
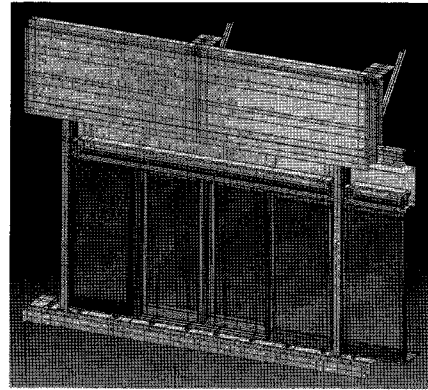


Fig. 3. Configuration of the designed screen door (unit section)

폼의 정면도이다. 해당 역사 승강장의 총 길이는 65m이고, 이에 해당하는 스크린 도어가 설치된다. 터널을 포함하여 CFD 해석에 고려된 전체 역사의 길이는 250m이며, 열차가 통과하는 터널의 단면 형상은 지하역사 플랫폼의 정면도를 이용하여 생성하였다.

본 연구에 고려한 스크린 도어는 완전 밀폐형에 해당하는 모델이다. 설치될 스크린 도어는 Fig. 3과 같이 2개의 비상문, 2개의 가동문과 1개의 고정문이 하나의 유닛에 해당하며, 길이방향으로 유닛이 반복되어 설치되게 된다. 해당 역사 모델의 경우 PSD는 총 16개의 유닛으로 구성되어 있으며, 실제 모델에 대한 구조해석 모델과 상관성을 가지도록 각각의 도어를 분리하여 모델링 하였다. 그리고 형상이 복잡한 영역에는 형상을 단순화하여 모델링하여 해석을 수행하였다.

본 연구의 주요 목적 중 하나는 실제적인 역사 모양과 지하철의 운동 및 상호간섭 영향을 고려하여 설계된 PSD 구조물에 작용하는 풍압수준을 예측해 보기 위한 것이다. 본 연구에서 고려한 전형적인 역사 단면 형상들을 Figs. 4-5에 나타내었다. Fig. 4의 경우는 승강장 반대편으로 터널 벽이 위치하는 경우에 해당한다. 반면에 Fig. 5는 승강장 반대편으로 반대편 승강장이 위치하는 경우이며, 가운데에 중앙 분리 기둥들이 위치하는 경우에 해당한다. 역사터널 중간 부분에 구조지지를 위한 수직 기둥들이 위치한 경우는 보다 정확한 해석을 위해 양쪽 역사를 모두 포함하여 모델링하였다. 이는 지하철이 승강장으로 진입하면서 유발되는 유동흐름이 실제와 동일하

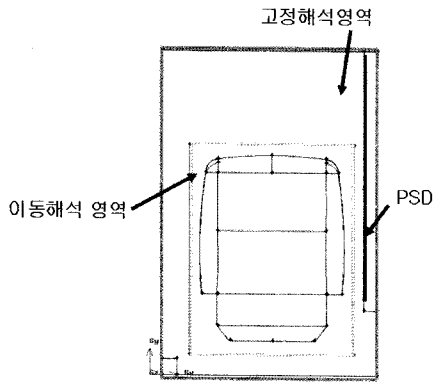


Fig. 4. Fully closed platform shape with tunnel side wall

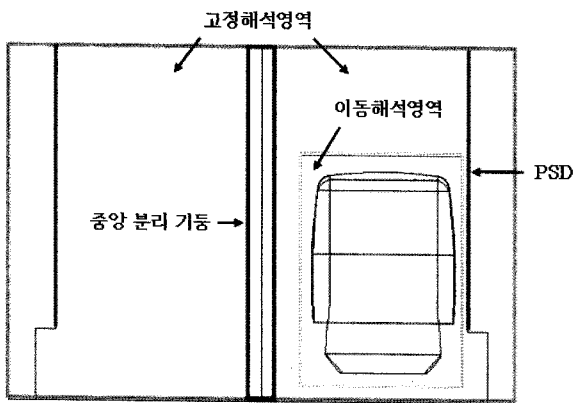


Fig. 5. Semi-opened platform shape with supporting columns

게 지지 기둥 사이의 공간으로 빠져 나가 반대편으로 이동하는 것을 허용하기 위함이다.

2.2 유동해석 기법

본 연구에서는 지하철 PSD에 작용하는 수직방향 풍압 수준을 예측하기 위해 상용 CFD 해석프로그램인 Fluent(Ver.6.3)와 열차의 자유로운 움직임을 모사하기 위해 자체 작성한 UDF[7] 코드를 연계하여 해석하였다. 비정상 유동해석은 오일러 방정식에 근거하였으며, 물체의 상대 운동을 고려한 비정상 압축성 유동장에 대한 오일러 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} Q dV + \oint_{\partial\Omega} F(Q) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (1)$$

여기서, F와 Q는 각각 보존변수 및 비점성 플럭스를 의미하며 아래와 같이 표현된다.

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e_0]^T \quad (2)$$

$$F(Q) \cdot \vec{n} = \begin{Bmatrix} \overline{\rho u} \\ \overline{\rho u u} + p n_x \\ \overline{\rho v u} + p n_y \\ \overline{\rho w u} + p n_z \\ \overline{e_0 u} + p V_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{u} = \vec{n} \cdot (V - V_g) \quad (4)$$

$$V_n = \vec{n} \cdot V \quad (5)$$

위 식에서 Q, u_g, e₀, \vec{n} 은 각각 보존변수, 격자속도, 단위 체적당 전에너지(total energy) 및 물체 표면에 수직인 단위벡터를 의미한다. 또한 이상기체 가정을 적용하면 다음과 같은 압력관계식을 얻을 수 있으며, 공기의 경우 비열비 γ 는 1.4이다.

$$p = (\gamma - 1) \left[e_0 - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) \right] \quad (6)$$

공간에 대한 차분은 유한체적법을 적용하였으며, 시간에 대한 차분은 계산효율과 시간정확도 향상을 위해 내재적 방식의 dual-time stepping 기법을 적용하였다. 또한 각각의 셀 표면을 통한 플럭스는 Roe의 flux-difference splitting 기법을 이용하여 계산하였다[6].

열차표면, 스크린도어, 터널의 벽면, 기둥 등은 벽면경계조건(wall boundary condition)으로 설정하여 이들을 가로지르는 유동흐름 효과를 배제하였다. 역사로 진입하는 열차의 동적 움직임을 고려한 효율적인 CFD 해석을 위해 역사의 단면을 기준으로 Figs. 4-5와 같이 고정영역과 열차와 함께 이동하는 이동영역을 분리하여 격자를 생성한 후 상대 운동이 가능하도록 이동영역에 UDF를 적용하여 해석을 수행하였다. 이동해석 영역은 열차의 속도에 따라 상대 운동이 모사되면서 해석과 동시에 경계면에서는 물리적인 정보를 외부 고정해석 영역으로 전달하도록 하였으며, 열차가 이동함에 따라 발생하는 공간격자 변화문제는 격자재생성(grid remeshing) 기법을 적용하여 처리하였다. 격자 재생성 기법이란, 이동해석 영역이 전진함에 따라 발생하는 격자의 질이 떨어지는 것을 방지하기 위하여 격자를 제한된 범위 내에서 재생성하는 것을 의미한다. 그리하여 이동해석 영역이 이동하더라도 고정해석 영역의 격자가 재생성 되므로 열차가 이동하는 것을 가상으로 고려해 볼 수 있다.

3. 해석결과 및 검토

본 연구에서는 다양한 상황에 대한 풍하중 수준을 예측해 보기위해 다음과 같이 3가지의 서로 다른 조건에 대한 비정상

비점성 유동해석을 수행하였다. 열차가 해수면을 기준으로 운행된다고 가정하여 압력 및 온도조건을 Sea-level로 가정하였으며, 열차가 진입하는 곳을 Pressure Inlet, 열차가 빠져 나가는 곳을 Pressure Outlet 조건으로 설정하였다. 역사 및 열차의 복잡한 형상은 단순화하여 유동해석을 수행하였으며, 약 36만개의 사면체격자(tetrahedral mesh)가 사용되었다. 수치 불안정성을 최소화하기 위하여 열차 진입 전부터 열차가 통과하기까지 충분히 진행거리를 확보하며 모델링하였다. 또한, 무반사 경계조건을 적용하여 입, 출구에서 발생하는 영향을 감소시켰다. Fluent의 UDF는 열차 이동을 적용하기 위해 구현하였으며, 열차를 포함하는 이동해석 영역에 직접 적용하였다.

3.1 밀폐형 역사구조(등속 통과)

Fig. 4와 같이 승강장 반대편이 터널 벽으로 막혀 있는 경우에 대해 열차가 비상사 정차하지 않고 70km/h로 등속 통과하는 경우에 대한 유동해석을 수행하여 보았다. Fig. 6은 지하철이 역사를 등속 통과하는 경우, PSD의 각 유닛에 작용하는 비정상 풍압 수준을 지하철의 진행 거리에 따라 도시한 결과이다. 결과를 검토해 보면 열차가 플랫폼에 진입하면서부터 초기에 스크린 도어의 압력은 감소하기 시작하며, 열차가 침차 전방으로 진행함에 따라 동일한 유닛에서도 대기압 기준에서 추가로 -2,200Pa~2,650Pa까지 극심하게 변화하는 양상을 볼 수 있다.

본 해석은 플랫폼 입구에서 9.12m 떨어진 지점에서부터 열차가 70km/h의 등속으로 진입하여 승강장 영역을 통과한다고 가정하였으며, 비정상 CFD 해석에 적용한 시간간격은 약 0.0001초 이다. 이 경우, 열차가 플랫폼 끝까지 이동하는데 필요한 비정상 반복계산 회수는 약 37,000번 정도이다. 본 해석

은 Intel Pentium(R) D Processor 3.2GHz CPU와 2GB의 메모리를 가지는 서버 6대를 병렬처리 하였으며, 계산 시간은 약 100시간이 소요되었다. 본 경우에 대해 PSD에 유발될 수 있는 최대 풍압은 열차가 약 26m 진행한 지점에서 2번째 유닛에서 발생하게 되며, 크기는 약 2,650Pa 정도이다.

3.2 밀폐형 역사구조(진입 후 정차)

본 절에서는 일반적인 경우와 같이 열차가 진입 후 정차하는 경우에 대한 풍압해석을 수행하였다. 이 경우 열차는 70 km/h의 속도로 승강장으로 진입 후 감속하여 최종적으로 정차하는 경우에 해당한다. Fluent를 활용한 기본 유동해석에서 열차의 이러한 움직임은 자동으로 고려될 수 없으며, 유동해석 영역내의 열차 움직임을 모사하기 위해 UDF 코드를 작성하여 Fluent 해석에 연동할 필요성이 있다. 해석은 이전의 경우와 동일한 격자계를 적용하였으며, 열차의 출발 위치도 9.12m 떨어진 지점으로 동일하다.

열차는 시작 지점에서 70km/h로 승강장 입구까지 등속으로 진행한 후 승강장 영역에 들어서는 순간부터 선형적으로 감속하도록 모델링되었다. 열차가 출발하여 플랫폼에 정차할 때까지 총 이동거리는 약 77m이며, 27,800번의 반복계산이 소요되었다. Fig. 7의 해석결과는 중앙 분리 기둥이 고려되지 않은 밀폐형의 역사 형태에서 각 도어의 풍압 변화를 진행 거리에 따라 나타난 것이다. 이전의 경우와 마찬가지로 열차가 플랫폼에 진입하면서부터 스크린 도어의 압력은 감소하기 시작하며, 열차가 진행함에 따라 대기압에 대한 상대압력이 -2,300Pa ~ 2,500Pa까지 변화함을 알 수 있다. 점검창의 경우도 도어와 비슷한 압력분포를 나타내었다. 여기서 (-)방향은 물리적으로 부압을 의미하며, PSD 면에서 선로 방향으로 작용하는 압력에 해당한다. 이 경우 유기되는 최대 풍압 수준은

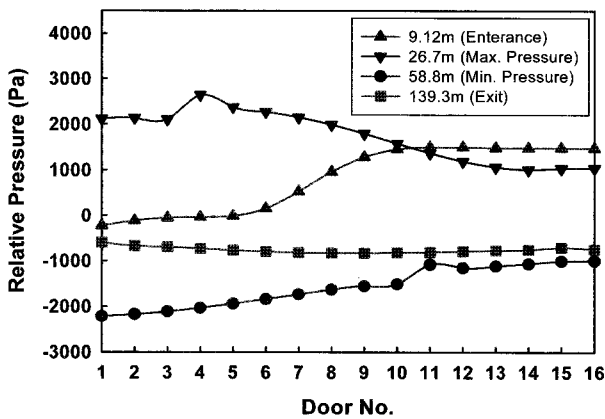


Fig. 6. Induced wind pressure level on PSD for constant speed passing condition of the train (fully closed platform shape)

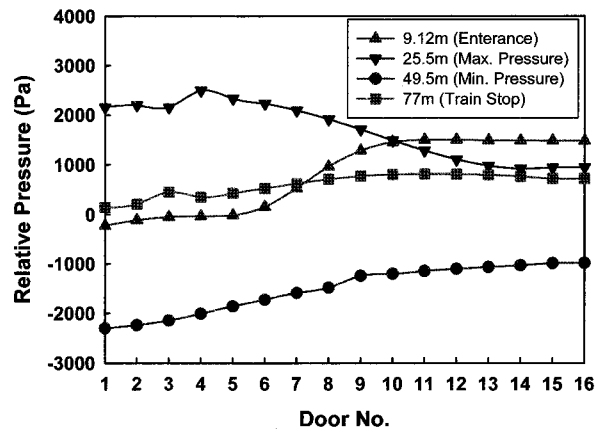


Fig. 7. Induced wind pressure level on PSD for constant speed passing condition of the train (semi-open platform shape)

앞서와 유사하게 약 25.5m 진행 지점에서 2번째 유닛에서 발생하였으며, 약 2,500Pa의 풍압에 해당한다. 최대 풍압의 경우 정차하는 경우도 초기 진입 속도는 유사하기 때문에 2차 해석 결과와 비슷한 값을 나타내고 있다. 하지만 승강장을 많이 진입한 경우는 이미 열차의 속도가 상당히 감소된 시점이기 때문에 유발되는 압력변화가 상대적으로 미약함을 할 수 있다.

3.3 개방형 역사구조(등속 통과)

마지막 경우로 Fig. 8과 같이 반대편에도 승강장이 있고 선로 사이의 중앙 부분에는 구조지지용 분리기둥 형상이 추가로 있는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 3.1의 경우와 유사하게 열차가 승강장에서 정차하지 않고 70km/h의 등속으로 통과하는 경우에 대해 풍압해석을 수행하였다.

Fig. 9의 해석결과는 Fig.8과 같은 형상에 대해 열차와 인접한 PSD에 부가되는 비정상 풍압 수준을 나타내고 있다. 이는 지하철이 등속으로 역사를 통과할 때 진행거리에 따라 각 도어의 유기되는 최대 풍압 수준을 의미하는 것이다. Fig. 8과

같은 형상에 대한 유동해석 결과를 검토해 보면 이전의 경우와 유사하게 열차가 승강장에 진입하면서부터 열차 선두부 인근에 위치한 스크린 도어의 압력은 감소하기 시작하며 열차가 출구 방향으로 진행함에 따라 -800Pa~1,100Pa까지 변화함을 알 수 있다. 최대 풍압은 열차가 약 28m 진행한 지점에서 첫 번째 유닛에서 발생하였으며, 고 대기압에 대해 약 1,100 Pa의 풍압이 추가로 작용하는 것으로 나타났다. 본 모델의 경우 3.1절에서 고려한 밀폐형 역사 모델의 경우에 비해 압력변화가 전반적으로 많이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 이는 열차 진행에 의해 간섭된 유동이 기둥과 기둥 사이의 공간을 통하여 반대편 승강장 방향으로 흘러 나가서 열차와 PSD 사이의 상호간섭 효과가 현저하게 감소되었기 때문이다. 이러한 물리적인 유동 현상은 Fig. 10에 제시한 이동하는 지하철 주위의 유선과 압력 선도에서도 간접적인 확인이 가능하다.

이상의 해석결과에 대한 종합적 내용을 Table 1에 정리하였다. 결과를 보면 밀폐형 역사 구조를 열차가 등속으로 통과하는 경우가 PSD 구조에 가장 큰 풍압 수준을 야기하였다. 열차가 진입하여 정차하는 경우도 승강장 진입 방향에 위치

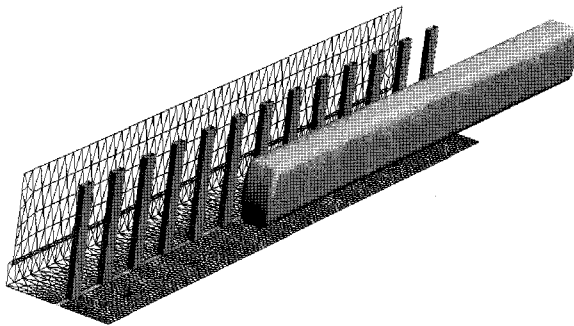
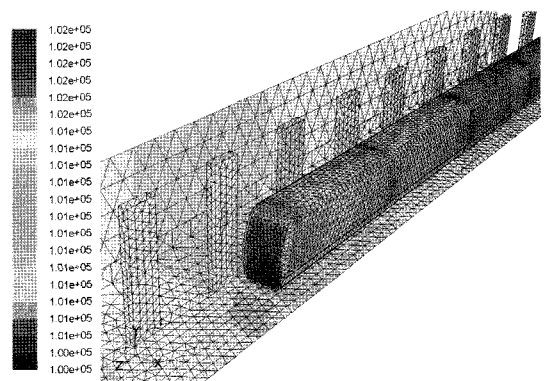


Fig. 8. Platform CFD grid model with supporting columns



(a) Pressure contour

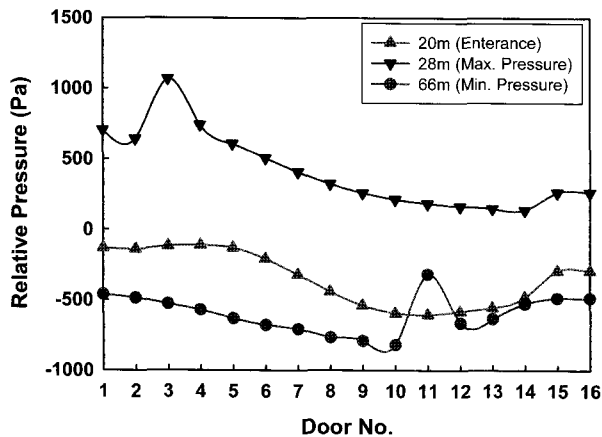
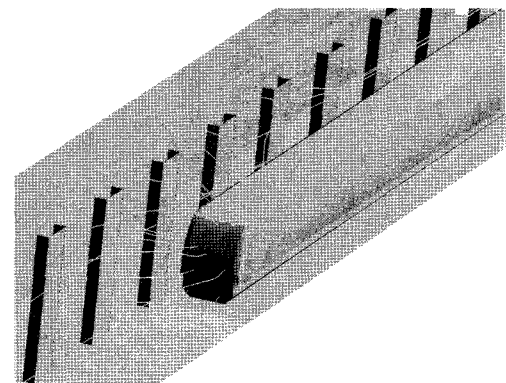


Fig. 9. PSD relative wind pressure with supporting columns at constant speed



(b) Streamline

Fig. 10. Flow characteristics around the moving train

Table 1. Calculated maximum wind pressure levels on PSD

Model	최대 정압	위치 (uint)	열차위치 (진입후)	최대 부압	위치 (unit)	열차위치 (진입후)
Case 1	2,650Pa	2	17.6m	2,200Pa	1	49.7m
Case 2	2,500Pa	2	16.4m	2,300Pa	1	40.4m
Case 3	1,100Pa	1	8m	800Pa	8	46m

한 PSD 유닛에는 거의 유사한 수준의 압력변화가 유발됨을 알 수 있다. 마지막으로 개방형 역사의 경우는 앞서 설명한 유동 특성상 간섭효과가 약화되기 때문에 PSD에 유발되는 압력의 수준도 밀폐형 역사형상에 비해 거의 절반 이하로 감소된 결과를 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 열차의 움직임에 대한 동적 이동격자 개념을 포함한 3차원 비정상 전산유체해석 기법을 적용하여 역사 모델에 따라 PSD 구조에 유발되는 비정상 풍압 수준을 예측하였다. 본 연구에서 고려한 역사 모델의 경우 완전 밀폐형 구조인 경우는 2,650Pa의 최대 풍압이, 중앙에 지지 기둥이 위치한 반 개방형의 경우는 상대적으로 낮은 1,100Pa 정도의 풍압이 유발될 수 있음을 확인하였다. 유발되는 최대 풍압 수준은 역사의 형상 및 열차의 진입속도 등에 의해 밀접하게 연관될 수 있으며, 비정상 특성이 강하게 나타날 수 있음을 보

였다. 본 연구의 해석결과는 향후 관련 역사의 PSD 구조설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 (주)우진산전 기술연구소 및 2단계 BK21/NURI 지원 연구결과의 일부임.

참 고 문 헌

1. 차철현, (1998), “지하철 환결과 열차풍의 영향에 관한 연구”, 공기조화 냉동공학회 동계학술발표회 논문집, pp.489-493
2. 김정엽 외 2명, (2001), “지하철 정거장에서의 열차 진입시 열차풍 해석”, 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, pp.791-796
3. 정해권 외 7명, (2004), “극한 조건에서 PSD 설치에 따른 지하철 내부 유동장 계산”, 대한설비공학회 동계 학술발표회 논문집, pp.179-184
4. 김정엽, 김광용, (2006), “스크린도어가 설치된 지하철에서 열차운행에 의한 비정상유동의 실험 및 수치적 해석”, 설비공학논문집, pp.103-111
5. 이재열, 신광복, 류봉조, 김동현, 이은규, (2006), “열차 진입 시 풍압에 의한 완전밀폐형 승강장 스크린 도어(PSD) 시스템의 구조 안정성 평가”, 한국철도학회지, 제9권, 제5호, pp.594-600.
6. Fluent Inc. (2006), FLUENT 6.3 User's Guide.
7. Fluent Inc., (2006), FLUENT 6.3 UDF Manual, Appendix A.

(2007년 8월 21일 논문접수, 2008년 1월 17일 심사완료)