

한국고속전철(KTX)이 역사를 통과할 때 격벽의 높이에 따른 풍하중의 변화에 대한 수치해석 연구

조두신^{*1} · 허남건^{*2} · 김사량^{*3}

A Numerical Study on Effect of a Partition Wall Height on Wind Pressure Load when KTX passes through a Station

D. Cho, N. Hur and S. R. Kim

A high speed train passing through a station may have undesired effects to passengers on platform due to abrupt pressure transients. Therefore it is very important to reduce the possible degree of danger by installing partition walls in passing lanes in designing the stations having passing train. In the present study, a pressure load to a passenger on platform is studied for the cases of various heights of the partition wall to assess the effectiveness of the wall on the passenger safety. From the results, it is seen that the pressure load on a passenger may be largely reduced by the partition wall. The heights of the partition wall for various passing speed are also studied based on the safety regulation.

Key Words: KTX(한국고속전철), Passing Train(통과열차), Pressure Transients(압력변동), Partition Wall(격벽), Passenger Safety(승객의 안전)

1. 서 론

고속전철은 일반전철과 달리 매우 빠른 속도로 운행되므로 일반 열차의 공기역학적 특성과 다른 문제들을 발생시킨다. 특히 고속열차가 중간역을 정차하지 않고 통과하는 경우에 그 빠른 속력에 의한 풍압의 효과로 여러 가지 문제가 야기된다. 즉, 역사의 지붕이나 기둥 등 구조물에 큰 힘을 미쳐 정적, 동적 구조의 안정성에 영향을 미치고, 또한 승강장에 승객이 서 있을 경우에 승객의 안전에 크게 문제가 된다. 그러므로 이러한 경우 기존의 역에서는 풍압의 영향이 크지 않을 정도

로 서행을 하거나 주행속도로 통과하는 새로운 역을 설계할 때에는 풍압의 영향을 충분히 고려하여야 한다.

고속전철 주위의 풍압에 대한 연구는 최근에 수행되기 시작하였고, 연구는 대부분 고속전철이 터널을 진입할 때 발생하는 압축파에 대한 연구가 주종을 이룬다. 즉, Aita등[1]이 프랑스 고속전철(TGV)이 터널을 진입하는 경우에 대하여 실제 주행 조건을 적용, 3차원으로 비정상 유동해석을 수행하였고, Ogawa & Fujii[2,3]도 열차가 터널 안을 진입할 때의 유동을 이동계산격자를 이용 수치해석 하여 압축파의 거동을 연구하였다. 또한 Fujii & Ogawa[4]는 FSA (Fortified Solution Algorithm)와 영역 분할 방법을 사용하여 터널 내부에서 서로 교행하는 두 열차에 의해 유도된 3차원 비정상 유동에 대한 해석을 수행하

* 2001년 1월 7일 접수

^{*1} 서강대학교 대학원

^{*2} 서강대학교 기계공학과, nhur@ccs.sogang.ac.kr

^{*3} 강릉대학교 정밀기계공학과

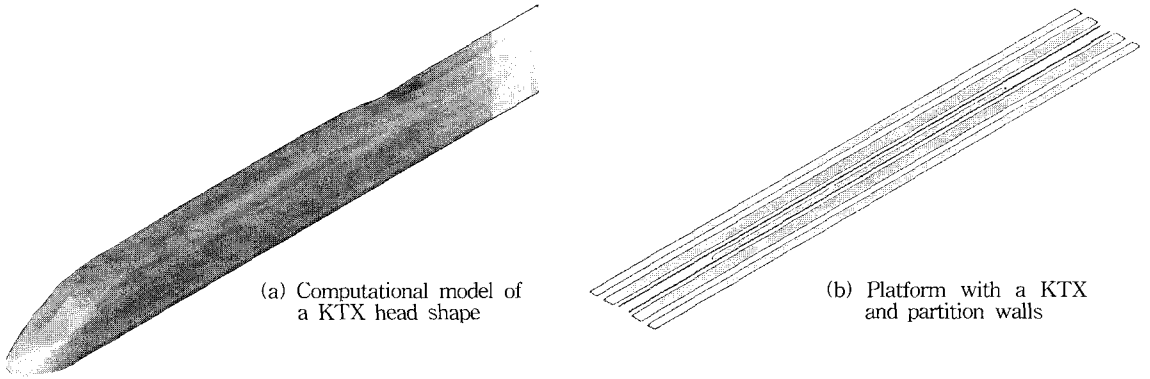


Fig. 1 Computational surface model of a KTX and partition walls installed near passing lane

였다. 국내에서는, 박원규 등[5]이 터널에 진입하는 고속전철의 압축파 특성에 관한 수치해석을 통해 고속전철 전/후방에서 나타나는 압축파의 생성과 전파 및 폐쇄 효과에 따른 터널내부의 급격한 압력상승 현상을 관찰하였다.

역사에서의 풍압문제는 통과열차가 있는 우리나라의 경우 승객의 안전을 위하여 매우 중요하여 고속철도의 도입단계에서부터 연구가 진행되어 왔다. 김사량 등[6]과 허남건 등[7]은 고속전철이 천안역사를 통과할 때 발생하는 풍압이 지붕 등 역사의 구조물에 미치는 영향에 대하여 수치해석 및 수조실험을 수행하여 설계의 기본 자료를 제공하였고 승강장에서 있는 여객에 풍압이 미치는 영향에 대해 천안역사 설계시 안전상의 문제점을 파악하였다. 여기서 열차 속도 변화에 따른 압력 계수의 변화는 일정함을 보였으며 격벽이 없는 경우와 있는 경우에 역사 지붕 및 승강장에서의 압력 분포 등을 연구하였다. 김용환 등[8]은 고속전철과 벽 구조물의 상호작용에 관하여 풍동실험을 통하여 벽 구조물간의 거리가 줄어들면 열차 선두부의 추력과 요잉 모멘트는 증가하지만 저항은 큰 변화가 없지만 벽 구조물의 경우 열차와의 거리가 줄어들 수록 최대/최소 압력 계수의 절대값과 변화율이 커지는 것을 보았다. Hur 등[9]은 남서울 역사와 대전역사를 모델로 하여 역사 내부 터널을 통과하는 고속 열차에 의한 역사 내부의 압력 변동을 수치해석 하였다.

역사 내부에 통과열차를 위한 터널을 설치하면 터널이 승강장의 승객의 안전에는 효과적이지만 이에 따른 터널내의 압력파가 열차에 탑승 중인 승객에게 영향을 미칠 수도 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 천안역사와 같이 격벽이 있는 경우에 한국형 고속전철(KTX, 그림 1a)의 통과에 의한 풍압이 승강장 승객의 안전에 미치는 영향을 연구하고자 하였다. 그림 1b에 고속전철이 통과하는 역사의 승강장과 격벽을 보여주고 있으며, 본 연구에서 사용한 치수는 그림 2와 같다.

프랑스의 철도국은 철도 직원과 승객의 안전을 위해서 허용 하중 조건을 규정하고 있는데, 철도 직원은 차량에서 1.6m 지점에서 100N까지 힘을 허용하고, 승객은 차량에서 3.6m 지점에서 35N까지 힘을 허용하고 있다. 그러므로 역사는 승강장에서 있는 사람이 35N 이하의 하중을 받도록 설계하는 것이 중요하다. 특히 열차와 승강장 사이에 격벽을 설치하는 것은 승강장에 미치는 영향을 감소시켜 승객의 안전을 확보할 수 있다. 본 논문에서는 격벽의 높이에 따른 풍압의 영향을 해석하여 승객에게 미치는 영향을 수치 해석하고자 하였으며, 현재 건설중인 천안역사와 KTX를 모델로 연구를 수행하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 수치 해석

본 연구에서는 STAR-CD[10]를 사용하였으며

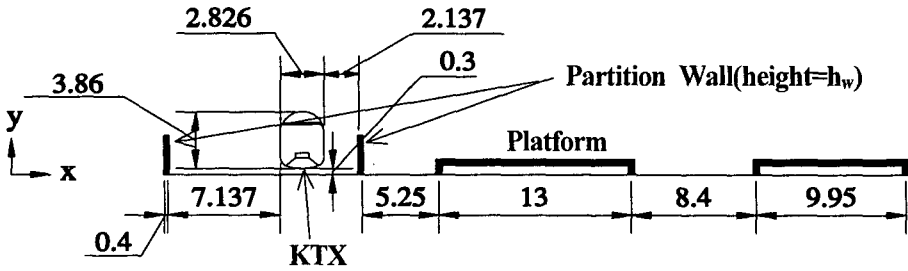


Fig. 2 Cross sectional views of station with train and partition wall

계산영역과 열차속도를 고려하여 압축성 효과는 무시하였다. 해석에는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고 난류 계산을 위해 $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다.

2.2 열차 모델 및 해석격자

한국형 고속철도(KTX) 차량은 전체 길이가 388m이고 동력차 부분이 길이 22.517m, 폭 2.814m, 높이 4.1m, 객차 부분이 길이 18.700m, 폭 2.904m, 높이 3.484m이다. 본 계산은 위 KTX 모델(그림 1a)을 바탕으로 열차의 전두부 및 객차를 구성하였고 후두부는 전두부의 모양과 같다.

이때 열차의 바퀴, 창문 및 객차 연결 부분은 기계적인 부분들은 열차의 저항에는 영향을 미치지 않지만, 본 연구에서 목표하고 있는 열차에 의해 발생하는 풍압에는 영향이 적으므로 계산 모델에 포함시키지 않았다. 따라서 열차는 지면과 0.3m 떨어져 있는 상태로 해석하였다. 그림 2는 열차가 역사를 통과할 때의 승강장과 격벽의 형상을 함께 있는 단면이다.

그림 3은 전체 계산 영역을 보여주고 있으며 격자 안에 열차, 격벽, 승강장의 형상이 들어 있다. 양쪽 격벽 사이는 열차가 교행 할 수 있도록 두개의 선로가 설치되어 있으며, 그림 2와 같이 열차와 가까운 격벽의 거리는 2.137m, 격벽과 승강장의 거리는 5.25m 이다.

계산 결과에 대한 격자수의 영향을 조사하기 위하여 그림 3의 (a), (b)와 같이 조밀격자(dense mesh)와 성긴 격자(coarse mesh) 두 종류를 사용하여 계산하였다. 이때 (a)의 조밀격자는 양쪽 격벽을 중심으로 대칭이며 전체 계산 영역의 크기는 길이 800m, 높이 198m, 폭 423m이다. 계산 영역은 열차와 승강장의 크기에 비해 매우 넓게 잡아 계산영역의 바깥 경계가 열차 주위의 유동에 미치는 영향을 최소화하였다. 이 경우 계산에 사용된 전체 격자수는 1,875,720개이다. 이에 비해 성긴 격자는 격자수와 계산 영역의 크기를 대폭 줄여 325,450개의 격자를 사용하였다. 즉, 열차에 의한 풍압은 열차가 진입할 때 열차의 전두부에 의해 발생하는 풍압이 가장 크기 때문에 열

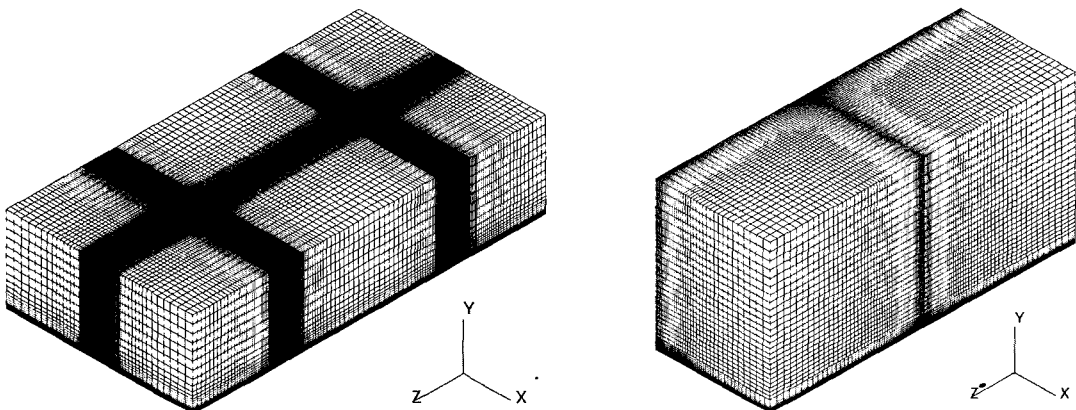


Fig. 3 Computational Mesh; (a) Dense mesh, (b) Coarse mesh

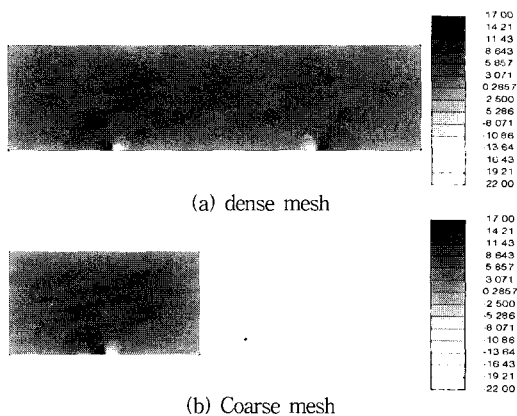


Fig. 4 Pressure Contour on the platform (U=180km/h, h_w=1.85m)

차의 전두부만 계산영역으로 잡았으며, 또 실제 열차가 진행할 때 열차로부터 멀리 떨어져 있는 격벽의 영향은 그렇게 크지 않을 것이라는 가정으로 열차중심에 대칭경계조건을 주어 가까운 격벽이 있는 반쪽 영역만 격자생성하였다. 이 경우 계산 영역은 길이 400m, 폭 200m, 높이 150m이다.

2.3 경계조건 및 해석

본 연구에서는 격벽과 승강장이 무한히 길다는 가정으로 정상상태의 유동해석을 수행하여 그 결과 유동장으로부터 승강장의 승객이 열차에 상대적인 운동을 할 경우 승객에 작용하는 하중을 구하는 방식을 사용하였다. 따라서 격자내 열차는 움직이지 않으며, 이동하는 열차와 같은 결과를 얻기 위해 바람이 반대방향에서 불어오는 풍동실험과 같은 입구 경계 조건을 사용하였고, 열차를 제외한 지면 및 승강장, 격벽 등의 경계조건은 열차에 대해 상대적인 속도를 갖는 이동 지면 조건을 사용하였다.

격벽의 높이에 따른 풍압을 해석하기 위해 h^* 가 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25인 경우에 해석을 수행하였다. 여기서 h^* 는 격벽높이(h_w)를 열차의 높이(h_t)로 무차원화한 높이이며 다음과 같이 정의된다.

$$h^* = \frac{h_w}{h_t} \quad (1)$$

열차 주위의 압력계수의 분포는 열차의 속도에 무관하게 일정하므로[7] 본 연구에서는 열차속도

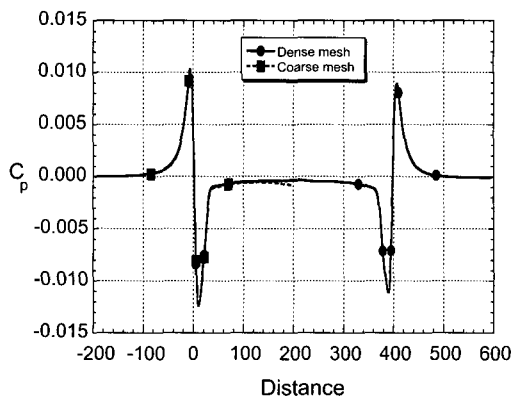


Fig. 5 Cp distribution on the platform (U=180km/h, h_w=1.85m)

180km/h에 대하여 수행하였으며, 계산은 본 연구실이 보유하고 있는 SGI Origin 2000 Workstation을 사용하여 수행하였다.

3. 결과 및 토의

그림 4는 세밀격자와 성긴격자를 사용한 해석에서 열차 좌측 승강장 종단면에서의 압력을 나타낸 그림이다. 두 경우 모두 열차의 전두부와 후두부에서, 즉, 열차의 형상이 급격하게 변하는 부분에서 압력의 변화가 크게 발생하고 있으며, 두 경우의 결과는 거의 같은 분포를 보여주고 있다. 이는 승강장에서의 압력계수분포를 나타낸 그림 5로부터 확인할 수 있다. 그림 5에서 열차 전두부의 위치는 0에 있으며 후미는 400m에 위치한다. 또한 그림으로부터 전두부에서의 압력변화가 후미부에서의 압력변화보다 크다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과로부터, 승강장 승객의 안전해석을 위한 유동해석에서는 열차의 전두부만 계산영역으로 잡고, 열차중심에 대칭경계조건을 주어 가까운 격벽이 있는 반쪽 영역만 격자생성한 성긴 격자로 해석하는 것이 훨씬 경제적임을 알 수 있다. 본 연구에서는 이후 모든 계산에서 성긴 격자를 사용하였다.

그림 6은 열차 측면으로부터 7.9m 떨어진 역사 승강장 위치에서 격벽의 높이에 따른 압력변동을 나타낸 그림이다. 열차 전두부가 통과하는 시점

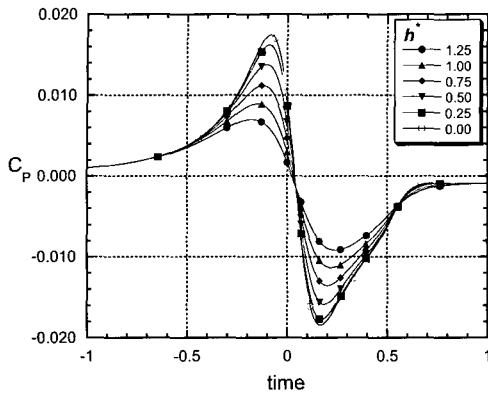


Fig. 6 Pressure coefficient variation on the platform for various wall height ($U=180\text{km/h}$, 7.9m from train)

을 0초로 하여 열차의 속도(180km/h)를 고려하여 정상상태의 압력분포를 시간축으로 변환시켜 압력변동으로 나타낸 것이다. 그림으로부터, 격벽이 낮을수록 압력변동이 커짐을 알 수 있다.

위의 압력 계수를 이용해 승강장의 승객에 미치는 힘은 실험적으로도 검증된 Steinheuer의 이론[11]에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F/q = \frac{-2\pi a^3 \nabla(D_h \times C_p)}{D_h} = -2\pi a^3 \frac{\partial C_p}{\partial x} \quad (2)$$

여기서 F 는 사람이 받는 하중을, q 는 열차의 속도에 의한 동압을 나타내며, a 는 사람을 원기둥으로 단순하게 가정할 때 원기둥의 직경을 나타내고, D_h 는 열차 단면의 수력 직경, 그리고 C_p 는 압력 계수이다. 위 식으로부터 원기둥에 걸리는 동압으로 무차원한 하중은 열차의 속도에 무관함을 알 수 있으며, 정상상태의 해석결과로 얻을 수 있는 압력 분포로부터 무차원 하중을 구할 수 있다. 이 식은 열차 주위의 비정상 압력변동을 이용하여 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$F/q = -2\pi \frac{a^3}{U_\infty} \frac{\partial C_p}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 U_∞ 는 열차속도, t 는 시간을 나타낸다.

그림 7은 정상상태 유동해석의 결과로 구한 압력 계수 분포를 이용하여 열차 속도 180km/h일

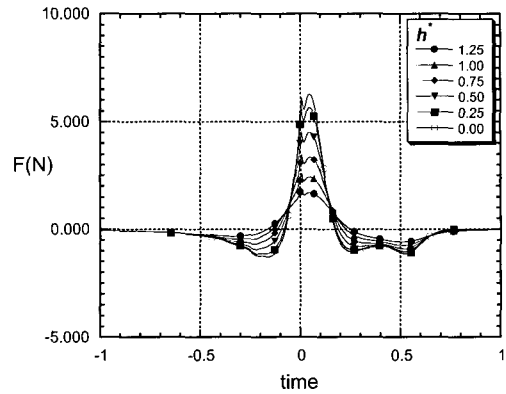


Fig. 7 Load variation on the platform for various wall height ($U=180\text{km/h}$, 7.9m from train)

때 승강장 위치와 높이에서 사람을 직경 0.5m의 원기둥으로 간주하여 그 원기둥에 걸리는 하중을 계산한 결과이다.

또한 열차주위의 압력계수 분포는 다른 물리적 조건이 변하지 않는 한 열차의 운행 범위내에서는 열차의 속도와 관계없이 일정하므로[7], 한 가지 열차 운행 속도에 대한 격벽의 형상에 따른 압력계수의 분포가 구해지면, 승강장의 승객에 미치는 열차 속도별 하중을 Steinheuer의 식에 따라 구할 수 있다.

고속전철에 대한 안전기준으로는 프랑스 국철의 경우 일반 승객이 차량으로부터 3.6m 떨어진 지점에서 35N까지의 풍하중을 허용한다. 즉, 프랑스 TGV의 경우 승객은 달리는 차량으로부터 3.6m 이내에 접근해서는 안되며, 또한 어느 위치에서도 35N 이상의 힘을 받으면 안전하지 않은 것으로 간주한다. 본 해석에서도 이 규정을 적용하여 안전선을 검토하였다. 우리나라 고속전철의 천안역사와 남서울역사에서는 통과열차 선로가 역사의 중앙에 위치하고, 그 바깥쪽에 정차하는 열차의 선로가 있으며 그 옆에 승강장이 위치하기 때문에(그림 2 참조), 승강장의 승객은 통과열차로부터 최소 7.8m 이상의 거리에 떨어져 있다. 따라서 실제 승객이 서 있는 위치는 8.2m 정도 떨어져 있다고 가정하여, 통과 고속전철로부터 3.0, 4.0, 5.6, 7.3, 8.2m 떨어진 위치에서 격벽의 높이에 따른 열차속도별 풍하중을 구하여 그림 8에 나타내었다. 여기서 열차의 속도는 180km/h에서 350km/h까지 검토하였다.

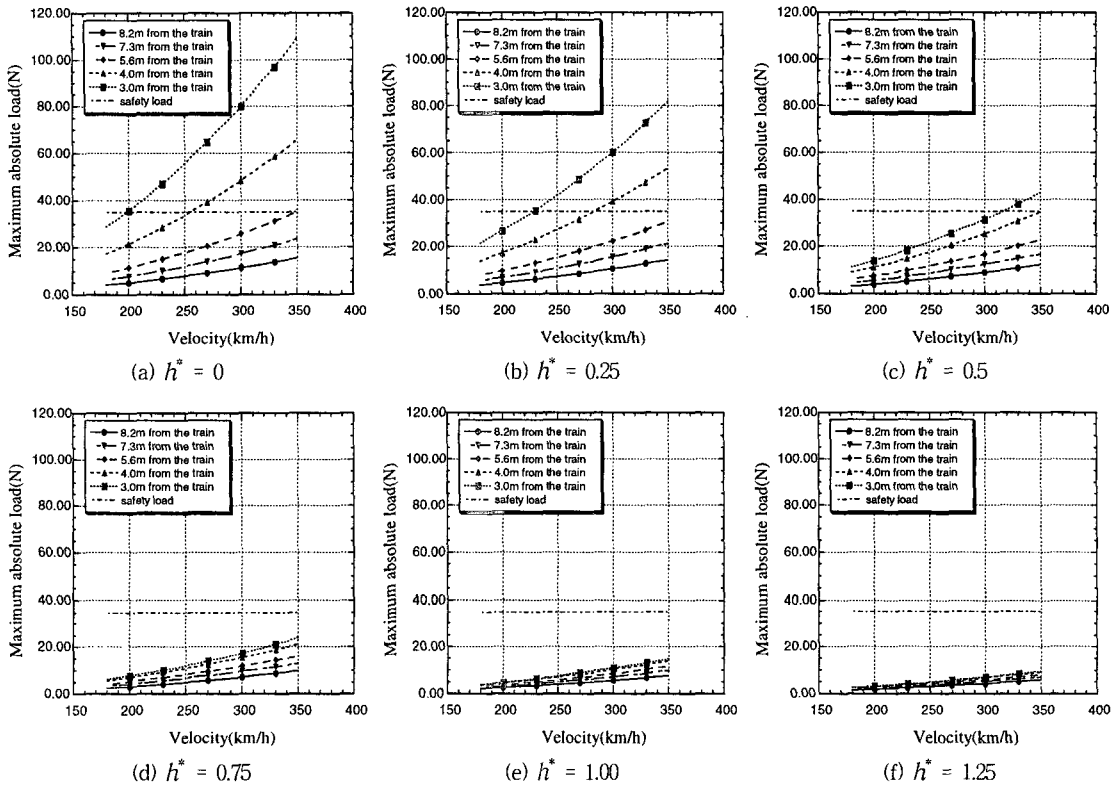


Fig. 8 Maximum absolute load on platform depending on velocity

그림에서 승강장의 승객이 받는 풍하중의 최대 값은 열차의 속도가 높을수록, 열차와 가까워질수록, 그리고 격벽이 낮을수록 커지는 것을 볼 수 있다. 또한, 천안역사와 남서울역사의 경우와 같이 열차에서 8.2m 떨어진 곳의 승객은 격벽의 높이와 상관없이 모든 속도에서 위에서 제시된 하중 35N 이하로 안전하다. 즉, 승강장이 통과열차 선로 바로 옆이 아니고 정차선로를 건너 위치한다면, 격벽이 없어도 승강장의 승객은 풍하중 측면에서는 안전하다고 할 수 있다. 다만 통과 열차의 소음을 차단하고, 또, 선로로부터 자갈 등이 튀어나오는 것을 방지하기 위해 최소한 높이의 격벽의 설치가 필요하리라 예상된다.

그림 8(a)로부터, 격벽이 없는 경우, 열차로부터 3m 떨어져 있는 곳에서는 열차속도 180km/h 이상에서는 프랑스의 안전 기준을 초과하여 위험하다는 것을 알 수 있으며, 5.6m 이상 떨어져 있으면 통과열차 속도 350km/h까지 안전하다는 것을 알

수 있다. 격벽의 높이가 열차 높이의 1/2이면 열차로부터 3m 이상 떨어져 있는 곳에서는 열차속도 300km/h까지도 안전하다는 것을 그림 8(c)로부터 알 수 있다. 그리고, 격벽의 높이가 열차 높이의 3/4 이상이면 본 연구에서 검토한 350km/h까지의 열차속도에서도 열차로부터 3m 이상만 떨어져 있다면 안전하다는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서 검토한 천안과 남서울 역사와 같이 통과열차 선로가 중앙에 위치하고 그로부터 정차 선로를 건너 승강장이 위치하는 역사에서는, 고속전철이 운행 최고속도로 역사를 통과하더라도 승강장의 승객은 격벽이 없는 경우에도 풍하중의 측면에서는 안전한 것을 알 수 있다. 다만, 전술한 바와 같이 통과열차에 의한 선로에서의 소음을 차단하고, 또, 자갈이 튀어나와 발생할 수 있는 안전사고를 막기 위해 격벽이 필요하며, 그 경우 역사 내부의 미관을 해치지 않고, 또, 고속전철 탑승 승객의 시야를 가리지 않는 범위 내에서 격벽의 설치가 고려되어야 할 것이다.

4. 결 론

우리나라의 고속전철 천안역사와 같이 정차하지 않고 빠른 속도로 통과하는 차량이 있는 경우, 차량에 의한 압력 변동은 역사의 구조물과 승강장의 대기 승객에게 위협을 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 통과선로 주위에 격벽을 설치하는 경우, 격벽의 높이와 통과 차량 속도에 따른 승강장의 승객이 받는 하중을 검토하였다. 연구 결과, 격벽을 설치함으로써 승강장의 승객에 미치는 풍하중을 상당히 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 본 연구에서 검토한 천안과 남서울 역사와 같이 통과열차 선로가 중앙에 위치하고 그로부터 정차 선로를 건너 승강장이 위치하는 역사에서는, 고속전철이 운행 최고속도로 역사를 통과하더라도 승강장의 승객은 격벽이 없는 경우에도 풍하중의 측면에서는 안전한 것을 알 수 있었다. 그러나 본 논문의 해석 경우와 달리 두 열차가 역사내부에서 서로 교행하거나 한 열차는 서행 또는 정차 한 상태에서 다른 열차가 주행속도로 역사를 통과하는 경우 등에서는 본 연구의 결과와는 달리 높은 풍하중을 받을 수 있으므로 향후 이를 고려한 연구의 수행이 요구된다.

참고문헌

- [1] Aita, S., Tabbal, A., Mestreau, E., Montmayeur, E., Mahbernath, F., Wolfhugel, Y.F. and Dumas, J.C., "CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train," *SAE Paper No. 920343* (1992).
- [2] Ogawa, T. and Fujii, K., "Numerical Simulation of Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel," *Computational Fluid Dynamics Journal*. Vol. 3, No.1 (1994), pp.63-82.
- [3] Ogawa T, Fujii K., "Numerical Investigation of Three-Dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel." *Computers & Fluids* (1997), Vol.26 No.6, pp.565-585.
- [4] Fujii, K. and Ogawa, T., "Aerodynamics of High Speed Trains Passing by Each Other," *Proceedings of Korea Society of Computational Fluids Engineering* (1995), pp.5-36.
- [5] 신창훈, 박원규, "터널에 진입하는 고속전철 주위의 3차원 점성유동과 압축파 특성에 관한 수치해석 연구." 한국전산유체공학회지 제5권 제3호 (2000), pp.23-31.
- [6] 김사랑, 이정현, 안이기, 허남건, "고속전철의 천안역사 통과시 풍압분포에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집Ⅱ(1995), pp.115-119.
- [7] 허남건 외, "경부 고속철도 천안역사 풍압연구," 한국고속철도건설공단 보고서 (1995).
- [8] 김용환, 전중환, 1995, "고속전철과 벽구조물 상호작용에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집Ⅱ (1995), pp.120-125.
- [9] Hur, N., Kim, S.-R., Kim, W., Lee, S., "Wind pressure transient inside a station caused by a passing high speed train," *Proceedings of 4th KSME-JSME Fluids Engineering Conference* (1998), pp.173-176.
- [10] STAR-CD Users' Manual Version 3.10, Computational Dynamics Ltd. (1999).
- [11] Chun, C.-H., "Aerodynamic Problems of High Speed Train - A Review and Perspectives," Report No. AFR-93-b02, Advanced Fluids Engineering Research Center, POSTECH (1994), pp.43-79.