

대심도 지하정거장에서 수직구 위치에 따른 수치적 연구

오 현 주,¹ 신 대 용,¹ 이 상 건,¹ 김 동 현,² 김 찬 중^{*1}

¹서울대학교 기계항공공학부, ²한국철도기술 연구원

NUMERICAL STUDY WITH VENT SHAFT POSITION IN UNDERGROUND STATION

Hyun Joo Oh,¹ Dea Yong Shin,¹ Sang Gun Lee,¹ Dong Hyun Kim² and Charn Jung Kim^{*1}

¹Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l University

²Korea Railroad Research Institute

When a high-speed train passes an underground station, large pressure waves are generated due to the piston effect. These pressure waves can cause the problems of vibration and noise as well as the ear discomfort of passengers at the underground station. This work numerically analyzed the pressure wave generation and propagation in an high-speed railway underground station, and the optimal location for vent shafts was studied to improve the passenger comfort by reducing the magnitude of the pressure wave and its rate of change. The evolution of pressure field in the underground station was calculated using a CFD(Computational Fluid Dynamics) software(Fluent), where the axis-symmetric two-dimensional model verified by Wu was used. And this study is applied to modelling of the underground station and the tunnel from Daegok station A-line of GTX(Great Train Express). From the result, we can have a conclusion that the role of vent shafts respectively were different according to the position in and out the underground station. Also Vent shaft in the underground station widely reduced pressure magnitude. And vent shaft out underground station reduced initial pressure peak value. Double vent shafts installed at tunnel toward station entrance and inside of the tunnel are the most efficient to reduce pressure. and pressure reduction increases according to the number of vent shaft.

Key Words : 고속열차(high-speed train), 수직구(vent shaft), 지하정거장(underground station), 소음(noise), 압력파(pressure wave), 수치해석(numerical study)

1. 서 론

전 세계적으로 환경적인 문제 개선, 불균형한 지역발전으로 인한 사회적 갈등, 경제적인 이익창출 등의 해결책을 도모하기 위한 노력이 지속되고 있다. 이와 관련하여 토지의 사용 가치가 매우 높은 수도권에서 도심과 도시를 연결하는 대심도 장대터널과 고속철도는 사회적인 이슈로 떠오르고 있다. 그러나 국내외를 통틀어 도시를 연결하는 대심도 고속철도의 사례는 찾아보기 힘들다[1]. 국외에 현존하는 50 km 이상의 장대터널의 경우 해저와 산을 통과하는 터널이기 때문에 두

도심을 연결하는 대심도 장대터널과는 상이하다. 영불해협을 연결하는 50.45 km의 유로해저터널, 스위스 알프스 산맥 남북을 연결하는 56.7 km의 Gotthard base 터널, 홋카이도와 혼슈를 연결하는 53.85 km의 세이칸 터널 모두 해저와 산을 통과하는 터널이다. 우리나라의 경우 일산과 수서(노선A), 청량리와 송도(노선B), 의정부와 금정(노선C)을 연결하는 GTX(Great Train Express)가 개통예정이다[2]. 이는 세계에서 홍콩 다음으로 건설하는 정거장을 갖춘 대심도 장대 터널이며 각 노선은 모두 심도 40 m ~ 50 m 사이의 깊이에 있고 최장 구간 거리는 약 10 km 이상이다[1]. 이런 대심도 장대 터널에서 열차가 고속으로 터널을 통과하면 피스톤 효과로 인하여 압력파가 생겨 정거장 내에 영향을 미친다. 이 압력파는 터널과 정거장을 통과하면서 반사와 전달을 반복하고 이는 승강장에서 서있는 승객들에게 이명감 현상을 발생시켜 정거장내 소음 공해를 일으키게 된다. 이런 소음을 줄이기 위해 Vent shaft

Received: December 12, 2011, Revised: February 27, 2012,

Accepted: March 5, 2012.

* Corresponding author, E-mail: kimecj@snu.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.1.036

© KSCFE 2012

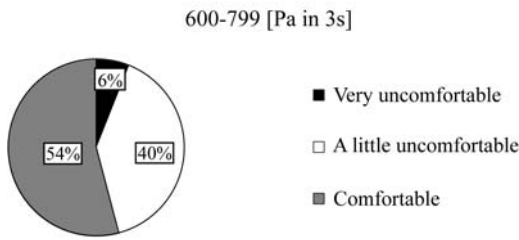


Fig. 1 German statistical data of passenger comfort

설치, 터널과 열차의 면적비, Hood 설치 등에 관한 많은 연구 [3-5]가 이루어지고 있다. 그러나 국내외의 대심도 고속철도 사례가 거의 없는 것과 결부하여 대심도 장대 터널의 정거장 내 압력감소를 위한 연구의 필요성이 절실한 상황이다.

본 연구에서는 이명감 현상과 관련된 환경개선을 위해 수직구를 정거장 안팎에 설치하여 압력 변화를 분석하였다. 실제 대심도 정거장 안팎에 수직구를 설치하여 데이터를 얻는 방법은 비용이 많이 들고 실험 장치 설비에 어려움이 따르기 때문에 수치적 방법을 채택하였다. 그리고 실험적 신뢰성을 높이기 위하여 논문[5]의 실험데이터를 비교하여 경계조건과 CFD 환경조건을 설정하였고 GTX(Great Train Express) 노선 A의 대곡역 도면[6]을 기초로 하여 터널의 면적, 정거장의 면적, 수직구의 면적을 결정하였다. 또한 압력 크기에 대한 분석적 비교를 위해 Table 1과 같이 이명감 기준을 설정하였으며, 이는 독일 DB Wurzburg-Fulda간 ICE노선에서 약 18000명을 대상으로 실시한 통계자료를 참고하였다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 3초 동안 800 Pa이하를 이명감 기준[7]으로 설정하였다.

2. 수치해석

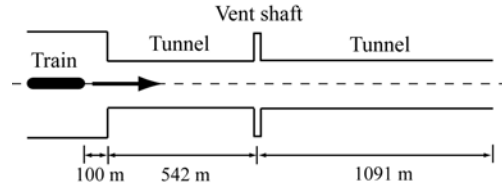
2.1 지배방정식

단일 유체로 구성된 지배 방정식 시스템은 비정상 압축성 Navier-Stokes Equations 이다.

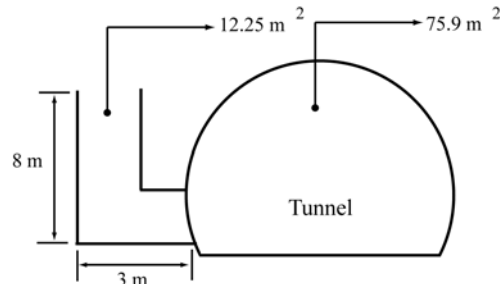
여기서 W, F, G 는 식 (2)와 같이 정의되고 V 는 검사체적, dA 는 미소 면적이다. 그리고 벡터 M 는 Body force와 Energy source terms을 포함한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V M dV \quad (1)$$

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p \hat{i} \\ \rho v v + p \hat{j} \\ \rho v w + p \hat{k} \\ \rho v E + p v \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix} \quad (2)$$



(a) General arrangement of 2D axis-symmetric



(b) Tunnel and vent shaft section

Fig. 2 Underground station with adjoining tunnel and vent considered by Wu[5]

ρ 는 유체의 밀도, v 는 속도 벡터를 나타내며 q 는 Heat flux, τ 는 Viscous stress tensor, p 는 압력, E 는 전체 질량당 에너지를 나타낸다. 여기서 E 는 Total enthalpy H , 이상기체 상태방정식과 관련이 있다. R 은 이상 기체 상수이다.

$$E = H - \frac{p}{\rho}, \quad H = h + \frac{|v|^2}{2}, \quad p = \rho R T \quad (3)$$

2.2 초기조건 및 경계조건 정의

본 연구에서 수치적 신뢰성을 높이기 위해 논문[5]의 실험 값과 비교하여 초기조건과 경계조건, CFD 계산조건을 도출하였다. Fig. 2와 같이 실제 수직구의 형상은 L자 모양의 3차원이며 수직구의 면적은 12.25 m², 터널의 면적은 75.9 m², 열차의 면적은 10 m²이다. 터널 입구와 터널 출구, 수직구 출구에 절대압 95802.79 Pa, 온도 287.15 K의 경계 조건을 주었다. CFD 사용 Tool은 범용적으로 상용화되어 연구의 정확성과 타당성을 검증받은 Fluent를 사용하였고, 차분방법으로는 시간 종속항에 Implicit solver, Gradient 보간을 위해 Green gauss node based를 사용하였다. 그리고 High-speed air flow에서는

Table 1 Pressure comfort criteria

Max. change of pressure(Pa)	Max rate of pressure change(Pa/s)	Acceptable
> 800 Pa	> 264 Pa/s	No
> 800 Pa	< 264 Pa/s	Yes
< 800 Pa	> 264 Pa/s	Yes
< 800 Pa	< 264 Pa/s	Yes

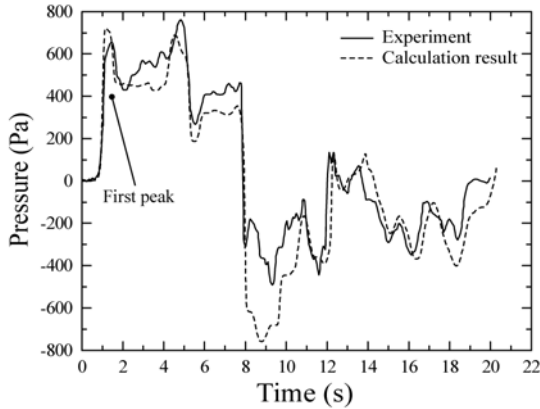


Fig. 3 Comparing experiment data for 2D axis-symmetric model calculation result

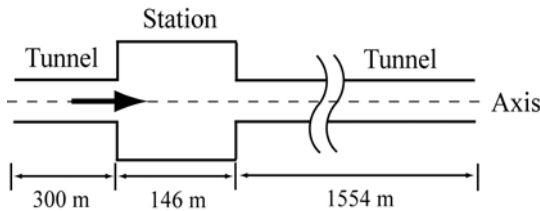


Fig. 4 Schematic for an underground station with adjoining tunnels

점성효과를 거의 무시할 수 있으므로 Inviscid flow 조건을 설정하고 열차의 움직이는 모델을 설정하기 위해 Dynamic mesh layering과 Sliding mesh model을 사용하였다. 또한 수치해석기 범으로 Roe의 플릭스 차이 분할법(Flux Difference Splitting)을 이용하였다[8]. 열차는 200 Km/h 속도로 일정하게 움직이며 2차원 Axis-symmetric으로 해석하여 결과 값을 도출하였다. Fig. 3은 결과 값과 논문[5]의 실험 데이터를 비교한 시간에 따른 압력 그래프이다. 3차원인 실제 형상과 2차원 Axis-symmetric 형상은 다소 차이가 있으나 First peak 값의 차이가 6%보다 작고 경향성이 매우 유사하므로 본 연구의 수치해석에 대한 조건이 타당하다고 사료된다.

2.3 형상 조건

본 연구의 모델은 GTX의 A line 대곡역의 도면[6]을 기초로 하였다. Fig. 4는 본 연구를 위해 구성한 터널과 정거장의 형상이며 Axis-symmetric 해석기법으로 인하여 Axis 축을 중심으로 360° 회전한 형상이 생성된다. 따라서 정거장의 면적은 179 m², 수직구의 면적은 66 m², 터널의 면적은 79 m²이고, 열차의 면적은 16 m², 열차 길이는 140 m이다. 그리고 Fig. 5는 Fig. 4의 터널과 정거장의 형상을 토대로 수직구의 영향을 고찰하기 위하여 정거장의 안쪽에 수직구를 설치하였다. 수직

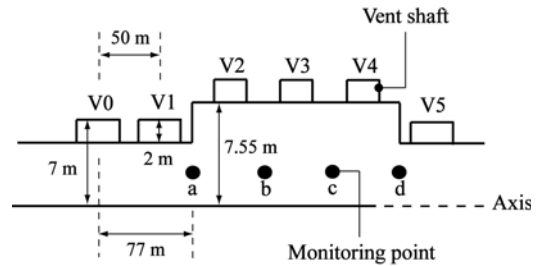


Fig. 5 Schematic for an underground station with vent shafts

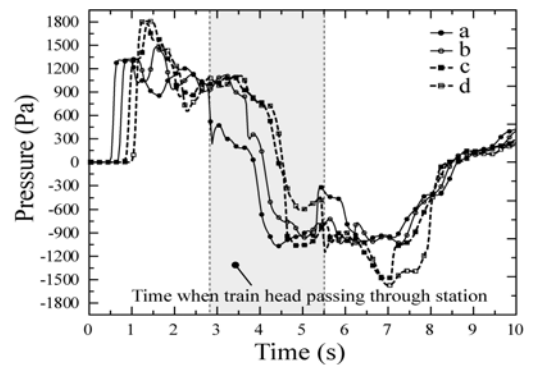


Fig. 6 Pressure histories in underground station without vent

구의 위치는 열차가 들어오는 정거장 입구에서 77 m 떨어진 첫 번째 수직구를 중심으로 우측으로 50 m씩 6개의 수직구를 배치하였고 각각 V0, V1, V2, V3, V4, V5라 하였다. 데이터의 측정지점은 a, b, c, d로 각각 정거장의 입구, 수직구 V2와 V3 사이, 수직구 V3와 V4 사이, 정거장 출구에 위치한다. 열차의 속도는 200 Km/h이며 열차는 정거장에 멈추지 않고 일정한 속도로 정거장을 빠져나간다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대심도 지하정거장의 압력 변화

Fig. 6는 수직구가 없을 때 정거장 내 네 지점(a, b, c, d)의 시간에 따른 압력변화를 보여준다. 압력파가 열차 선두에서 발생하여 정거장 입구로 들어와 a, b, c, d 지점에 차례로 영향을 주어 1.2초에 1300 Pa까지 상승한다. 그 이후 압력파가 정거장 출구에서 반사되어 나온 영향으로 d지점과 c지점이 1.4초에 차례로 1800 Pa까지 상승한다. a지점과 b지점은 정거장 입구에서 들어오는 팽창파가 정거장 출구에서 반사된 압축파와 부딪혀 1.4초에 약 1050 Pa로 감소한다. 그 뒤로 압력파는 반사와 전달을 반복하며 2.8초에 열차 선두가 a지점을 지나면서 정거장 내 압력이 최대 300 Pa까지 감소한다. 시간

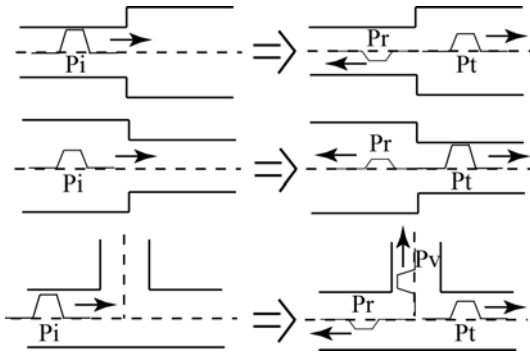


Fig. 7 Wave propagation and reflection at a tunnel junction. Compression wave incoming(Pi) from the main tunnel, reflected(Pr) and transmitted(Pt) into the main tunnel and transmitted(Pv) into the vent shaft.

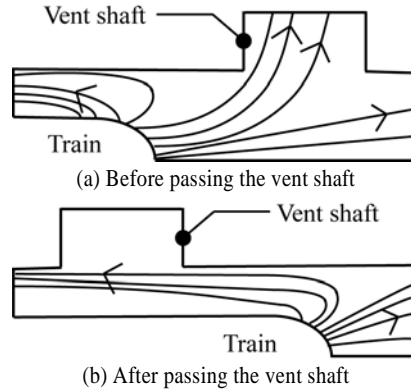


Fig. 9 Pressure field and streamline in underground station with vent shaft V1

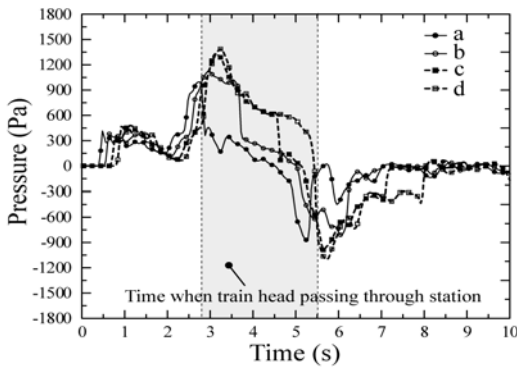


Fig. 8 Pressure histories in underground station with vent V1

이 지남에 따라 정거장 내에 팽창파의 영향이 전달되고 열차 선두가 3.7초에 b지점, 4.6초에 c지점, 5.5초에 d지점을 지나면서 각각의 위치에서 압력이 700 Pa의 폭으로 감소하게 된다. 그 후 열차 후미 부분의 낮은 압력과 팽창파의 영향으로 압력이 최대 -1500 Pa까지 낮아지며 반사되어 돌아오는 압축파의 영향을 받아 다시 상승한다. 8초 이후 열차 후미가 정거장 출구를 나가면서 a, b, c, d 위치의 압력거동은 같아지게 된다. Fig. 6에서 보는 것과 같이 열차가 출발하여 진행하면서 시간에 따른 압력이 계속적으로 상승과 하강을 반복 하는데 이 거동은 Fig. 7과 같은 음속이론으로 설명할 수 있다[5,9]. 압력파가 수직구를 통과하거나 형상이 변화되는 불연속 공간을 만나게 되면 파의 반사(Pr)와 전달(Pt)이 발생한다. 예를 들어 Fig. 7에서 압축파가 면적비가 넓어지는 영역으로 입사하면 반사되는 팽창파(Pr)와 전달되는 압축파(Pt)로 나누어지고, 면적비가 좁아지는 영역으로 입사하면 반사되는 압축파(Pr)와 전달되는 압축파(Pt)로 나누어진다. 그리고 압축파가 터널을 통과하면서 수직구와 같은 불연속면을 만나게 되면 반사되는 팽창파(Pr)와 전달되는 압축파(Pt)로 나누어지고 불연속면인

수직구를 통해 압축파(Pv)가 전달된다. 이와 같은 반사와 전달은 압축파와 팽창파를 끊임없이 생성하며 정거장 안의 압력과 밀도, 속도장의 변화에 영향을 미친다.

수직구가 없는 경우 최고압력은 1800 Pa 이상까지 상승하며 최저압력은 -1550 Pa까지 감소한다. 이는 Table 1의 이명감 기준에 부합되지 않기 때문에 압력을 감소시키기 위해 정거장 안팎에 수직구를 설치하여 위치에 따른 압력 감소 효과를 알아보았다.

3.2 수직구 위치에 따른 압력변화

3.2.1 수직구 단일 설치에 의한 효과

Fig. 8는 수직구 V1이 존재할 때 정거장 내 네 지점(a, b, c, d)의 시간에 따른 압력변화를 보여준다. 수직구 V1은 Fig. 6에서 2초전에 1800 Pa까지 상승했던 압력을 약 400 Pa까지 감소시킨다. 2.3초에 열차 선두부가 수직구를 지나면서 피스톤 효과와 열차풍의 영향[9,10]으로 정거장의 압력이 400 Pa에서 큰 폭으로 상승하는 것을 관찰할 수 있다. 이에 따른 Fig. 9의 그림 (a), (b)는 각각 열차가 수직구를 통과하기 전후의 수직구 주위의 유속을 보여준다. 그림 (a)는 대기압보다 높은 열차선두의 압력으로 인해 Streamline이 수직구를 향해 있고, 그림 (b)는 열차 상부의 낮은 압력에 의해 수직구로 향해 있던 Streamline이 열차 앞뒤로 흐르면서 동시에 열차 앞부분의 압력이 상승하게 되는 것을 관찰 할 수 있다. 이 효과로 인하여 열차 선두가 수직구를 통과하면서 발생하는 높은 압력의 영향으로 a지점은 1000 Pa, b지점은 1100 Pa, c지점은 1300 Pa, d지점은 1350 Pa까지 차례로 상승한다. 그리고 열차 선두부가 Monitoring point a, b, c, d을 지날 때 빠른 열차 속도에 의해 열차 상부의 압력이 낮아지는 열차풍 현상이 발생한다. 열차풍 현상은 열차의 속도가 빠를수록 크기가 커지며 열차가 지나간 후에도 열차풍의 영향이 남아 있어 전반적인 정거장 내부에 영향을 미친다[10]. Fig. 8에서 a지점은 2.8초, b

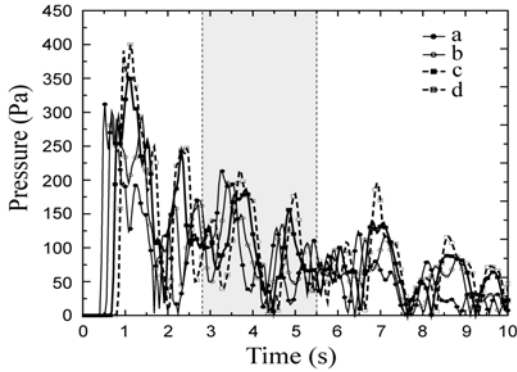


Fig. 10 Pressure difference histories in underground station with vent shaft V0-V1 and V1 at point a, b, c, d

지점은 3.7초, c지점은 4.6초, d지점은 5.5초에 열차풍의 영향을 받아 약 700 Pa의 압력이 감소함을 알 수 있다. 또한 5.5초까지 반사와 전달로 인한 팽창파의 영향으로 -1200 Pa까지 감소한다. 계속적으로 압력의 반사와 전달이 일어나며 8초에 열차 후미가 정거장 출구를 통과하면서 열차 후미부에 따르는 열차풍의 영향을 받아 0 Pa 이하로 감소한다. 그 후 0 Pa를 기준으로 a, b, c, d 지점의 압력파가 작은 폭으로 상승과 하강을 반복한다. Fig. 6와 비교하여 정거장 내 최고압력은 약 420 Pa 감소하였고 최저압력은 460 Pa 상승하였다. 결과적으로 V1이 존재할 때 정거장의 전반적인 압력의 크기를 감소시키는 것은 물론 압력파가 처음 정거장 입구로 들어와 2초 전의 압력을 큰 폭으로 감소시키는 역할을 한다. V1의 역할은 Fig. 10에서 좀 더 구체적으로 알 수 있다. Fig. 10은 수직구 V1 단일 설치와 V0, V1 이중 설치의 경우 각 지점(a, b, c, d)에 대한 정거장 내 압력 값의 차이를 시간에 따라 나타낸 것이다. 설치방법이 다른 위의 경우를 살펴보면 2초전까지 최대 400 Pa의 압력 차이를 보이지만 2초 이후에 200 Pa 안팎의 차이는 보이다 점점 그 차이가 감소함을 알 수 있다. 결론적으로 정거장 입구 방향 터널의 수직구의 경우 수직구의 수가 늘어날수록 초기에 정거장으로 들어오는 압력의 크기를 더 큰 폭으로 감소시키나 시간이 지남에 따라 수와 관계없이 압력의 차이가 거의 없고 동일한 경향성을 보인다.

Fig. 11은 수직구 V2가 존재할 때 정거장 내 네 지점(a, b, c, d)의 시간에 따른 압력변화를 보여준다. 0.5초 까지 수직구의 영향을 받지 않기 때문에 a 지점의 초기 압력만 1300 Pa까지 상승한다. 그 이후 압력파가 정거장 내 수직구 V2의 영향을 받아 b, c, d 지점이 차례로 감소되며 최대 약 610 Pa까지 감소된다. 그 뒤로 압력파의 반사와 전달로 인해 상승과 하강을 반복하며 2.8초에 열차가 정거장을 진입하면서 열차 상부의 열차풍에 의해 a지점의 압력이 약 -750 Pa까지 감소한다. b, c, d 위치는 압력 반사와 전달의 영향을 끊임없이 받

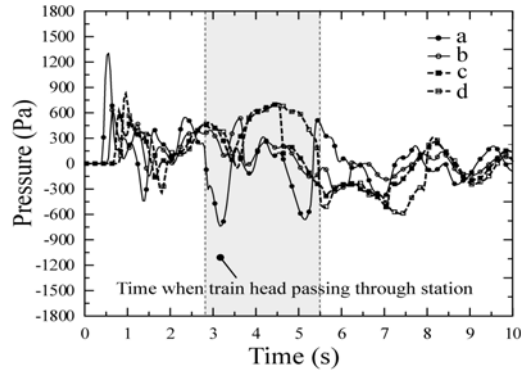


Fig. 11 Pressure histories in underground station with vent V2

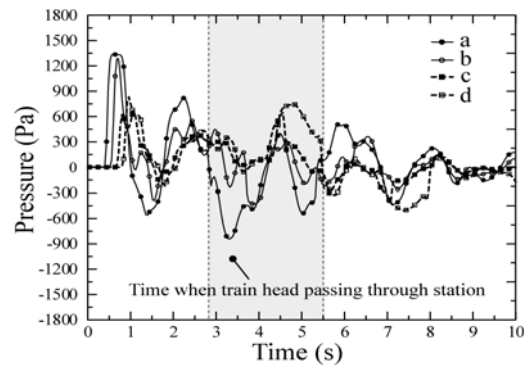


Fig. 12 Pressure histories in underground station with vent V3

며 열차 선두부가 3.7초에 b지점, 4.6초에 c지점, 5.5초에 d지점을 차례로 통과하면서 열차풍의 영향을 받는다. 그 이후 계속되는 압력 전달과 열차풍의 영향으로 8초에 열차 후미가 정거장 출구를 나감에 따라 압력이 0 Pa 중심으로 ± 300 Pa의 낮은 폭으로 상승과 하강 곡선을 그린다. 최고압력이 1300 Pa, 최저압력이 약 -720 Pa이며 Fig. 6와 비교했을 때 최대압력은 약 500 Pa 감소하고 최소압력은 약 840 Pa 상승하였다. 수직구 V2의 경우 정거장 내에 입구와 가장 가까운 위치에 있어 압력파가 V1보다 정거장 전반에 걸쳐 더 큰 폭으로 압력을 감소시키는 경향성이 보인다. 그러나 수직구를 만나기 전인 0.5초 내의 압력을 감소시키지 못하여 Table 1의 압력 기준을 만족시키지 못하였다.

Fig. 12는 수직구 V3가 존재할 때 정거장 내 네 지점(a, b, c, d)의 시간에 따른 압력변화를 보여준다. 수직구 V3가 있는 경우 압력파가 0.7초 전까지 수직구가 없을 때의 거동과 같이 수직구의 영향을 받지 못한 c, d 지점을 제외하고 1300 Pa까지 상승한다. 그 후 압력파의 반사와 전달로 상승, 하강을 반복하며 열차 선두가 2.8초에 a지점, 3.7초에 b지점, 4.6초에 c지점, 5.5초에 d지점을 차례로 통과하면서 열차풍의 영향을

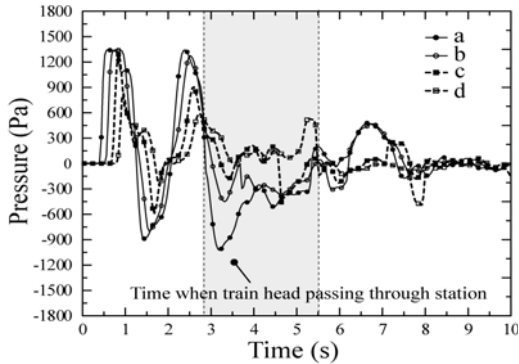


Fig. 13 Pressure histories in underground station with vent V4

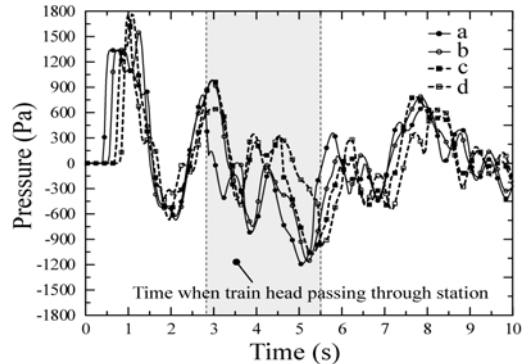


Fig. 14 Pressure histories in underground station with vent V5

받는다. 그 뒤로 Fig. 11과 비슷한 경향성을 보이며 이는 V2에서 V3 사이의 거리만큼 이동되어 나타난다. 8초 이후 열차 후미가 정거장 출구를 나감에 따라 0 Pa 중심으로 ± 200 Pa의 낮은 진폭을 형성한다. 정거장 내의 최대압력은 약 1300 Pa까지 상승하며 최저압력은 약 -820 Pa까지 감소한다. 수직구가 없는 경우와 비교하면 최고압력 500 Pa만큼 감소하고 최저압력 740 Pa만큼 상승하였다. V3의 경우 V2와 마찬가지로 수직구를 지난 후에 정거장의 전반적인 압력을 감소시켰지만 0.7초 전의 압력을 감소시키지 못하였다.

Fig. 13은 수직구 V4가 존재할 때 정거장 내 네 지점(a, b, c, d)의 시간에 따른 압력변화를 보여준다. 약 0.8초까지 a, b, c 위치에서 1300 Pa까지 상승하며, 이는 수직구가 없을 때와 동일한 현상을 보인다. 그 후 압력파의 전달이 계속되며 8초 이후 0 Pa를 기준으로 ± 200 Pa의 폭으로 상승과 하강을 반복한다. V4의 최대압력은 약 1300 Pa까지 상승하며 최소압력은 -1000 Pa까지 감소한다. 결과적으로 V4가 존재하는 경우 Fig. 6보다 전반적인 정거장 내 압력은 감소하지만 정거장 입구에서 가장 멀리 떨어진 수직구의 위치로 인하여 V1, V2, V3가 존재할 때 보다 압력의 감소폭이 작다.

Fig. 14는 수직구 V5가 존재할 때 정거장 내 네 지점(a, b, c, d)의 시간에 따른 압력변화를 보여준다. V5의 경우 정거장 입구로 들어오는 압력파가 0.9초까지 수직구가 없을 때와 동일한 현상을 보이며 정거장 전반에 걸쳐 1300 Pa까지 상승한다. 그 후 정거장 출구에 의해 압축파가 반사되어 d, c는 1750 Pa, b는 1550 Pa까지 상승하며 a 지점은 정거장 입구에서 들어오는 팽창파와 부딪혀 약 850 Pa까지 감소한다. 그 뒤로 수직구의 영향과 팽창파, 압축파의 전달로 인해 최대 -650 Pa까지 감소하고 시간이 흐름에 따라 a 지점은 열차 선두가 들어오는 2.8초에 800 Pa로 상승한 후 열차풍에 의해 다시 감소한다. 약 3초에 b 지점은 650 Pa, c, d 지점은 1000 Pa까지 상승하고 전달된 팽창파에 의해 다시 감소하게 된다. 그 후 열차풍과 압력파의 반사와 전달로 압력의 크기가 시간이 지

남에 따라 진폭을 형성한다. V5의 경우 최고압력이 1750 Pa까지 상승하며 최소압력은 -1200 Pa까지 감소한다. 특징적으로 V1, V2, V3, V4의 경우 8초 이후 열차후미가 정거장 출구를 통과하면 0 Pa를 중심으로 최대 ± 300 Pa의 진폭을 형성하지만 V5의 경우 8초 후에도 600 Pa까지 상승하며 약 10초에는 -400 Pa까지 감소한다. 이는 수직구가 정거장 출구와 가까운 언터널에 위치하여 압력을 감소시키는데 가장 많은 시간이 걸린다는 것을 알려 준다.

3.2.2 수직구 이중 설치에 의한 효과

수직구 V1, V2, V3, V4, V5를 각각 정거장 안팎에 설치했을 경우 독일의 설문조사 기준인 Table 1을 만족시키지 못하였다. 따라서 수직구를 이중으로 설치하여 압력 감소 효과를 살펴보았다.

정거장 입구터널에 수직구 V1을 기본으로 설치하고 수직구 V2, V3, V4, V5를 각각 설치하여 정거장 내의 압력장에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 15의 (a), (b), (c), (d)는 각각 a, b, c, d 지점에서 V1-V2, V1-V3, V1-V4, V1-V5 수직구를 설치하였을 때 정거장의 압력을 시간에 따라 나타난 결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 Fig. 6과 비교하여 정거장의 전반적인 최대, 최소 압력 범위가 감소한 것을 알 수 있다. a 지점의 값을 보면 V1-V2, V1-V3, V1-V4, V1-V5 모두 2초 전의 압력 값이 V1에 의해 최소 400 Pa까지 감소된 것을 관찰 할 수 있다. 이는 Fig. 6과 비교할 때 900 Pa이 감소한 것이다. 그 후 2.3초에 열차가 수직구 V1을 지나면서 V1-V2는 600 Pa, V1-V3는 700 Pa, V1-V4는 800 Pa, V1-V5는 1100 Pa까지 상승한다. 2.8초에는 열차 선두가 정거장 입구를 통과하여 열차풍에 의해 하강한다. 그 뒤로 압축파의 전달과 반사에 의해 상승, 하강 곡선을 그리다 5.2초에 반사되어 돌아오는 팽창파에 의해 V1-V2는 -4500 Pa, V1-V3는 -500 Pa, V1-V4는 -700 Pa, V1-V5는 -1000 Pa까지 감소한다. 그 후에도 반사와 전달의 영향은 계속 일어나며 열차 후미가 정거장 출구를 통과하는 8초에 0

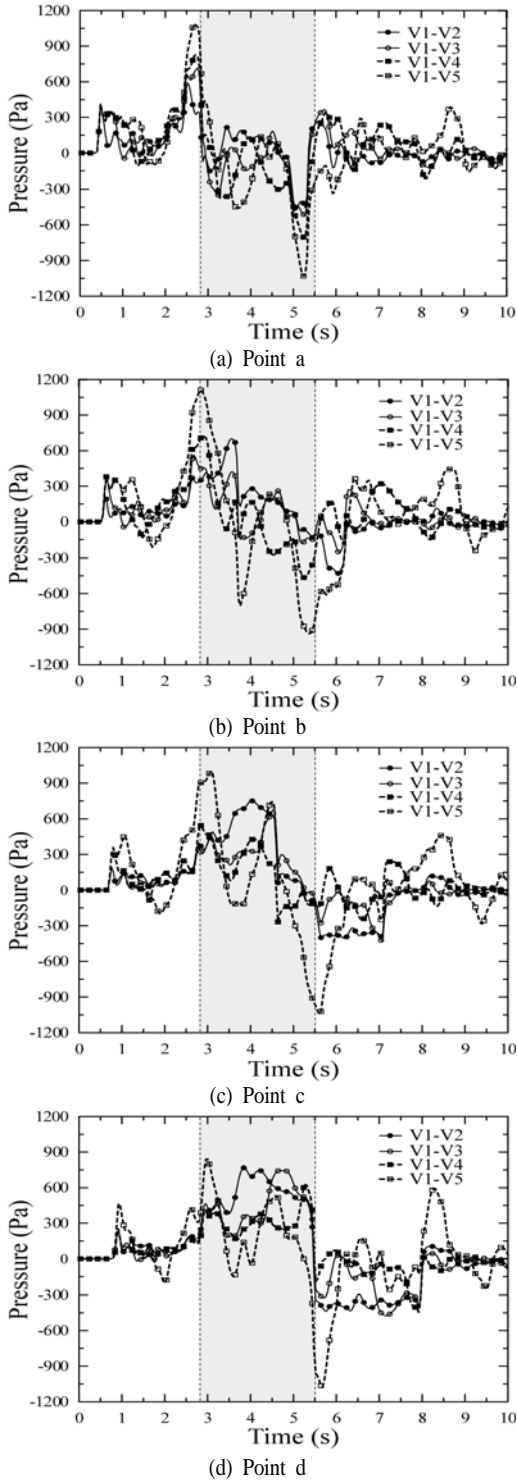


Fig. 15 Pressure histories in underground station of point a, b, c and d

Pa을 기준으로 ± 100 Pa의 진폭을 형성한다. V1-V5의 경우 열차후미가 정거장 출구를 나가면서 형상에 따른 반사와 전달로 인해 8.7초에 약 400 Pa까지 상승한다. a지점에서 수직구 V1-V2의 최대 압력은 600 Pa, 최저압력은 -450 Pa이며 수직구 V1-V3의 최대압력은 710 Pa, 최저압력은 -510 Pa, V1-V4의 경우 최대압력은 810 Pa이며 최저압력 -700 Pa, 수직구 V1-V5는 최대압력 1100 Pa, 최저압력 -1010 Pa이다. 정거장 입구에 측정위치 a가 존재하여 측정위치와 가장 가깝게 있는 V1-V2의 압력이 가장 낮게 측정 되었다.

그림 (b)의 경우 그림 (a)와 비슷한 경향성을 보이나 측정 위치가 V2와 V3 사이에 있어 a에서 b 위치로 압력파가 전파되는 시간 차이만큼 오른쪽으로 이동되어 데이터 값이 나온다. V1-V3, V1-V4, V1-V5의 경우 열차가 수직구 V1을 지나는 2.3초에 상승하는 압력으로 인해 V1-V2는 350 Pa, V1-V3는 550 Pa, V1-V4는 710 Pa, V1-V5는 1100 Pa까지 상승하며 반사되어 돌아오는 팽창파에 의해 다시 감소한다. 수직구 V1-V2의 경우 3.2초에 V2을 지나면서 700 Pa까지 상승한다. 그 후 그림 (a)와 같은 이유로 상승과 하강을 반복하다가 0 Pa 기준으로 곡선을 그리며 진폭을 형성한다. V1-V4, V1-V5의 경우 상대적으로 정거장 입구와 멀리 떨어진 위치로 인해 상승, 하강의 폭이 V1-V2, V1-V3보다 크다. V1-V2의 최대 압력은 700 Pa 이며 최저압력은 -420 Pa이다. 수직구 V1-V3의 경우 최대 압력은 560 Pa이고 최저압력은 -250 Pa, V1-V4의 경우 최대압력은 710 Pa이고 최저압력은 -480 Pa, 수직구 V1-V5의 최대압력은 1100 Pa, 최저압력은 -920 Pa이다.

그림 (c)와 그림 (d)도 그림 (a)와 비교하여 측정 위치에 따른 경향성의 차이를 보인다. 그림 (c)의 경우 측정 위치가 수직구 V3와 V4 사이에 존재하며 V1-V2의 최대 압력은 750 Pa, 최저압력은 -400 Pa이며 수직구 V1-V3의 경우 최대압력은 680 Pa, 최저압력은 -410 Pa, V1-V4의 경우 최대압력 520 Pa, 최저압력 -270 Pa, 수직구 V1-V5는 최대압력 1100 Pa, 최저압력이 -1020 Pa이다.

그림 (d)의 경우 측정 위치가 수직구 V3와 V4 사이에 존재하며 수직구 V1-V5의 영향으로 d 위치에서 그림 (a), (b), (c), (d)와 비교 하여 가장 낮은 최대값을 나타낸다. V1-V2의 최대 압력은 760 Pa, 최저압력은 -420 Pa이며 수직구 V1-V3의 경우 최대압력은 750 Pa, 최저압력은 -480 Pa, V1-V4의 경우 최대압력 620 Pa, 최저압력 -420 Pa, 수직구 V1-V5의 최대압력은 820 Pa, 최저압력은 -1080 Pa이다.

결과의 비교를 위해 수직구 설치에 따른 각각의 최대압력과 최저압력을 Fig. 16와 같이 나타내었다. 그림에서 수직구를 이중으로 설치한 경우를 살펴보면 V1-V5는 2.3초에 V1을 지난 후 상승하는 압력을 수직구 V5를 만나기 전까지 감소시키지 못한다. 따라서 최고 압력이 1100 Pa로 가장 높게 나오고

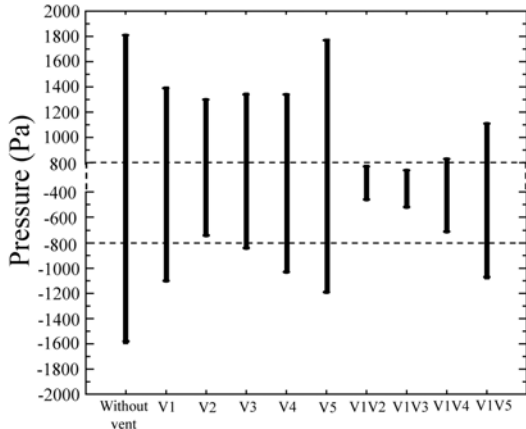


Fig. 16 Max and min pressure considered by vent shaft

정거장 내에 수직구가 존재 하지 않기 때문에 열차가 정거장에 들어와 열차풍의 영향으로 -1000 Pa 까지 감소하게 된다. 그림에서 보는 것과 같이 V1-V5는 이중 설치한 수직구들 사이에서 최고 압력과 최저 압력의 폭이 가장 크다. 그리고 V1-V2, V1-V3의 경우 Table 1의 기준을 준수하며 V1-V4의 경우 기준치 보다 약간의 차이는 있으나 그 차이는 미소하다. 추가적으로 수직구 V1을 제외하고 V2, V3, V4, V5를 이중으로 설치할 경우 두 수직구의 영향이 통합적으로 합쳐져 Fig. 6와 비교하여 전반적인 압력이 감소하나 정거장 입구 방향의 터널에 수직구가 존재하지 않아 초기에 정거장 입구로 들어오는 압력을 감소시켜 주지 못한다. 이는 독일 통계를 기초로 설정한 압력 기준을 준수하지 못하는 것은 물론 정거장 입구 쪽에 서있는 사람들에게 큰 소음 공해를 일으킬 것으로 보인다.

4. 결 론

- 1) 정거장 입구 방향에 위치한 터널의 수직구는 열차가 터널에서 출발하면서 발생시킨 압력파를 감소시키는 역할을 한다.
- 2) 정거장 내에 수직구를 설치할 경우 정거장의 전반적인 압력을 감소시키며 압력파가 들어오는 입구 방향에 가까울수록 정거장 내의 압력을 빨리 감소시킨다.
- 3) 정거장 출구 방향에 위치한 터널의 수직구는 압력파가 정거장 출구를 나간 후 수직구의 영향을 받기 때문에 압력을 감소시키는데 상대적으로 오랜 시간이 걸린다.
- 4) 수직구의 수가 늘어날수록 압력경감이 크게 일어나며 형상 변화에 의한 압력파의 반사와 전달이 많아진다.
- 5) 수직구를 정거장 입구 방향의 터널과 동시에 정거장 내부

에 이중으로 설치할 경우 압력 감소에 가장 효율적이다.

- 6) 본 연구에서 대심도 장대터널 정거장 안팎에 수직구를 설치하여 정거장 안의 압력 거동을 관찰하고 수직구 위치에 따른 특성을 확인하였다. 본 해석을 실제 대심도 정거장 안의 압력장 해석에 사용된다면 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국토해양부에서 수행하고 있는 미래도시철도기술포발사업의 지하철도 고속화에 따른 지하역사 공기압 문제 등에 대한 대책기술개발사업 “고속화 지하철도 지하정거장의 내부구조물 형상에 따른 압력경감 CFD 연구” 과제와 2011년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 2010, 김동현, “수도권 고속 및 광역급행철도 건설의 터널안전대책,” 철도저널, Vol.13-3, pp.3-7.
- [2] www.gtx.go.kr
- [3] 1996, 김희동, Toshiaki setoguchi, “수직관을 이용한 터널 내 비정상 압축파의 피동제어,” 대한기계학회논문집(B), Vol.21, pp.1095-1104.
- [4] 1999, 김희동, 김태호, 김동현, “입구후드가 고속철도 터널입구의 압축파에 미치는 영향,” 대한기계학회논문집(B), Vol.23, pp.56-68.
- [5] 2008, Wu, K.H., "Aerodynamic Aspects of High-speed Railway Underground Station with Adjoining Tunnels," 박사학위논문, Hong Kong university, Hong Kong.
- [6] 철도기술연구원, GTX 터널도면.
- [7] 2007, 김선홍, 문연오, 석진호, 김기림, 김찬동, 유호식, “이명감 특성을 고려한 호남고속철도 터널단면 설정에 관한 연구,” 한국암반공학회 특별심포지엄 논문집, pp.19-36.
- [8] www.fluent.com
- [9] 2000, Arturo Baron and Michele Mossi and Stefano Sibilla, "The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels," Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol.89-5, pp.365-401.
- [10] 2007, 김동현, 장용준, “고속(KTX) 및 기존 철도차량의 열차풍 현상 비교 분석,” 대한기계학회논문집(B), Vol.31, pp.173-180