

대심도 터널 내부에서 주행하는 열차의
속도증가에 따른 차량 내부압력 변화
Pressure change inside the train according to
an increase in speed of the train travelling in tunnels

최중근*, 정성민*, 김규홍*†

Joong-Keun Choi*, Seong-Min Jeong*, Kyu-Hong Kim*†

Abstract The Great Train eXpress (GTX) is a new high-speed subway travelling at 200 km/h in tunnels. Therefore, before the construction of the GTX, the aural discomfort should be evaluated for passenger comfort. The aural discomfort is related to the pressure change inside the train. Therefore, the pressure changes according to an increase in speed of the train are simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD). For the simulations, the data of the present subway train and the sealing time constant of the high-speed train are applied. When the results of the simulation are analyzed, the safety criterion isn't satisfied. To satisfy the safety criterion, the nose is changed from a blunt shape to a streamlined shape. After changing the nose, the safety criterion is satisfied. The GTX should be designed by considering the nose shape and the sealing time constant properly for passenger comfort.

Keywords : Aural safety criterion, Passenger comfort, Nose shape, Underground high-speed train, Pressure change

초 록 최고 시속 200 km로 운행될 대심도 급행철도와 같이 터널 내에서 열차가 고속으로 주행할 경우 승객의 이명감에 대한 고려가 설계과정에 반영되어야 할 것으로 보인다. 이명감은 차량 내부압력 변화와 연관되어 있으므로 현재 지하철의 사양에 고속철도의 기밀도 기준을 적용하여 열차 속도증가에 따른 내부압력 변화를 전산유체역학으로 해석하였다. 해석결과가 국내의 객실 내 압력변화 규정을 만족시키는지 차량 내부압력 변화를 분석해 보니 규정을 만족시키지 못하는 것을 확인하였다. 그래서 지하철의 무딘 전두부 형상을 유선형 형상으로 변경하여 내부압력 변화를 해석해 보았다. 형상 변화를 통해 내부압력 변화가 규정을 만족시키는 것을 확인할 수 있었다. 대심도 급행철도 차량의 설계 시 차량 내부압력 변화 규정을 만족시키도록 적절한 전두부 형상과 차량의 기밀도를 선정하여야 할 것으로 보인다.

주요어 : 청력 안전 기준, 승객편의, 전두부 형상, 대심도 급행철도, 압력변화

1. 서 론

수도권의 급속한 성장 및 신도시 개발로 전체통행량 및 장거리 통행수요가 꾸준히 증가하며 수도권 주요간선도로 및 서울 시계 진출입도로의 통행량 역시 지속적으로 증가하고 있다. 통

† 교신저자: 서울대학교 기계항공공학부, 부교수(aerocfd1@snu.ac.kr)

* 서울대학교 기계항공공학부, 연구원

행량 증가는 시민들의 출퇴근 시간증가와 불편을 야기하고 있다. 이러한 현재의 교통수단을 개편하기 위해 수도권 광역 급행철도(GTX)가 도입될 예정이다. GTX는 최고속도 200 km/h와 표정속도 100 km/h를 목표로 하고 있으며 지하 40 ~ 50 m 공간을 활용하게 된다. 그리고 3개 노선이 총 연장 145.9 km로 건설되는 새로운 대중교통수단이다[1].

앞에서 말한 것과 같이 GTX는 지하 40 m 이하에 건설되는 고심도 터널의 특성, 고속열차가 주행하는 고속철도 터널의 특성, 지하정차역이 건설되는 도시철도의 특성을 모두 가지고 있다. 이러한 특성들이 복합적으로 고려되는 교통수단이 처음으로 개발되는 것이므로 이에 대한 관련 기술의 정립 및 건설기술의 정립이 요구되는 실정이다[2].

고속철도와 같은 기존의 열차들에서 야기된 공기역학적 문제들에 대해서는 연구가 진행되었다. 열차와 관련된 공기역학적 문제들에는 속도 증가에 따른 공력저항의 증가, 열차 교행시 발생하는 공력문제, 공력소음, 열차주위 유동흐름에 따른 진동과 터널을 통과할 때 발생하는 압력파에 의한 승객이명감 등을 들 수 있다. 이러한 사항들을 개선하며 열차의 운행속도를 증가시켜 나가고 있는 실정이다[3]. GTX에서도 이와 같은 공기역학적 문제들이 발생할 것으로 예상된다. GTX와 관련하여 진행된 연구로 Oh[4]의 지하정거장에서 압력과 거동에 관한 연구가 있다. GTX의 최고속도와 같은 200 km/h로 터널 내부를 열차가 지나칠 때 정거장에 설치된 환기구의 위치에 따른 압력과 변화를 연구하였다. 터널 내부에서는 열차 전체저항의 90% 이상을 공력저항이 차지하므로 속도 증가에 따른 공력저항 증가와 전두부 형상에 공력저항에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되었다[5, 8]. 기존 연구와 더불어 터널에서는 열차 내부의 압력변화에 대한 연구도 진행되어야 한다. 터널에서는 열차속도가 증가하면 열차의 외부압력이 변화하여 차량의 기밀도에 따라 내부의 압력이 영향을 받는다. 내부압력 변화는 승객의 이명감과 연관이 되어 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 현재 도시철도의 차량 제원을 바탕으로 터널을 주행할 때 열차의 내부와 외부 압력을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 해석하였으며 이를 기준으로 GTX의 최고속도인 200 km/h로 증가시켰을 때 압력변화에 대해 비교·분석하였다. 그리고 유선형으로 열차의 형상을 변화시켰을 때의 압력변화도 분석하였다.

2. 수치해석 대상 및 방법

2.1 해석 대상

현재의 도시철도를 기준으로 터널에서 주행속도 증가와 전두부 형상 변화에 따른 열차의 외부와 그에 따른 내부압력 변화에 대해서 해석하고 분석하고자 한다. 이에 따라 기준이 되는 해석대상을 제 2기 지하철로 정하였고 이 지하철의 차량제원을 해석에 이용하였다. 제 2기 지하철의 전두부 형상은 전면이 평평한 형상이고, 길이 160 m(8량), 열차의 단면적은 12.8 m²이다. 그리고 터널의 내공은 45.58 m²이다. 열차와 터널의 단면적을 가지고 계산한 열차/터널 단면적비는 0.281이다. 열차의 최고속도는 100 km/h, 감가속도는 1 m/s²이고 등속구간은 30 sec로 하여 수치해석을 위한 열차의 스케줄을 선정하였다[6].

최고속도와 감가속도를 이용하여 열차의 스케줄을 그래프로 그려보면 Fig. 1과 같다. 이 그래프를 이용하여 열차의 운행거리를 계산하였고 이 거리를 열차의 한 정거장 운행거리로 선정

하고 해석을 수행하였다. 그리고 지하철에 스크린 도어가 설치되어 있으므로 정거장에서 터널 단면적의 변화는 없다고 가정하여 전구간에서 터널의 단면적은 일정하게 설정하였다.

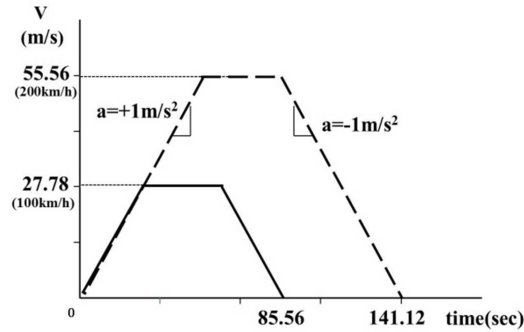

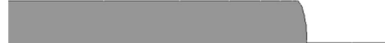
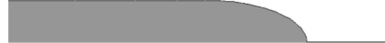


Fig. 1 The schedules of train run in accordance with cruise speed: 100km/h, 200km/h

열차속도 증가와 전두부 형상의 변화에 따른 차량 외부의 압력변화를 해석하기 위해 제 2 기 지하철과 동일한 차량제원에 속도만 200 km/h 로 증가시킨 해석을 수행하였고, 전두부 형상을 5 m 길이의 유선형 형상으로 변경한 차량형상에 대해서도 해석을 수행하였다. 해석 대상에 대해 정리하면 다음의 Table 1.과 같다.

Table 1.
Train and Tunnel configurations: Based on Seoul Subway Line 8

| Case No. | Train-tunnel configuration | Nose length (m) | Tunnel diameter (m) | Blockage ratio | Maximum velocity (km/h) |
|----------|---|-----------------|---------------------|----------------|-------------------------|
| 1 |  100km/h-N0.5 | 0.5 | 7.62 | 0.281 | 100 |
| 2 |  200km/h-N0.5 | 0.5 | 7.62 | 0.281 | 200 |
| 3 |  200km/h-N5 | 5.0 | 7.62 | 0.281 | 200 |

2.2 수치해석방법

공간이 한정된 터널 내부를 열차가 고속으로 주행하므로 유동에 압축성 효과가 발생한다. 이를 고려하기 위해 압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 선정하였다. 그리고 k-ε 난류모델을 적용하였다. 실제 열차는 축대칭 형상이 아니지만 축대칭 해석을 통해서도 열차 전두부 형상변화에 따른 효과를 확인할 수 있으므로 본 연구에서 축대칭 해석을 수행하였다.

해석을 위해 정렬격자를 사용하였으며 Fig. 2 에서와 같이 전체 구간을 3 부분으로 나누었다.

열차를 포함하는 터널, 열차 뒤쪽의 터널과 열차 앞쪽의 터널로 구분하였다. 열차를 포함하는 터널부분은 격자를 이동시켜서 열차가 움직이는 것을 모사하였다. 그리고 이 구간을 제외한 나머지 터널 구간은 Layering 기법을 적용하였다. 이 기법은 열차가 움직이면 그 거리만큼 터널 구간의 격자를 생성하고 제거해주기 위해 사용되었다. 그리고 터널의 양끝에서는 열차에 의해 생성된 파가 되돌아와서 간섭하는 것을 방지하기 위해 Non-reflecting boundary 조건을 적용하여 생성된 파가 터널 밖으로 빠져나가도록 하였다.

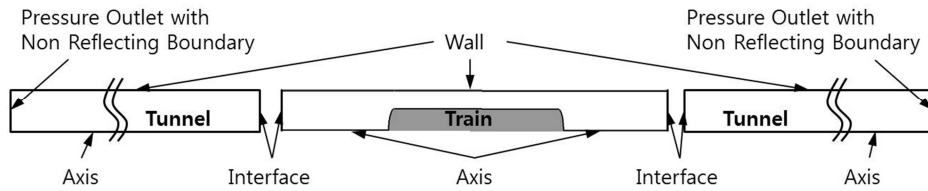


Fig. 2 Construction of domain and boundary conditions

해석 기법을 검증하기 위해 Maeda et al.의 실험과 동일한 조건으로 해석하여 본 연구에서 사용한 기법에 대한 검증을 수행하였다[7]. 실험에서 3 가지 형상의 전두부 형상을 사용하였고, 이 형상들이 터널로 진입할 때 발생시키는 압축파를 측정하였다. 본 연구에서 사용한 기법을 이용한 수치해석결과가 실험의 결과와 유사하다는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3). 이를 통해 해석기법에 대한 타당성을 확보하였다.

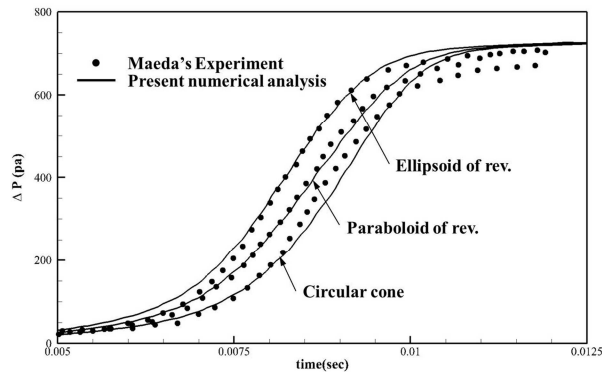


Fig. 3 Comparison of jumps of pressure for the three shapes of the nose; ••: experimental results, —: numerical results

4. 해석 결과

4.1 차량 표면압력 비교·분석

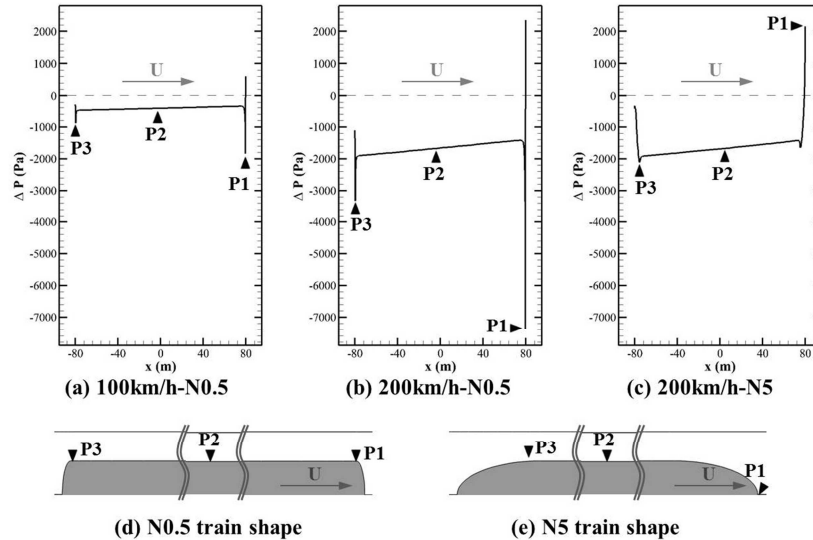


Fig. 4 Surface pressures of the trains at the middle of the constant speed region ((a),(b) and (c)) and the measurement points on the train surface ((d) and (e))

터널에서 주행하는 열차의 속도증가와 전두부 형상 변화에 따른 차량표면의 압력을 비교해 보았다. 열차가 최고속도로 주행하고 있는 등속구간 중간을 비교시점으로 선정하였다. Fig. 4를 보면 (d)의 형상을 이용하여 (a)는 100 km/h, (b)는 200 km/h의 속도로 주행한 결과이다. (d)형상은 무딘 형상이므로 모서리 부분에서 저압영역이 발생하였다. 그리고 속도가 증가하면 이 부분에서 압력이 더 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그리고 차량의 중간부분의 압력도 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 200 km/h의 열차의 전두부 형상을 유선형으로 변경한 결과를 (c)에서 볼 수 있다. 형상변화로 (b)의 결과와는 다르게 전두부 쪽에서 저압영역이 없어진 것을 볼 수 있다. 하지만 차량 중간부분의 압력은 비슷하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

열차의 주행 시 차량의 내부압력을 분석하기 위해서는 외부압력을 측정하여야 하고, 측정을 위한 적절한 위치를 선정하여야 한다. 본 연구에서는 표면압력이 대기압과 많은 차이를 보이는 전두부와 후미부의 두 곳과 승객들이 있는 차량 중간을 측정위치로 선정하였다. 전두부에서는 형상에 따라 선정위치의 차이가 있다. (d)형상의 경우는 무딘형상의 모서리 부분, (e)형상의 경우는 유선형 형상의 끝부분을 측정위치로 선정하였다.

4.2 열차 주행 시 차량 외부압력 비교·분석

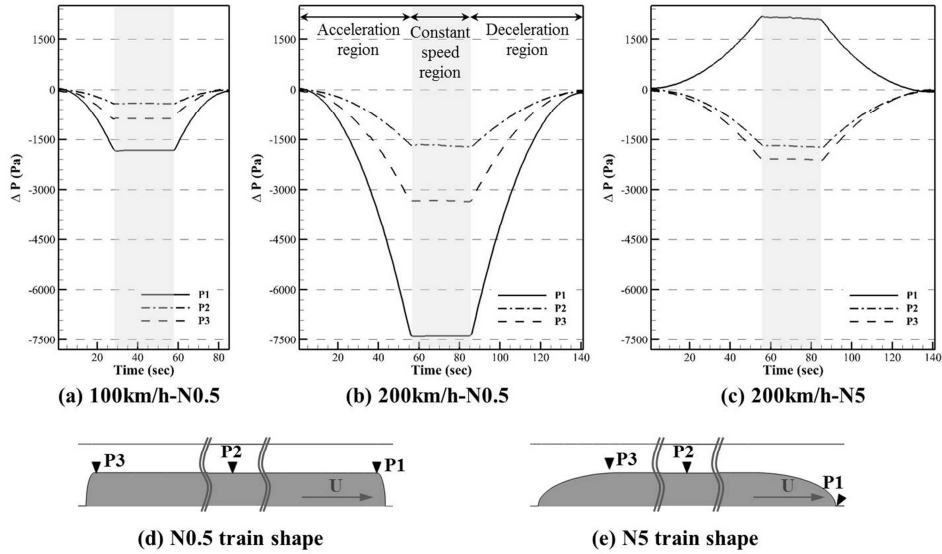


Fig. 5 Pressure histories at measurement points of the train surface ((a), (b) and (c)) and the measurement points on the train surface ((d) and (e))

가속-등속-감속의 스케줄을 가지는 열차의 터널 주행 시 차량의 외부압력을 보면 해석결과들의 경향이 유사한 것을 확인할 수 있다(Fig.5 (a), (b)와 (c)). 가속 구간에서는 점차적으로 외부압력이 낮아지고, 등속구간에서는 일정하게 유지되며, 감속구간에서 가속구간과 반대로 정지할 때까지 압력이 회복되는 것을 확인할 수 있다.

속도증가에 따른 외부압력의 변화를 보면 등속구간에서 압력이 현저하게 낮아지는 것을 확인할 수 있다(Fig.5 (a)와 (b)). 주행속도 증가로 전두부 쪽에서 최대압력이 -1829.01 Pa 에서 -7368.67 Pa 로 약 4.0 배 정도 낮아졌다.

200 km/h 의 동일한 속도에서 전두부 형상 변화로 최대압력 측정위치가 변경되었다. 그래서 무딘 형상에서는 음의 부호를 가졌던 최대압력이 유선형 형상에서는 양의 값이 되었다. 무딘 형상과 유선형 형상의 최대압력은 -7368.67 Pa 과 2142.77 Pa 이다. 최대압력의 절대값을 비교해보면 형상변화로 약 3.44 배 낮아진 것을 확인할 수 있다(Fig.5 (b)와 (c)).

4.3 열차 주행 시 차량 내부압력 비교·분석

국내에는 철도차량의 내부압력 변화 세부기준이 철도차량 안전기준에 관한 지침에 나와있다 [9]. 우선 정지 상태에서 차량 내부압력이 3000 Pa에서 1100 Pa로 강압되는데 18 sec 이상이 소요되어야 한다. 그리고 최고운행속도로 주행할 때의 차량 내부압력 기준은 다음과 같다.

- (1) 단위 시간당 압력변화 : $\Delta P/\Delta t \leq 500 \text{ Pa/s}$
- (2) 3초간 최대 압력변화 : $\Delta P \leq 800 \text{ Pa}$
- (2) 10초간 최대 압력변화 : $\Delta P \leq 1000 \text{ Pa}$
- (3) 60초간 최대 압력변화 : $\Delta P \leq 2000 \text{ Pa}$

차량의 기밀도(τ)는 안전기준을 만족하는 18 sec로 설정하고 UIC 779-11에서 제시한 다음의

식을 이용하여 차량 내부압력이 기준을 만족하는지 알아보았다. 외부압력은 차량 표면에서 최대압력을 나타내는 전두부 위치의 값을 사용하였다[10].

$$\frac{dP_{\text{internal}}}{dt} = \frac{1}{\tau} (P_{\text{external}} - P_{\text{internal}})$$

여기서, τ 는 동적기밀계수

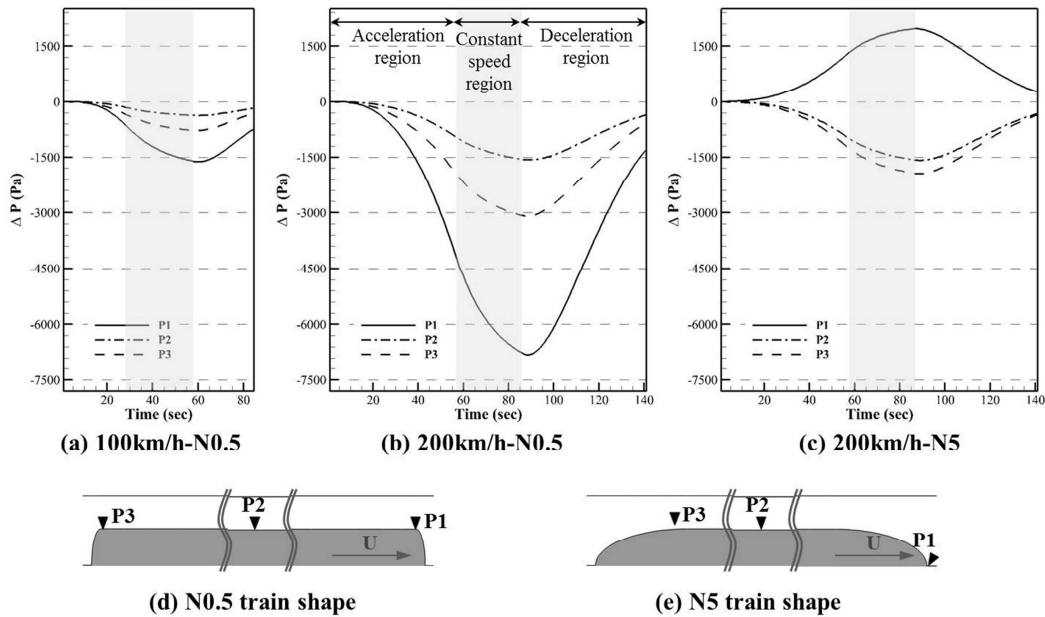


Fig. 6 Pressure histories inside the cabin ((a), (b) and (c)) and the measurement points on the trains ((d) and (e))

열차가 출발하여 정지하는 과정 동안 차량 내부압력의 변화를 관찰하였다(Fig. 6 (a), (b)와 (c)). 가속하는 동안 외부압력이 낮아지면서 차량이 완벽한 밀폐상태가 아니므로 기밀도에 따라 내부압력이 서서히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 등속구간에서는 외부압력이 낮은 상태가 유지되므로 내부압력도 외부압력에 근접하게 꾸준히 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 감속구간에서는 외부압력이 회복되면서 내부의 압력도 다시 회복되는 것을 볼 수 있다.

열차의 주행속도 증가를 통해서 차량 내부에서 경험하는 최대압력차는 -1624.89 Pa에서 -6813.53 Pa로 4.2 배로 더 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 6 (a)와 (b)). 그러나 무딘 형상에서 유선형으로 형상을 변경한 후 최대압력차는 그 절대값이 6813.53 Pa에서 1966.37 Pa로 줄어들게 되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6 (b)와 (c)). 유선형 형상에서 최대압력차의 절대값은 100 km/h의 무딘 형상 결과에서 최대압력차의 절대값보다 조금 큰 값으로 형상 변화로 상당히 줄어드는 것을 볼 수 있다.

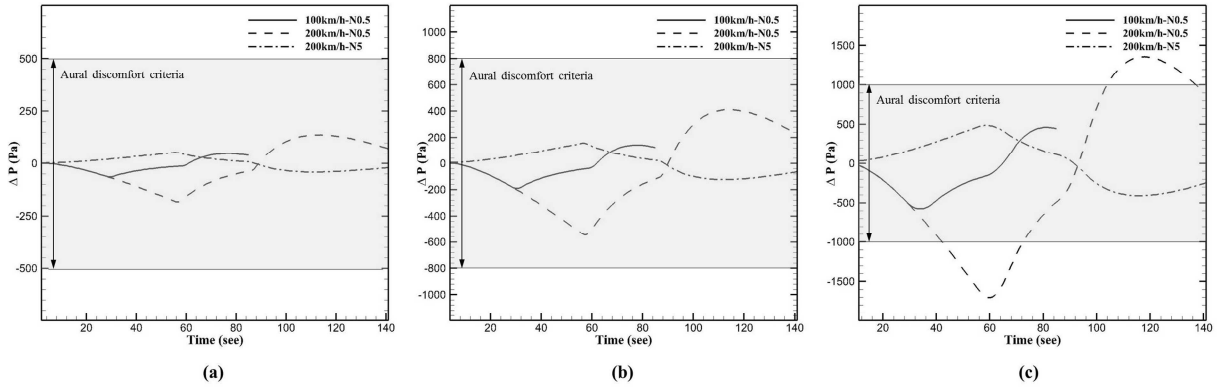


Fig. 7 Pressure changes inside trains and aural safety criteria:
 (a) in 1 second, (b) in 3 seconds and (c) in 10 seconds

차량 내부압력 변화가 철도차량 안전기준을 만족하는지 알아보았다(Fig. 7). 단위 시간당 내부압력 변화의 기준에는 여유 있게 만족하는 것을 확인할 수 있다(Fig.7 (a)). 3초간 내부압력 변화 기준도 만족하는 것을 확인할 수 있다(Fig.7 (b)). 그러나 전두부 길이가 0.5 m, 주행속도가 200 km/h 인 경우는 교행 상태가 된다면 차량 외부의 압력이 더 낮아지므로 내부압력도 더 낮아져 기준을 넘어설 가능성이 보인다. 10초간 내부압력 변화 기준을 적용하여 보니 전두부 길이가 0.5 m이고, 속도가 200 km/h인 경우가 기준을 만족하지 못하는 것을 볼 수 있다(Fig.7. (c)). 그러나 전두부를 길이가 5 m 인 형상으로 변경한 후에는 내부압력변화가 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 현재의 지하철을 기준으로 GTX의 목표속도인 200 km/h로 주행하는 열차와 유선형 전두부를 가지는 열차의 차량 외부와 내부압력을 해석하고 비교·분석 하였다.

열차의 속도증가와 전두부 형상에 따라 차량 표면압력 분포가 다르게 나타났다. 열차 속도가 증가하면 무딘 전두부 형상에서는 박리의 영향이 커져서 상당한 압력저하를 야기한다. 그러나 유선형 형상에서는 박리가 발생하지 않아서 급격한 저압영역이 사라진다. 이러한 압력분포의 차이가 내부압력에 영향을 주게 된다.

무딘 형상에서는 외부의 급격한 압력저하로 인해서 내부압력도 따라서 낮아지게 되어 안전 기준을 만족시키지 못하였다. 그러나 전두부를 유선형으로 변경하였을 때에는 급격한 압력변화가 발생하지 않아 안전기준을 만족하였다.

공간이 한정된 터널에서 열차의 속도증가는 차량 내부압력의 변화에 영향을 미친다. 이러한 압력변화가 승객에게 불편함을 줄 수 있으므로 터널 내에서 고속으로 주행하는 GTX와 같은 새로운 시스템의 설계 시 이를 고려한 열차의 설계가 이루어져야 한다.

후 기

This work was supported by Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (No. 12PRTD-C061758-02) and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No. 2009-0083510).

This work was also supported by the Human Resources Development program (No. 20124030200030) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Trade, Industry and Energy.

참고문헌

- [1] www.gtx.go.kr (Internet homepage)
- [2] 김동현 (2010) 수도권 고속 및 광역급행철도 건설의 터널안전대책, *철도저널*, 13, pp. 3-7.
- [3] Raghu S. Raghunathan, H.-D. Kim, T. Setoguchi, (2002) Aerodynamics of high-speed railway train, *Progress in Aerospace Sciences*, 38, pp. 469-514.
- [4] H.J. Oh, D.Y. Shin, S.G. Lee, D.H. Kim, et al. (2012) Numerical Study of Pressure Wave in Underground Station with Vent Shaft Position, *Conference of THE KOREAN OF COMPUTATIONAL FLUIDS ENGINEERING*, 11, pp. 306-313.
- [5] A. Baron, M. Mossi, S. Sibilla (2001) The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, pp. 365-401.
- [6] http://www.seoul.go.kr/info/organ/office/subwaydevco/data/1231851_14094.html (Internet homepage)
- [7] David Uystepuyst, Mame William-Louis, Emmanuel Creuse, Serge Nicaise, et al. (2011) Efficient 3D numerical prediction of the pressure wave generated by high-speed trains entering tunnels, *Computers & Fluids*, 47, pp. 165-177.
- [8] J.K. Choi, T.K. Kim, S.M. Jeong, et al. (2013) Aerodynamic drag analysis of underground high-speed train according to velocity and nose shape, *Conference of THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY*, pp. 378-385.
- [9] 2010, 철도차량 안전기준에 관한 지침, 국토해양부고시 제 2010-637 호.
- [10] H.B. Kwon, S.W. Nam, (2012) Comparison of Passenger Ear Discomfort with regard to Cabin Position When a High-speed Train Passes Through Tunnel, *Conference of THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY*, pp. 1679-1684.