

전산유체역학을 이용한 고속철도차량 객실 내 압력변동 평가

Assessment of the Pressure Transient Inside the Passenger Cabin of High-speed Train Using Computational Fluid Dynamics

권혁빈[†] · 남성원* · 곽종현**

Hyeok-bin Kwon · Sung-won Nam · Jong-hyun Kwak

Abstract The pressure transient inside the passenger cabin of high-speed train has been assessed using computational fluid dynamics (CFD) based on the axi-symmetric Navier-Stokes equation. The pressure change inside a train have been calculated using first order difference approximation based on a linear equation between the pressure change ratio inside a train and the pressure difference of inside and outside of the train. The numerical results show that the pressure change inside the new Korean high-speed train passing through a tunnel of Seoul-Busan high-speed line at the speed of 330km/h satisfied well the Korean regulation for pressure change inside a passenger cabin if the train is satisfying the train specification for airtightness required by the regulation.

Keywords : Pressure Transient, Tunnel, Computational Fluid Dynamics, Aerodynamics, High-speed Train

요 지 축대칭 Navier-Stokes 방정식에 기반한 전산유체역학을 이용하여 고속철도차량 객실 내 압력변동을 평가하였다. 차량 내부의 압력변동은 차내 압력변화율과 차 내외부 압력변동의 선형 관계식에 근거한 1차 차분식을 이용하여 계산되었다. 전산해석 결과, 새로운 한국형 고속철도 차량이 경부고속선 터널을 330km/h로 통과할 시 발생하는 객실 실내압 변동은 해당 차량이 기밀도 국내기준을 만족한다고 가정하였을 시 철도차량의 실내압력변동 국내 기준치를 잘 만족하는 것으로 나타났다.

주요어 : 압력 변동, 터널, 전산유체역학, 공기역학, 고속열차

1. 서론

고속철도차량이 터널에 진입하게 되면 터널 내의 공기를 압축하여 터널 내에 압축파가 생성되며, 생성된 압축파는 음속으로 터널 내를 진행하다가 끝단에서 반복적으로 반사되면서 열차 주위의 압력을 급격히 변동시키게 된다. 열차 주위의 압력변동으로 인하여 객실 내의 압력도 변화하게 되는데, 이로 인하여 객실 내의 승객은 청각적 불쾌감을 느낄 수 있다. 국내에서는 정부가 객차 등의 기압변화 세부기준[1]에서 고속철도차량의 객실 내 기압변화에 대해 평가 기준을 제시하여 열차 운행 시 기압변동이 승객에 미치는

영향이 최소화되도록 하고 있다. 이에 따라 차량의 제작과 선로의 설계 시에는 객실 내 기압변화의 기준을 만족할 수 있도록 차량의 기밀도, 터널의 단면적 등을 결정하여야 하며, 최종적으로 기준의 만족 여부를 평가하여야 한다.

객실 내 압력변동을 평가하기 위해서는 우선 차량 외부, 즉 터널 내의 압력변동에 대한 데이터가 필요한데, 이를 얻기 위한 방법으로는 크게 실험적 방법과 수치적 방법이 있다. 실험적 방법은 축대칭 축소모형을 이용하여 터널 속으로 열차를 고속으로 진입시켜 터널 내의 압력을 측정하는 장비를 이용하는 것으로서 Vardy[2]와 Wolf[3] 등의 연구가 있으며, 국내에서는 김동현[4]과 김태운[5]이 상기 장비를 구축한 바 있다.

한편 전산유체역학의 발달로 열차와 터널 주위의 상대적인 운동을 고려한 유동장 해석이 가능해짐에 따라 수치적인 방법으로 터널 내의 압력변동을 평가하는 방법이 개발되었는데, 1993년 Maeda[6]는 압축성 축대칭 Euler 방정식

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원
E-mail : hbkwon@krti.re.kr

TEL : (031)460-5346 FAX : (031)460-5023

* 정회원, 한국철도기술연구원 철도환경연구실 책임연구원

** 현대로템 선형제품개발팀 선임연구원

을 사용하여 진입 압축파의 파두 형태에 대해 실험치와 비교적 일치하는 해석 결과를 얻어냈으며, 압력 구배를 최소화하기 위해서는 열차 전두부 길이와 단면적 변화율을 고려하여야 한다는 것을 밝혀내었다.

권혁빈[7,8]은 Navier-Stokes 방정식을 이용한 축대칭 수치해석 프로그램을 개발하여 열차의 전두부 형상을 고려한 터널 통과 시의 터널 내부 및 입출구 유동장을 해석하였으며, 또한, 미기압파를 최소화시키는 최적의 전두부 면적분포에 대하여 연구하였다[9].

본 연구에서는 고속열차 객실 내의 압력변동을 평가하기 위하여 고속철도차량이 터널을 통과할 때 발생하는 유동장을 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치적으로 모사하였다. 전산유체해석 프로그램은 Roc의 FDS법에 기반하고 열차와 터널 사이의 상대운동을 효과적으로 계산하기 위하여 변형된 패치드 그리드법을 이용하였다. 열차의 통과 시 터널 내의 압력변동이 전산유체해석으로 모사되었고, 차량 내부의 압력변동은 차내 압력변화율과 차 내외부 압력변동의 관계식에 근거한 1차 차분식을 이용하여 계산하였으며, 해석 결과를 국내 기준과 비교하여 만족 여부를 평가하였다.

2. 수치해법

2.1 지배방정식 및 수치해법

본 연구에서는 식 (1)에 나타난 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. Q 는 보존량 벡터, E , F 는 플럭스 벡터, H 는 소스항을 의미하며, F_v , E_v 는 점성 플럭스 벡터, H_v 는 점성 소스항을 나타낸다. 공간 변수들은 터널 직경으로 무차원화 하였으며, 나머지 변수들은 자유류 값들로 무차원화 하였다. 대류항의 플럭스는 Roc의 FDS를, 공간정확도를 높이기 위해서 Koren의 limiter를 도입한 MUSCL 기법을 사용하였고 시간적분법은 AF-ADI를 사용하였다[7].

$$\partial_t Q + \partial_x E + \partial_y F + H = \frac{1}{Re_c} \left(\partial_x E_v + \partial_y F_v + H_v \right) \quad (1)$$

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho e]^T$$

$$E = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (\rho e + p)v]^T$$

$$F = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (\rho e + p)v]^T$$

$$H = \frac{1}{y} [\rho v, \rho uv, \rho v^2, (\rho e + p)v]^T$$

열차의 초기 조건은 열차가 터널에 진입하기 전에 발생할 수도 있는 수치적인 압축파를 피하기 위해서 권혁빈 [7,10]이 제안한 완만한 출발(Smooth start) 기법을 사용하

였다. 이 방법은 열차를 정지 상태에서 서서히 주행속도까지 가속시키는 것으로서 수치적 파동을 완전히 제거할 수 있을 뿐 아니라 속도 변화가 완만하고, 짧은 거리에서도 출발이 가능하므로 계산 시간을 크게 감소시킬 수 있다. 수치해석의 경계 조건으로서 터널 벽면에서의 유동 속도는 열차의 상대적 운동에 의해 결정되며, 벽면에서의 압력은 벽면에 수직인 운동량 방정식을 통하여 구할 수 있다. 또한 원방 경계조건은 자유흐름 조건과 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량의 외삽을 통하여 속도, 압력 및 밀도를 구하였고, 무반사 조건을 부여하였다.

2.2 계산 조건

수치해석을 위하여 대상 시스템을 선정하고 공력모델 [11]을 구축하여 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 객실 내 압력변동평가의 대상 열차는 호남고속선에 투입 예정인 최고속도 330km/h의 KTX-II열차이며, 현상시험치와의 비교검증을 위하여 KTX열차에 대해서도 수치해석이 수행되었다. 압력변동의 최대폭을 결정짓는 최대단면적에 있어서 KTX-II열차(10.008m²)가 KTX(9.791m²)에 비하여 더 큰 것으로 나타나고 있다.

터널의 경우에는 경부고속선에 위치한 상봉 1터널, 궁현터널 및 운주터널을 대상으로 선정하였으며, 각각 길이가 347m, 950m 및 4020m로서 터널 길이에 따른 압력변동 특성의 파악을 비교할 수 있도록 하였다.

Table 1. Train modeling

train CODE	KTX-II	KTX
총 편성 길이	201.296m	388.000m
동력차 최대 단면적	10.008m ²	9.791m ²
객차 단면적	9.335m ²	8.304m ²
(환산 반지름, b)	1.724m	1.626m
프로파일 길이(a)	30.619m	30.619m
Nose slenderness(a/b)	17.76269	18.83312

Table 2. Tunnel modeling

tunnel CODE	T1	T2	T3
노선명	경부고속선	경부고속선	경부고속선
기준단면적	107.204m ²	107.204m ²	107.204m ²
(환산 반지름, R)	5.84158m	5.84158m	5.84158m
유효단면적	110.589m ²	110.589m ²	110.589m ²
(환산 반지름, R)	5.93309m	5.93309m	5.93309m
터널명	상봉1터널	궁현터널	운주터널
터널길이	347m	950m	4,020m

Fig. 1에는 KTX-II 열차의 전두부 단면적 분포를 KTX 열차와 비교하여 나타내고 있다. 두 경우에서 모두 급격한 단면적의 변화는 전두부에서 발생하지만, 동력객차 전두부까지 미미하나 단면적의 변화가 일어나기 때문에 본 그림에서는 전두부 끝단 기준 30m 길이까지의 단면적의 변화를 해석에 반영하였다.

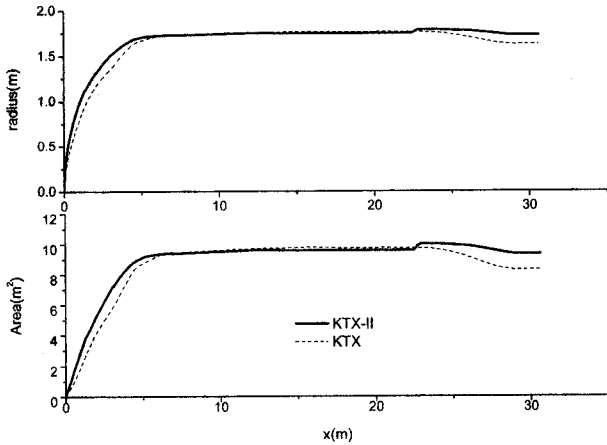


Fig. 1. The variation of cross-sectional area of nose shape

3. 계산 결과

3.1 터널 내 압력변동

KTX-II 열차가 330km/h의 속도로 길이 347m인 터널을 통과하는 경우의 터널 내 압력변동을 터널길이와 시간에 대한 contour로 Fig. 2에 나타내었다. 열차가 터널에 진입할 때 나타나는 압축파와 출구에서 반사되어 나타나는 팽창파 등의 진행과 반사 등 복잡한 공기역학적 상호작용이 잘 나타나고 있다. Fig. 3에는 터널 내 압력을 터널길이에 대하여 96개 시점에 대해 그려보았고, 마지막으로 Fig. 4에는 터널 입구로부터 50m에서 250m 사이의 5개 지점에 대한

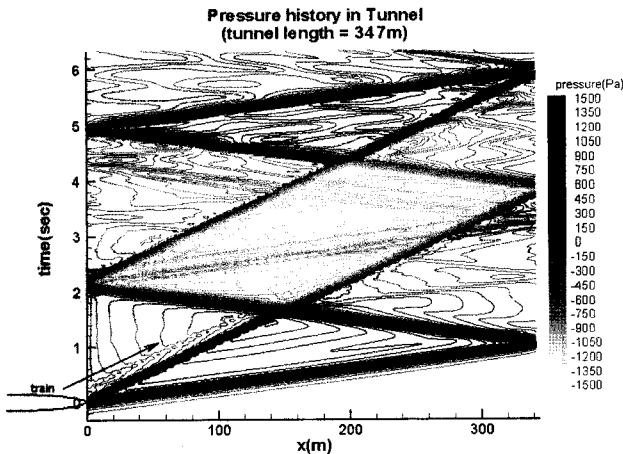


Fig. 2. Pressure field in tunnel(tunnel length=347 m)

터널 벽면에서의 시간에 따른 압력변동을 보여주고 있다. 각각의 그림에서 나타나는 바와 같이 터널 내 압력은 시간에 따라 빠르게 변하고 있으며, 압력변동의 범위는 최소 -1230.7Pa이고, 최대 1294.8Pa이다.

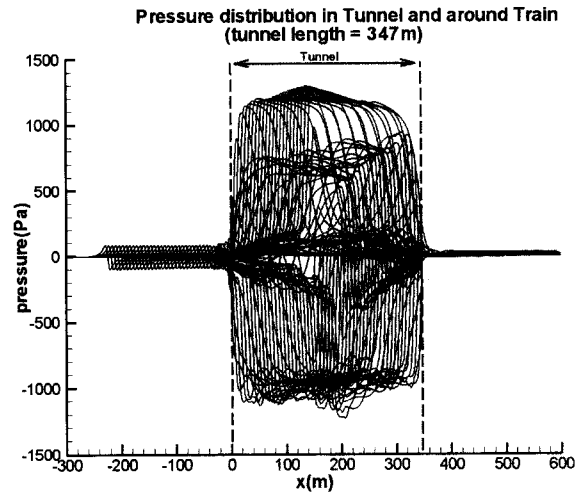


Fig. 3. Pressure distribution in tunnel (tunnel length=347 m)

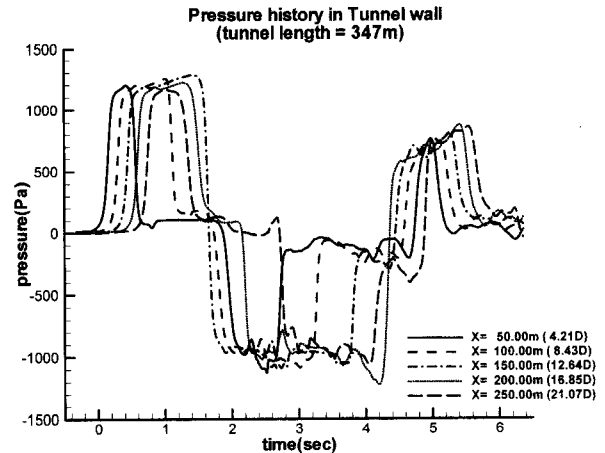


Fig. 4. Pressure history in tunnel (tunnel length=347 m)

터널길이가 950m인 경우에 대한 터널 내 압력변동을 Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. 터널길이가 달라지면, 압력파와 열차가 만나는 시점이 달라질 수 있는데, 터널 길이가 950m일 경우 후미부 진입에 따른 팽창파가 후방에서 전파하고, 전두부 진입시 생성된 압축파가 반사되어 전방에서 팽창파로 전파되어 열차와 만나기 때문에 최소압력은 -2390.9Pa로 앞선 경우보다 크게 낮아지게 된다. 그리고, 열차의 진입에 따른 압축파의 성장이 끝까지 이루어지기 때문에 최대압력도 1536.9Pa로 앞선 경우보다 더 크게 나타난다.

터널길이가 4020m인 경우에 대한 터널 내 압력변동을 Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다. 본 경우에서도 후미

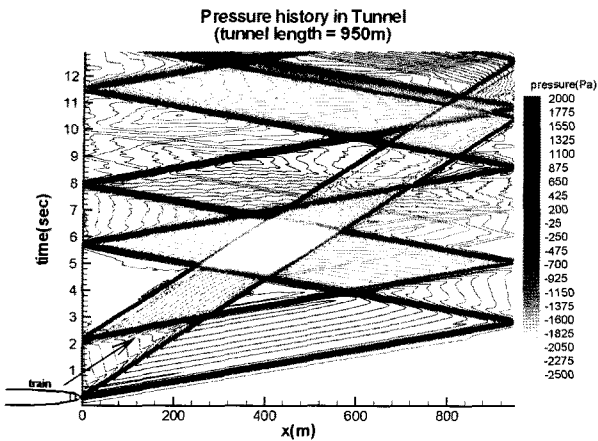


Fig. 5. Pressure field in tunnel (tunnel length=950 m)

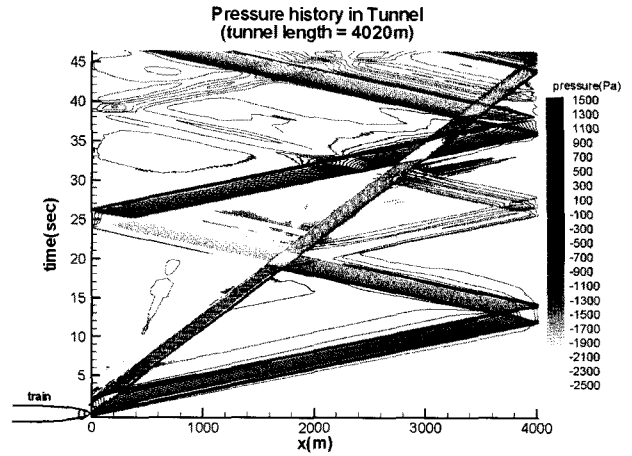


Fig. 8. Pressure field in tunnel (tunnel length=4020 m)

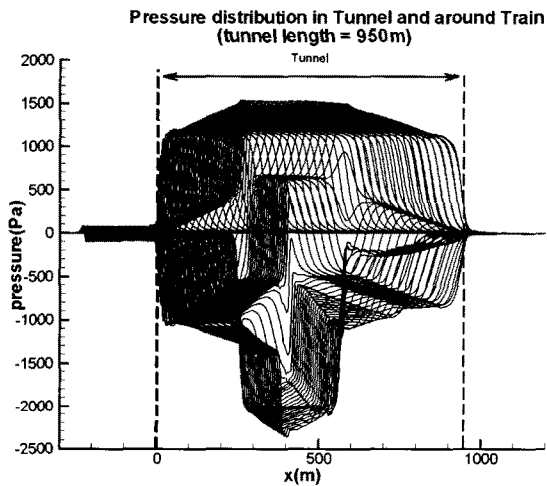


Fig. 6. Pressure distribution in tunnel (tunnel length=950 m)

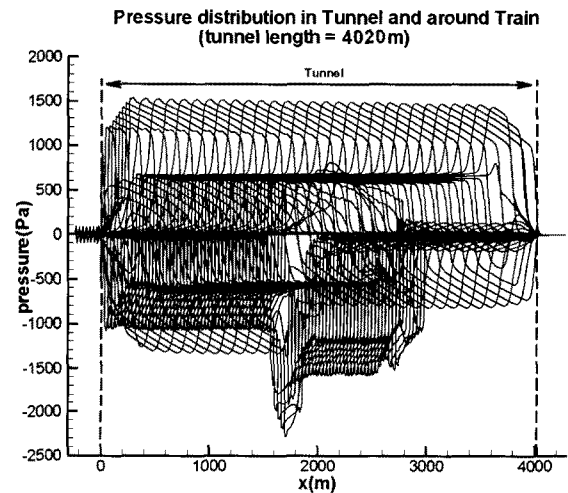


Fig. 9. Pressure distribution in tunnel (tunnel length=4020 m)

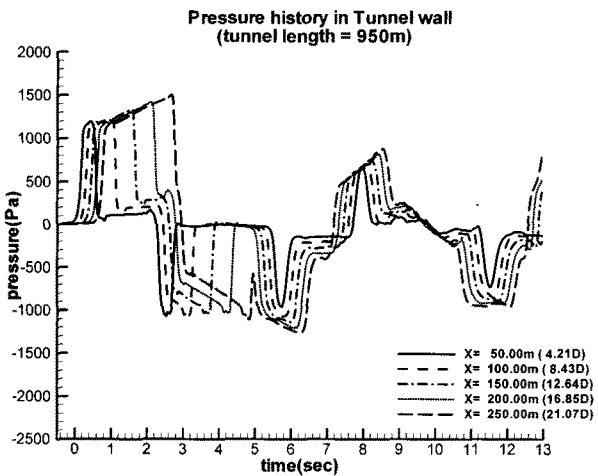


Fig. 7. Pressure history in tunnel (tunnel length=950 m)

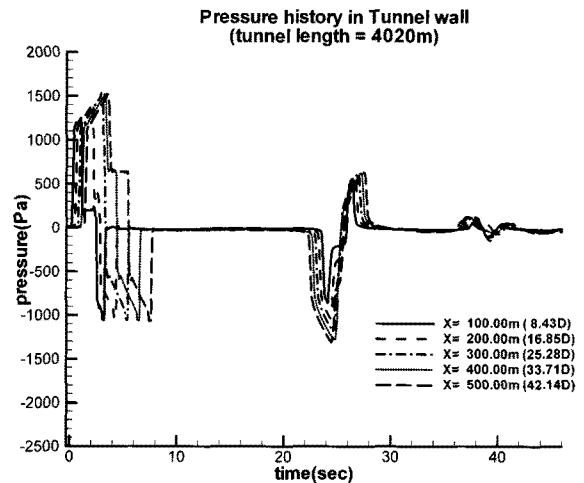


Fig. 10. Pressure history in tunnel (tunnel length=4020 m)

부 진입에 따른 팽창파가 후방에서 전파하고, 전두부 진입 시 생성된 압축파가 반사되어 전방에서 팽창파로 전파되어 열차와 만나게 되어 최소압력이 -2300.95Pa로 터널길이

950m인 경우와 비슷한 값을 갖게 되며, 최대압력 또한 열차의 진입에 따른 압축파의 성장이 끝까지 이루어지기 때문에 1541.15Pa로 비슷한 값을 갖게 된다. 그러나 터널의

길이가 상당히 길기 때문에 Fig. 10에서 보이듯이 터널내의 고정된 지점을 기준으로 압력파가 통과하는 주기가 상당히 큼을 알 수 있다.

3.2 차량 외부 압력변동

축대칭 해석코드의 검증을 위하여 공현터널(950 m)를 통과하는 KTX 열차 주위 압력변동을 시험조건[12]과 동일하게 계산하여 아래 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보여 지듯이 점으로 나타난 시험치와 선으로 나타난 해석치가 잘 일치하는 것을 보여주고 있다. 시험을 통해 나타난 최대 최소압력의 차이는 1862Pa이며, 본 해석의 결과값은 1816.97 Pa로 2.4%의 작은 오차를 보이고 있다.

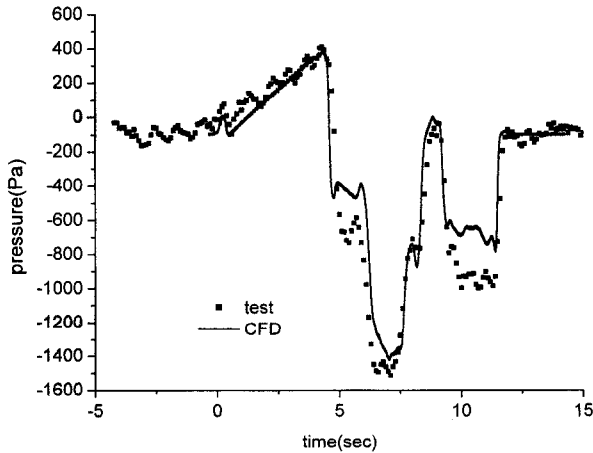


Fig. 11. Pressure history on the train surface (KTX train, 300km/h, tunnel length=950m)

Fig. 12, Fig. 13 및 Fig. 14에는 터널 통과 시 전두부 끝단 및 열차 중간 벽면에서의 압력변동을 터널길이 별로 나타내고 있다.

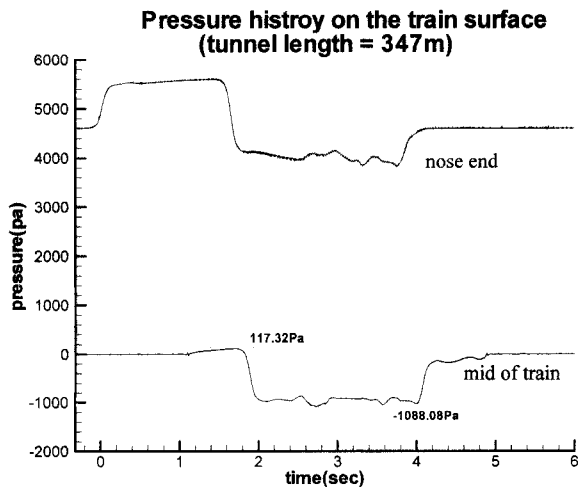


Fig. 12. Pressure history on the train surface(tunnel length=347 m)

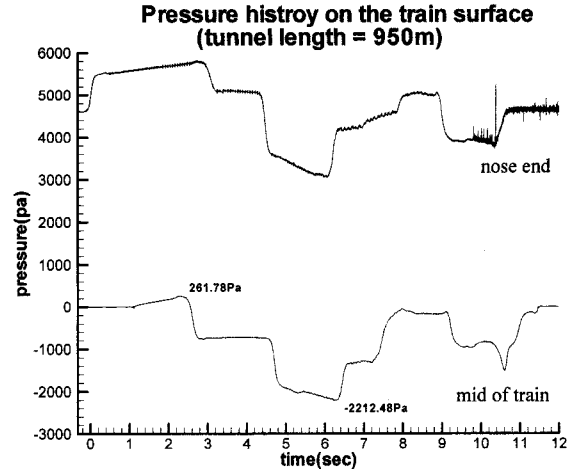


Fig. 13. Pressure history on the train surface (tunnel length=950 m)

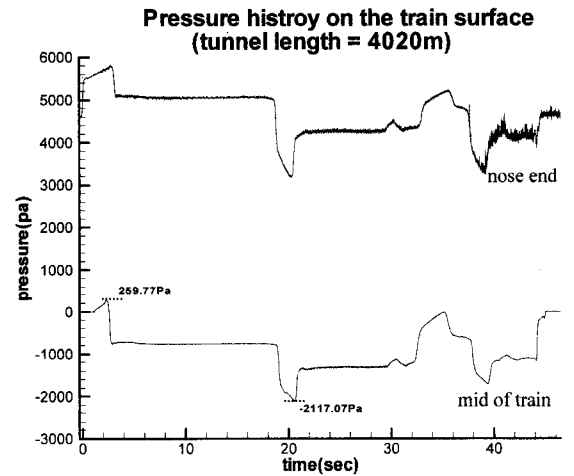


Fig. 14. Pressure history on the train surface (tunnel length=4020 m)

Table 3에는 위 해석결과를 바탕으로 터널 길이별로 터널통과 시 차체 주요부의 압력변동 값을 나타내고 있다. 터널 진입 전 전두부 끝단의 압력은 3차원 해석결과인 정상주행 시 5304Pa를 기준으로 하였고, 객차 측면은 0Pa를 기준으로 하였다. 전두부는 터널진입에 따른 압력변동에 가장 직접적인 영향을 받기 때문에 압력변동의 크기가 크며, 터널길이에 따라서도 달라지는 것을 알 수 있다.

Table 3. Surface pressure on train during the passage of tunnel

터널 길이	전두부 끝단 압력(Pa)			객차 측면 압력(Pa)		
	최소	최대	압력차	최소	최대	압력차
347m	4510.88	6327.64	1816.76	-1088.08	117.32	1205.4
950m	3739.16	6513.57	2774.41	-2212.48	261.78	2474.26
4020m	3861.43	6525.08	2663.65	-2117.07	259.77	2376.84

3.3 차량 내부 압력변동

터널 통과 시 차량 외부에서는 압력이 심하게 변화하며, 이에 따라 차량 내부에서도 압력변동이 발생하게 된다. 이때 차량 내부 압력변화는 아래 식 (2)와 같이 차량 내외부 압력차에 비례하는 것으로 가정할 수 있다.

$$\frac{dP_{internal}}{dt} = \alpha (P_{external} - P_{internal}) \quad (2)$$

위의 식을 시간에 대해 차분화시켜 나타내면 아래와 같다.

$$P_{internal}^{n+1} = P_{internal}^n + \alpha (P_{external}^n - P_{internal}^n) (t^{n+1} - t^n) \quad (3)$$

한편 열차의 기밀도는 3000Pa에서 1100Pa까지의 압력하강 시간으로 정의한다[1]. 고속철도차량의 경우는 압력하강시간은 18sec 이상으로 규정되어 있는데, 이에 해당하는 식 (2)의 계수 α 는 0.05573이다. Fig. 15에는 이때의 열차 내부 압력 변화를 나타내고 있다.

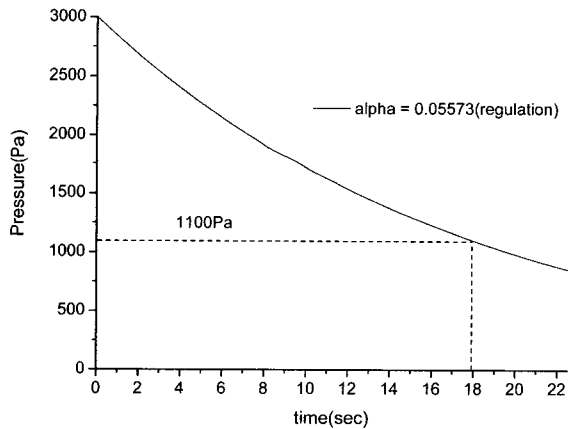


Fig. 15. Pressure change in the train passenger cabin

Fig. 16~18에는 터널 통과 시 객차 외부 압력변동과 식 (3)을 이용하여 계산된 열차 내부 압력변동을 터널 길이별로 각각 나타내었다.

먼저, 터널길이가 347m일 경우, 외부압력은 -1000Pa 대로 크게 하강한 후 2초 정도 지속되다가 터널 밖으로 나오면서 대기압으로 회복되는 것을 볼 수 있다. 따라서, 차량 내부 압력도 -109Pa까지 점차 낮아지다가 다시 점점 상승하는 것을 볼 수 있다.

터널길이가 950m일 경우에는 압력이 -2200Pa로 크게 하강하였다가 다시 대기압 수준으로 회복된 후 다시 -1500 Pa 근처까지 일시적으로 하락하였다가 급속히 회복되고 있다. 따라서 내부압력도 최대 -360Pa까지 하락하고 있다. 터

널길이가 4020m인 경우 터널 진입 후 30sec 직후까지 상당히 낮은 외부압력이 유지되기 때문에 내부압력도 -930Pa까지 하강하였다가 약간의 변동 후 회복되기 시작하는 것을 알 수 있다.

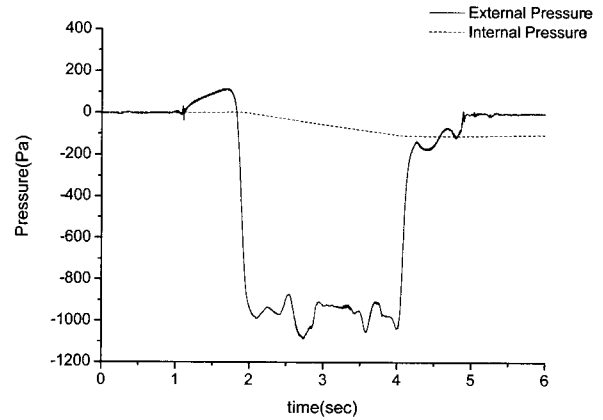


Fig. 16. Inside and outside pressure history of passenger cabin (tunnel length=347 m)

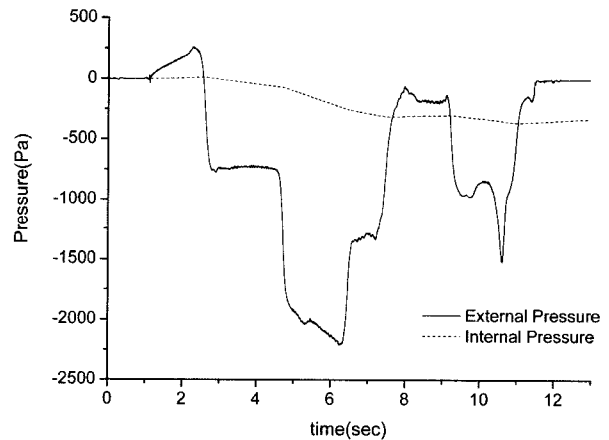


Fig. 17. Inside and outside pressure history of passenger cabin (tunnel length=950 m)

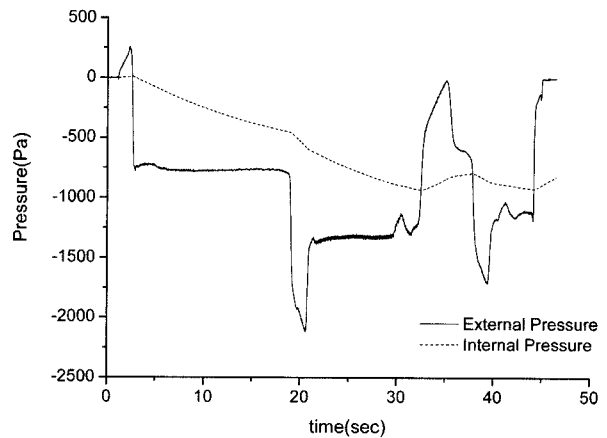


Fig. 18. Inside and outside pressure history of passenger cabin (tunnel length=4020 m)

Table 4에는 터널 통과 시 객차 내외부 압력변동을 나타내고 있다. 외부압력의 경우에는 -2212.5Pa에서 261.8Pa까지 큰 범위의 압력변동을 나타내고 있지만, 내부압력의 변동 폭은 -930Pa에서 11Pa 사이로 크게 좁아짐을 알 수 있다. 또한, 압력곡선의 미분값을 살펴보면, 터널 길이에 따라 최대 22588Pa/sec의 순간 변화율을 보이고 있지만, 차체 기밀효과에 따라 내부 압력의 순간변화율은 110.4Pa/sec를 넘지 않고 있다.

Table 4. Inside and outside pressure history of passenger cabin

터널 길이	외부		내부		
	압력변동 (Pa)	순간 변화율 (Pa/s)	압력변동 (Pa)	순간 변화율 (Pa/s)	
347m	min	-1088.1	-21410.5	-109.8	-58.3
	max	117.3	18268.3	2.8	6.7
950m	min	-2212.5	-21476.8	-360.2	-110.4
	max	261.8	22588.2	11.0	19.6
4020m	min	-2117.1	-5734.6	-930.4	-86.0
	max	259.8	9620.3	11.0	49.2

Table 5에는 터널 길이별로 최대 압력변동값을 국내 기준치[1]와 비교하여 나타내었다. KTX-II 열차의 기밀도가 국내 기준치를 만족한다고 가정할 경우, 어느 경우에도 터널 통과 시 내부 압력변동은 기준치의 절반 이하로 나타나 기준을 충족하고 있음을 알 수 있다.

Table 5. Pressure change inside the passenger cabin

터널 길이	최대 압력 변동(Pa)		
	1초	3초	10초
347m	52.6	112.4	-
950m	106.5	248.6	360.2
4020m	81.9	189.0	410.0
국내 기준	≤500	≤800	≤1000

4. 결론

KTX-II 열차가 330 km/h 속도로 터널을 통과 시 객실 내 압력변동을 평가하기 위하여 전산유체해석 기법을 이용하여 세 가지 터널 길이에 대한 수치해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 열차가 터널을 통과함에 따라서 터널 내 압력은 최소 -2212.5Pa에서 최대 261Pa의 범위에서 급격히 변동하며, 터널 길이에 따라 압력 변동의 크기와 주기가 달라지는

것을 확인하였다.

- 열차의 기밀도가 국내 기준치를 만족한다고 가정하고 열차 내부의 압력변동을 해석한 결과, 국내기준에 절반 이하로 만족하고 있음을 알 수 있었으며,
- 열차가 터널 내부에서 교행하는 경우에도, 압력변동은 이론 상 단일열차 통과 시의 2배를 넘지 못하므로 국내기준을 만족할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 철도차량 안전기준에 관한 지침, 건설교통부고시 제2006-247호.
2. A.E. Vardy, "Measured pressures in a very high speed tunnel", The international conference on speedup technology for railway and maglev vehicles, 1993.11.
3. W.B. Wolf, E.A.F.A. Demmenie, "A new test facility for the study of interaction pressure waves and their reduction in tunnels for high-speed trains", BHR Groupe 1997 Vehicle Tunnels, 1997.
4. 김동현, 양신추, 오일근, "한국형 터널 미기압파 저감 시험기개발", 1999년 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 1999.
5. 김태운, 고속열차의 터널 진입 시 발생하는 압력파의 실험적 연구, 서울대학교 석사학위논문, 2000.
6. Maeda, T., Matsumara, T., Jida, M., Nakatani, K. and Uchida, K., "Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel", Proc. International Conference on speedup technology for railway and maglev vehicles, Yokohama, Japan, JSME, Vol. 2, pp. 315-319, 1993.
7. 권혁빈, 터널을 통과하는 고속철도차량에 의한 비정상 압축성 유동장에 대한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 2001.
8. Hyeok-bin Kwon, Tae-yoon Kim, Dong-ho Lee, and Moon-sang Kim, "Numerical Simulation of Unsteady Compressible Flows Induced by a High-speed Train Passing through a Tunnel", Proceedings of the I MECH E Part F Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 217, pp.111~124, 2003.
9. Hyeok-bin Kwon, Ki-hyeok Jang, Yu-shin Kim, Kwan-jung Yee and Dong-ho Lee, "Nose Shape Optimization of High-speed Train for Minimization of Tunnel Sonic Boom", JSME International Journal Series C, Vol.44, No.3, pp.890-899.
10. 권혁빈, 김태운, 이동호, 김문상, "혼합차원기법을 이용한 고속열차의 터널 통과 시 발생하는 비정상 압축성 유동장의 수치 해석", 한국항공우주학회지 30권 6호, pp. 78-83, 2002.
11. 권혁빈, 남성원, 차창환, "철도시스템 전산유체 표준 프레임워크를 이용한 KTX 차량 주변 압력장에 대한 수치해석," 한국철도학회 논문집 제9권 제5호 pp.1-6, 2006.
12. 남성원, "KTX차량 내외부의 압력변동 특성에 관한 연구," 한국철도학회 논문집 제7권 제1호, 2004.

접수일(2008년 6월 26일), 수정일(2008년 9월 23일),
 게재확정일(2009년 2월 12일)