

# 터널을 통과하는 열차의 객실 내 압력 변동 해석

권혁빈\*, 윤수환, 남성원

한국철도기술연구원

## NUMERICAL SIMULATION OF PRESSURE CHANGE INSIDE CABIN OF A TRAIN PASSING THROUGH A TUNNEL

H.B. Kwon\*, S.H. Yun and S.W. Nam

Korea Railroad Research Institute

*The pressure transient inside the passenger cabin of high-speed train has been simulated 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 have been assessed for the KTX train passing through a 9km long tunnel of Wonju-Kangneung line at the speed of 250km/h assuming that the train is satisfying the train specification for airtightness required by the regulation.*

**Key Words :** 고속철도(High-speed Railway), 터널(Tunnel), 압력 변동(Pressure Transient),  
전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 공기역학(Aerodynamics)

### 1. 서 론

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(Fig. 1). 열차의 터널 진입시 생성되는 압축파를 진입 압축파(Entry compression wave)라고 하며, 진입 압축파의 크기는 터널 내 압력변동의 스케일을 결정한다.

열차 주위의 압력변동으로 인하여 객실 내의 압력도 변화하게 되는데, 이로 인하여 객실 내의 승객은 청각적 불쾌감을 느낄 수 있다. 이에 따라 차량의 제작과 선로의 설계 시에는 객실 내 기압변화의 기준을 만족할 수 있도록 법률로서 규정하고 있으며[1] 이를 고려하여 차량의 기밀도, 터널의 단면적 등을 결정하여야 한다.

철도터널과 열차는 단면에 비해 상대적으로 매우 긴 길이를 갖기 때문에 철도터널 내의 공기유동은 1차원 효과에 주로 영향을 받는다. 따라서, 초기의 많은 연구[2,3]들은 철도터널 내의 공기유동을 1차원으로 간주하여 해석을 수행하였으며, 현재에도 이러한 접근방법은 짧은 계산 시간을 요구하는 엔지니어링 설계에 사용되고 있다. 한편, 1차원 해석보다 더 높은 정확도를 요구하거나 열차의 전두부 형상이나 터널 끝단의 물리적 형상을 상세히 반영하기 위하여 축대칭으로 가정하여 해석을 수행하기도 한다[4,5,6]. 또한, Fukuda 등[7]은 축소모형 열차-터널 시험기를 통한 실험에서 축대칭과 3차원 모델에 의한 압력파의 크기와 선두 구배가 거의 일치한다는 것을 실험적으로 확인하였다.

권혁빈 등[8]은 KTX-산천 열차의 상업운행에 앞서 이러한 객실 내 기압변화가 규정을 준수하는지 여부를 347m, 950m 및 4,020m의 터널을 330km/h로 통과할 경우에 대해 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 이용한 전산유체해석을 통하여 평가, 검증한 바 있다.

본 연구에서는 현재 설계 중인 원주-강릉 간 복선 철도에 대하여 9km의 터널을 통과할 경우 터널 내부의 비정상 유동을 수치적으로 모사하였으며, 이를 이용하여 열차의 객실 내 기압변동을 평가하였다.

Received: July 7, 2011, Revised: March 21, 2012,

Accepted: March 22, 2012.

\* Corresponding author, E-mail: hbkwon@krii.re.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.1.023>

© KSCFE 2012

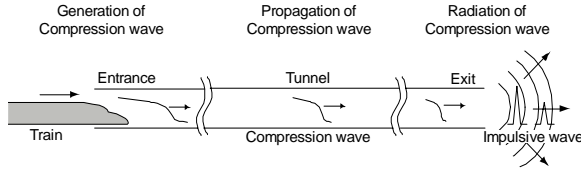


Fig. 1 Aerodynamic interaction between train and tunnel

## 2. 수치해석 기법

### 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,  $F_x$ ,  $E_y$ 는 점성 플럭스 벡터,  $H_y$ 는 점성 소스항을 나타낸다. 공간 변수들은 터널 직경으로 무차원화 하였으며, 나머지 변수들은 자유류 값들로 무차원화 하였다. 대류항의 플럭스는 Roe의 FDS를, 공간정확도를 높이기 위해서 Koren의 limiter를 도입한 MUSCL 기법을 사용하였고 시간적분법은 AF-ADI를 사용하였다. 또한, 우변의 난류항들은 Baldwin-Lomax algebraic turbulence model을 이용하여 난류점성계수를 계산하였다[9].

$$\begin{aligned} \partial_t Q + \partial_x E + \partial_y F + H &= \frac{1}{Re_c} \left( \partial_x E_v + \partial_y F_v + H_v \right) \\ Q &= [\rho, \rho u, \rho v, \rho e]^T \\ E &= [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (\rho e + p)v]^T \\ F &= [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (\rho e + p)v]^T \\ H &= \frac{1}{y} [\rho v, \rho uv, \rho v^2, (\rho e + p)v]^T \end{aligned} \tag{1}$$

열차의 초기 조건은 열차가 터널에 진입하기 전에 발생할 수도 있는 수치적인 압축파를 피하기 위해서 완만한 출발 (Smooth start) 기법[9]을 사용하였다. 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. 수치 해석의 경계 조건으로서 터널 벽면에

Table 1 Train model

Train name	KTX
Total length	388 m
Maximum cross-sectional area	9.791 m <sup>2</sup>

Table 2 Tunnel model

Tunnel line/name	Wonjoo-Gangneung line/Dunnae tunnel
Cross-sectional area	66.12 m <sup>2</sup>
Length	9 km

서의 유동 속도는 열차의 상대적 운동에 의해 결정되며, 벽면에서의 압력은 벽면에 수직한 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 공력모델을 구축하여 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 객실 내 압력변동평가의 대상 열차는 KTX 열차이며, 주행 속도는 250 km/h이다.

터널의 경우에는 원주-강릉선에 위치한 둔내 터널을 대상으로 하여 터널 길이 9km 및 터널 단면적 66.12m<sup>2</sup>을 적용하였다.

### 2.3 격자계

지배방정식을 이산화하여 수치적으로 계산하기 위하여 계산영역내에 격자계를 생성하였다. 열차의 진행에 따른 열차와 터널 사이의 상대적 운동을 수치적으로 모사하기 위하여 본 연구에서는 해석 영역을 열차주위(zone1), 터널 내부 및 전후 연장(zone2), 터널 입구(zone3) 및 터널 출구(zone4)의 네 가지 영역으로 분할하여 격자계를 생성한 뒤, 열차의 진행에 따른 격자 간의 유동변수 교환은 이동 Patched 기법[9]을 이용하여 계산을 수행하였다.

Fig. 2에는 해석에 사용된 격자계 및 확대 그림을 보여주고 있으며, 전두부 및 후미부 주위에서는 격자의 밀집도를 조절하여 인접 격자 간의 격자크기 차이를 최소로 억제하고 격자의 가로/세로 비대칭성(skewness)이 최소화되도록 정렬격자계를 형성하였다.

아래 Table 3에는 해석격자계의 영역 별 격자수를 나타내고 있다. 터널의 길이가 9km로 매우 길기 때문에 터널 내부에 형성된 zone2의 격자수가 289,254로 전체 423,060개의 70% 가량을 차지하고 있음을 알 수 있다.

## 3. 해석 결과 및 분석

### 3.1 터널 내 압력 변동

Fig. 3에는 터널 벽면에서의 압력을 거리(x)-시간(t)에 따라

Table 3 Number of grid

	x × y	x	y
zone1	56,988	1,583	36
zone2	289,254	20,661	14
zone3	40,530	965	42
zone4	36,288	864	42
total	423,060		

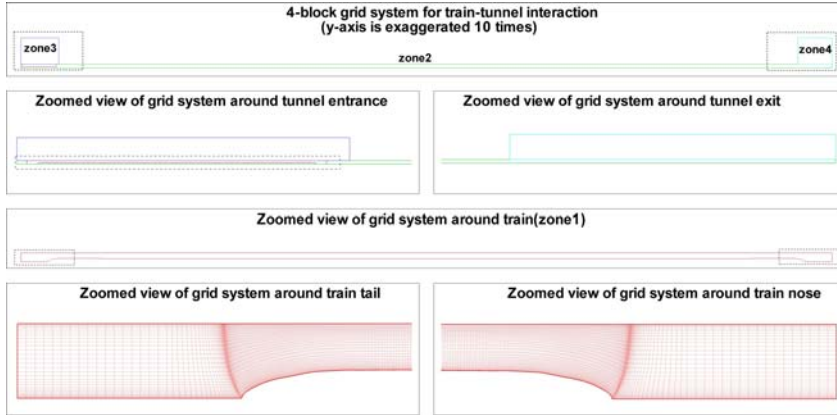


Fig. 2 Grid system

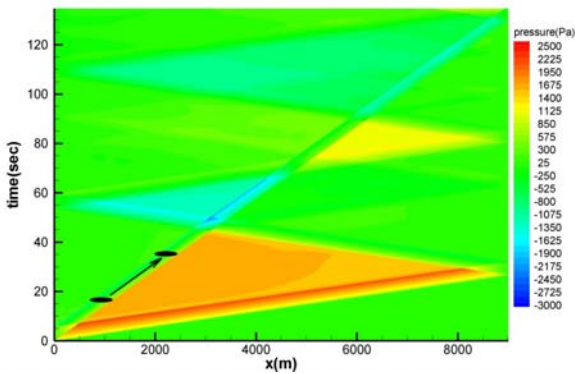


Fig. 3 x-t diagram of tunnel wall pressure

명암으로 표시한 x-t 선도가 나타나 있다. 좌측 하단에서 우측 상단으로 직선으로 나타나 있는 검은 띠가 열차가 진행할 때의 열차 주위 압력에 해당하며, 열차의 진입과 동시에 우측으로 더 낮은 기울기로 진행되는 띠는 열차 전두부의 진입 시 발생하는 진입 압축파 및 열차 후미부의 진입 시 발생하는 진입 팽창파를 나타내고 있다. t=25sec 전후로 터널 끝단(9,000m)에서는 진입 압축파와 진입팽창파가 터널 내부로 반사되는 것을 알 수 있는데, 여기서 압축파는 팽창파로, 팽창파는 압축파로 반사된다. 열차가 터널을 완전히 빠져나가기 전까지 진입 시 생성된 압력파들은 출구 및 입구에서 두 번씩 반사되며, 그동안 터널 내 압력은 급격히 변동하게 되며, 열차 주위 압력 또한 급격히 변화하게 된다.

Fig. 4 ~ Fig. 7에는 t=4.4sec, 20.59sec, 39.49sec 및 47.58sec 일 때의 열차 주위 압력변동 및 터널 내 압력분포를 각각 나타내고 있다.

먼저, Fig. 4에서는 진입압축파가 생성되는 모습이 나타나

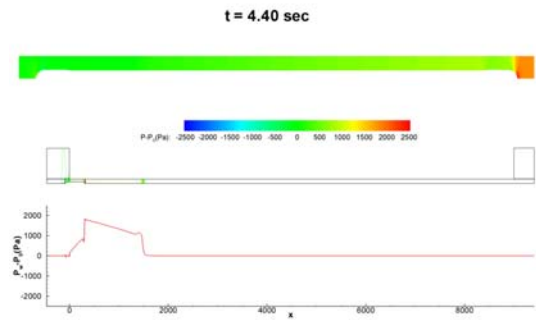


Fig. 4 Pressure around train and in tunnel (t=4.4sec)

있다. 압축성에 의한 열차의 진입 압축파는 열차속도, 단면적비 등의 파라메타에 의한 식[9]을 통해 이론적으로 예측할 수 있으며 계산조건인  $V_t=250\text{km/h}$ ,  $R=0.1481$  및 공기밀도  $\rho=1.225$  및 음속  $C=340\text{m/s}$ 를 대입하면 진입 압축파 크기( $\Delta p_{21}$ ) 1094.5 Pa을 얻을 수 있다. Fig. 4에서 진입압축파의 크기는 전두부가 터널 입구를 통과하는 동안 형성된 전방의 급격한 압력구배의 크기이며, 해석 결과는 1208.2Pa로 이론적인 예측치에 비해 약 10% 가량 높게 나타났으며 이는 이론식에서 적용한 단순화된 모델과 수치해석에서 적용된 축대칭 모델과의 차이로 인해 기인된 것이라고 생각된다. 그리고, 실제 열차가 터널에 진입하게 되면 전두부 통과 뿐만 아니라 열차의 몸체가 통과하는 동안에도 압축파가 발생하는데 이를 진입 압축파의 2차 상승[9]이라고 한다. 이것은 열차 주위 점성 경계층이 터널 내 압력을 추가적으로 상승시키기 때문이다. 본 경우에서 KTX열차는 길이가 388m로 길이가 매우 길기 때문에 이러한 압축파의 2차 압력상승도 비교적 커 최종적으로 생성된 진입 압축파의 1, 2차 압력상승의 합은 2032.4Pa가 된다.

Fig. 5에서는 진입 압축파 및 팽창파가 생성되어 터널 출

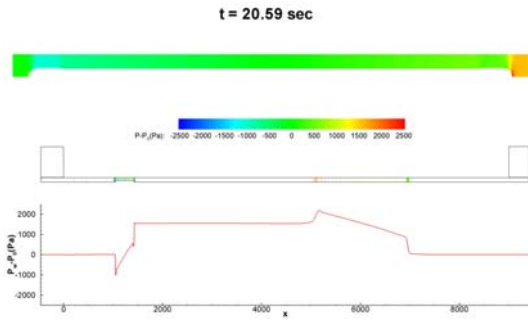


Fig. 5 Pressure around train and in tunnel (t=20.59sec)

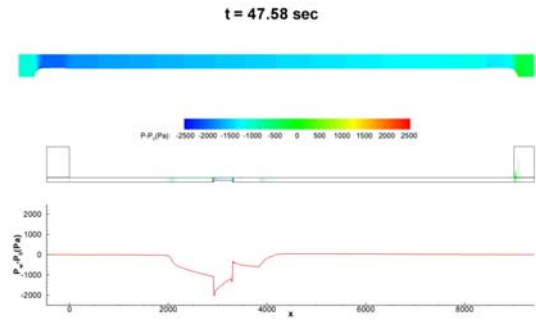


Fig. 7 Pressure around train and in tunnel (t=48.58sec)

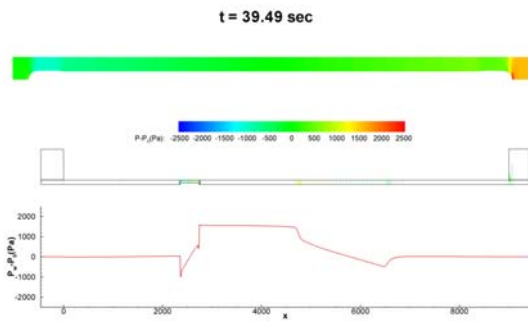


Fig. 6 Pressure around train and in tunnel (t=39.49sec)

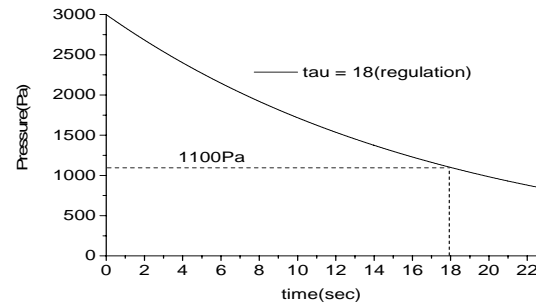


Fig. 8 Pressure history in cabin

구 쪽으로 진행해 나가는 것을 볼 수 있다. 압력파는 터널 내부를 진행할 때 대략 음속의 속도로 진행하게 된다. 터널 및 궤도 조건에 따라 압력파의 형상은 변할 수 있으나, 본 연구에서는 압력파의 형상이 변하지 않도록 수치해법을 적용하였다. Fig. 6에서는 진입 압축파 및 진입 팽창파가 터널 출구에서 반사되어 팽창파 및 압축파의 형태로 터널 입구쪽으로 진행되는 모습을 볼 수 있으며, Fig. 7에서는 반사된 팽창파와 압축파 사이의 저압 영역에 열차가 위치한 시점으로서 열차 주위의 압력이 크게 낮아진 것을 알 수 있다.

### 3.2 열차 내 압력 변동

터널 통과 시 차량 외부에서는 압력이 심하게 변화하며, 이에 따라 차량 내부에서도 압력변동이 발생하게 된다. 이 때 차량 내부 압력변화는 차량 내외부 압력차에 비례하며, 아래와 같은 식으로 계산되어질 수 있다[10].

$$\frac{dP_{internal}}{dt} = \frac{1}{\tau} (P_{external} - P_{internal}) \quad (2)$$

위의 식(2)를 시간에 대해 차분화시켜 나타내면 아래 식

(3)과 같다.

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

한편 열차의 기밀도는 3000 Pa에서 1100 Pa 까지의 압력하강 시간으로 정의한다[1]. 고속철도차량의 경우는 압력하강시간은 18sec 이상으로 규정되어 있는데, 이에 해당하는 식(2), 식(3)의 계수  $\tau$  는 18이다. Fig. 8에는 이때의 열차내부 압력변화를 나타내고 있다.

국내에서는 정부가 객차 등의 기압변화 세부기준[1]에서 고속철도차량의 객실 내 기압변화에 대해 평가기준을 제시하여 열차 운행 시 기압변동이 승객에 미치는 영향이 최소화되도록 하고 있다. 본 기준은 차량의 기밀도와 객실 내 압력변화의 최대값을 기준시간에 따라 아래와 같이 규정하고 있다.

- 철도차량에 대한 객실 내 기압변화 기준
  - 3000Pa -> 1100Pa의 압력 변화 소요 시간 : 18초 이상
- 최고운행속도로 주행할 때의 객실 내 기압변화 기준
  - (1) 단위 시간당 압력변화 :  $\Delta P / \Delta t \leq 500 \text{ Pa/s}$
  - (2) 3초간 최대 압력 변화 :  $\Delta P \leq 800 \text{ Pa}$
  - (3) 10초간 최대 압력 변화 :  $\Delta P \leq 1000 \text{ Pa}$
  - (4) 60초 이상에서의 최대 압력 변화 :  $\Delta P \leq 2000 \text{ Pa}$

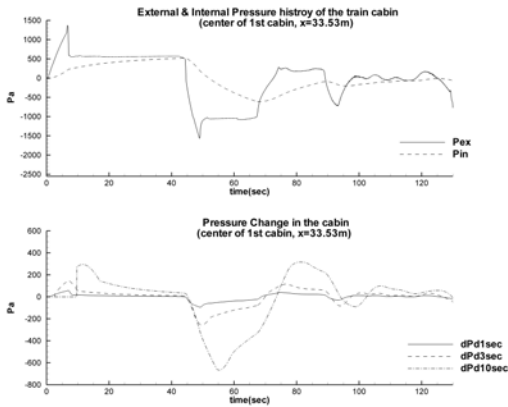


Fig. 9 Pressure variation in cabin (KTX 1st cabin)

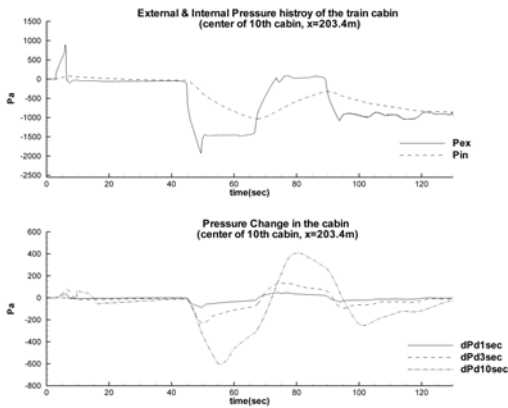


Fig. 10 Pressure variation in cabin (KTX 10th cabin)

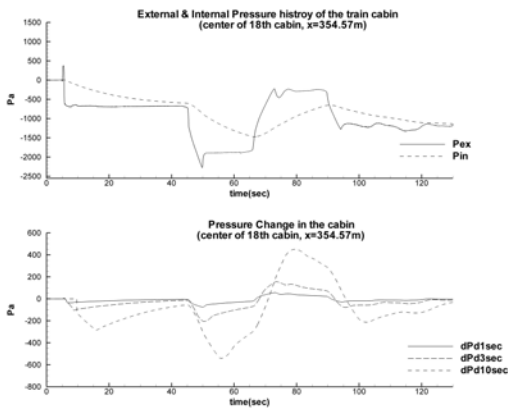


Fig. 11 Pressure variation in cabin (KTX 18th cabin)

Fig. 9 ~ Fig. 11에는 열차 내외부 압력변동(Pex, Pin) 및 단위시간 당 실내압 변동(dPd1sec, dPd3sec, dPd10sec)을 1번, 10번, 18번 객차에 대하여 객차 중심 지점을 기준으로 각각 나타내었다.

Fig. 9의 1번 객차의 경우, 압축파의 생성 시점에서 열차 전방의 압력이 상승하기 때문에 열차 외부압력이 상승하다가 후미부의 진입으로 인한 진입압축파가 지나간 후에는 압력이 강하하여 일정하게 유지된다. 그리고, 반사된 압력파들이 객차를 통과할 때마다 열차 주위의 압력이 크게 낮아졌다가 높아지는 것을 반복하는 것을 알 수 있다. 실내압 변동이 가장 큰 때는 진입압축파가 반사된 팽창파가 열차를 통과한 직후 실내압이 감소하는 시점(45sec~60sec)이다. Fig. 10의 10번 객차의 경우에는 전두부와의 거리가 멀기 때문에 진입 압력파들이 통과한 이후의 압력이 대기압에 가깝게 유지되고 있으며, Fig. 11의 18번 객차의 경우에는 대기압보다 낮게 유지되며 나머지 경향은 모두 동일함을 알 수 있다.

Table 4에는 모든 객차의 객실에 대한 단위시간 당 압력변동의 최대값을 양의 방향(+)과 음의 방향(-)에 대해 나타내었다. 모든 객차에서 음의 방향의 최대 압력변동값이 양의 방향의 최대 압력변동값보다 큰 것을 알 수 있으며, 객차 별로는 1번 객차의 압력변동이 가장 큰 것으로 나타났다. 기준 시간 1초, 3초, 10초에 대한 단독교행 시 최대 압력변동은 각각 95.0Pa, 258.2Pa, 667.3Pa로 나타났다. 이 경우, 모든 경우에 대해 압력변동 기준치보다 작게 나타났다. 동일한 열차가 교행할 경우 압력파의 중첩에 의해 압력변동은 증가하게 되는데, 진입 시점에 따라 압력변동의 증가는 달라지게 되지만 기대할 수 있는 최대 압력변동은 단독 주행에 대해 두 배가 된다고 할 수 있다. 이 경우 추정되는 교행 시 최대 압력변동은

Table 4 Maximum pressure variation in cabins

Cabin number	Maximum pressure change(Pa)					
	$\Delta t = 1 \text{ sec}$ (dPd1sec)		$\Delta t = 3 \text{ sec}$ (dPd3sec)		$\Delta t = 10 \text{ sec}$ (dPd10sec)	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	57.4	-95.0	149.8	-258.2	316.5	-667.3
2	55.5	-94.5	143.4	-256.6	378.8	-663.8
3	53.6	-93.8	137.0	-254.3	378.4	-658.2
4	51.7	-92.8	131.7	-251.5	380.0	-651.8
5	49.6	-91.8	131.1	-248.6	382.8	-644.8
6	47.4	-90.7	130.6	-245.5	386.6	-637.2
7	45.2	-89.5	130.5	-242.3	391.2	-629.2
8	45.8	-88.3	130.6	-238.9	396.3	-621.0
9	46.5	-87.0	131.0	-235.6	401.7	-612.9
10	47.4	-85.8	132.8	-232.3	407.3	-604.8
11	48.4	-84.6	135.2	-229.0	412.7	-596.9
12	49.4	-83.4	137.9	-225.7	418.1	-589.0
13	50.3	-82.2	140.7	-222.4	423.4	-581.1
14	51.3	-80.9	143.5	-219.1	428.6	-573.2
15	52.4	-79.7	146.3	-215.8	433.8	-565.2
16	53.4	-78.5	149.1	-212.4	438.9	-557.2
17	54.4	-77.2	152.0	-209.0	444.1	-549.3
18	55.5	-75.8	155.1	-205.6	449.9	-541.0
single run	95.0		258.2		667.3	
passing-by	190.0		516.4		1334.6	
regulation[1]	< 500		< 800		< 1000	

시각 1초, 3초, 10초에 대해 각각 190.0Pa, 516.4Pa, 1334.6Pa이 되는데, 10초 시각에서의 최대 압력변동 1334.6Pa은 규정치 1000Pa을 초과하게 되는 것을 알 수 있다. 이는 교행 시 진입 시각에 따라 10초 간 압력변동이 규정치인 1000Pa을 초과할 수 있다는 것을 의미하며 이에 대한 대책이 필요함을 알 수 있다.

실내압 변동 최대값 및 해당 진입 시각의 정확한 예측은 교행상황에 대한 시뮬레이션 또는 이와 준하는 정확성을 갖는 예측기법을 이용해 이루어져야 할 것이며, 실내압 변동의 기준 초과가 최종적으로 확인될 경우 터널의 단면적을 보다 확대하거나 열차의 기밀도를 향상시키는 등의 방법으로 대책을 마련하여야 할 것이다.

#### 4. 결 론

9km의 장대터널에 대해 KTX 열차가 250km/h의 속도로 통과하는 동안 터널 내부의 비정상 압축성 유동장을 수치적으로 모사하고, 이를 이용하여 열차의 객실 내 기압변동을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- KTX 열차의 터널 진입 시 발생하는 진입 압축파의 크기는 전두부 진입 시 압축성 효과에 의한 1차 상승분이 1208.2Pa이며, 열차 진입 시 점성경계층에 의한 2차 압력 상승분을 합치면 2032.4Pa로 나타났다.
- 열차가 법정 기밀도의 하한을 정확히 만족시킨다고 가정할 경우, 열차의 단독 주행에 따른 객실 내 기압변동은 법정 기준을 만족한다.
- 상기 열차의 기밀도 가정보다 더불어 교행 시 객실 내 기압변동의 최대값이 단독주행 시의 2배에 이른다고 가정할 경우 10초 간 최대 압력변동값이 1334.6Pa로 나타나 법정 기준인 1,000Pa을 초과함을 알 수 있었다.
- 교행 시 실내압 변동의 정확한 최대값 및 해당 교행 시각의 예측을 위해서는 교행상황에 대한 시뮬레이션 또는 이에 준하는 예측기법이 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] 2006, 철도차량 안전기준에 관한 지침, 건설교통부고시 제2006-247호.
- [2] 1973, Fox, J.A., Vardy, A.E., "The Generation and Alleviation of Air Pressure Transients caused by the High Speed Passage of Vehicles through Tunnels," *Proc. Of 1st ISAVVT*, pp.G-3.49-64.
- [3] 1979, Vardy, A.E. and Dayman, B., "Allenviation of Tunnel Entry Pressure Transients : 2. Throretical Modeling and Experiment Correlation," *Proc of 3rd Intl. Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels(ISAVVT)*, H2, pp.363-376.
- [4] 1993, Maeda, T., Matsumura, T., Iida, M., Nakatani, K. and Uchida, K., "Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel," *International Conference on speedup technology for railway and maglev vehicles*, Nov. 22-26, 1993, Yokohama, Japan, pp.315-319.
- [5] 1999, Aoki, T., Vardy, A.E. and Brown, J.M.B., "Passive Alleviation of Micro-pressure Waves from Tunnel Portals," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.220, No.5, pp.921-940.
- [6] 2003, Kwon, H.B, Kim, T.Y., Lee, D.H, and Kim, M.S., "Numerical Simulation of Unsteady Compressible Flows Induced by a High-speed Train Passing through a Tunnel," *Proceedings of the IMECH E Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.217, pp.111-124.
- [7] 2010, Fukuda, T., Saito, H., Miyachi, T., Kikuchi, K. and Iida, M., "Model Experiments on the Tunnel Compression Wave Using an Axisymmetric and Three-dimensional Train Model," *Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise*, Nagahama, Japan, 18 - 22 October 2010, pp.397-404.
- [8] 2009, 권혁빈, 남성원, 광종현, "전산유체역학을 이용한 고속철도차량 객실 내 압력변동 평가," *한국철도학회논문집*, 제12권, 제1호, pp.65-71.
- [9] 2001, 권혁빈, 터널을 통과하는 고속철도차량에 의한 비정상 압축성 유동장에 대한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
- [10] 2002, International Union of Railways, UIC code 660 - Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains.
- [11] 1997, Wormstall-Reitschuster, H.-J. and Schulte-Wering, B., "Comfort impairment due to pressure variation when passing through tunnels," *Proceedings of World Congress on Railway Research(WCRR)* 9, Vol.E, pp.597-603.
- [12] 2006, Zhao, H., Lei, B., Bi, H., "An intergrated Method for Predicting Tunnel Pressure Wave Effects," *Proceedings of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2006(STECH'06)*, pp.236-240.
- [13] 2005, William-Louis, M., Tournier, C., "A wave signature based method for the prediction of pressure transients in railway tunnels," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.93, pp.521 - 531.