

# 한국형 틸팅차량의 터널 주행시 실내/외 압력변화에 대한 실험적 연구

## Experimental Study of the Internal/external Pressure Variation of TTX Travelling through a Tunnel

윤수환\* · 곽민호\* · 이동호<sup>†</sup> · 권혁빈\*\* · 고태환\*\*

Su-Hwan Yun · Min-Ho Kwak · Dong-Ho Lee · Hyeok-Bin Kwon · Tae-Hwan Ko

**Abstract** When a train enters into a tunnel, a compression wave is generated by a front nose and an expansion wave is generated by a rear tail respectively. The interaction between pressure waves and the train makes the internal and external pressure of the train change dramatically. In this paper, we had measured the internal and external pressure variations of TTX and analyzed the pressure variations as the tunnel length. Also, the rate of internal pressure variations were investigated with the current airtight condition of TTX. In short tunnels, the internal and external pressure variation were not large because the superposition of pressure waves was not happened. In long tunnels, however, the rapid and large pressure variations were shown because of the superpositions between the same sort of pressure waves, such as expansion wave and expansion wave or compression wave and compression wave. In specific length tunnels, the pressure variation and the pressure variation rates were largely lessened because the compression wave and expansion wave were superposed.

**Keywords** : TTX(Tilting Train eXpress), Tunnel aerodynamics, Pressure wave, Internal/External Pressure variation, Internal pressure variation rate

**요 지** 열차가 터널에 진입하면 열차의 전두부에 의해 압축파가, 후미부에 의해 팽창파가 터널 내에 각각 발생하게 된다. 터널내부에서 압축파와 팽창파가 열차와 서로 상호작용하면서 열차 실내/외의 압력은 급격하게 변화한다. 본 논문에서는 한국형 틸팅차량이 터널 주행 시 나타나는 차량의 실내 및 실외(차량표면) 압력변화 및 압력변화율을 분석하여, 터널길이와의 상관관계를 분석하였다. 또한, 현 틸팅차량의 기밀상태에서 터널주행 시 실내압력변화율을 검토하였다. 그 결과 길이가 짧은 터널에서는 압력파의 중첩이 발생하지 않아서 차량 실내/외 압력변화는 크게 나타나지 않았다. 하지만, 긴 터널에서는 압력파의 중첩과 차량과의 상호작용이 동시에 일어나면서 급격한 압력변화가 뚜렷하게 발생하였다. 또한, 특정한 길이의 터널에서는 압축파와 팽창파가 중첩되어 압력변화 및 변화율을 크게 완화시켰다.

**주요어** : 틸팅차량, 터널, 압력파, 실내/외 압력변동, 실내압력변화율

## 1. 서론

열차가 고속으로 터널에 진입하면 열차의 피스톤 효과에 의해서 터널 내/외부에서는 급격한 압력변화 혹은 미기압파와 같은 공기역학적 문제점이 발생된다. Fig. 1은 열차가 터널에 진입할 때 발생한 압력파(압축파, 팽창파)

에 의해 터널 및 차량표면에서의 시간에 따른 압력변화를 나타낸다. 터널입구에서 전두부 진입에 의해 압축파(Compression wave)가 발생하여 터널출구 방향으로 전파된다. 그리고 터널출구에 도달한 압축파는 터널출구에서 일부가 미기압파(Micro pressure wave) 형태로 방출되고, 나머지는 팽창파로 반사되어 다시 터널입구 방향으로 전파된다. 또한, 후미부 진입에 의해서는 터널입구에서 팽창파(Expansion wave)가 발생하며, 팽창파 역시 터널출구에서 일부가 방출되고, 나머지는 압축파로 다시 반사된다 [1,2].

\* 책임저자 : 정희원, 서울대학교, 기계항공공학부, 교수, 항공우주신기술 연구소

E-mail : donghlee@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7386 FAX : (02)887-2662

\*\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원

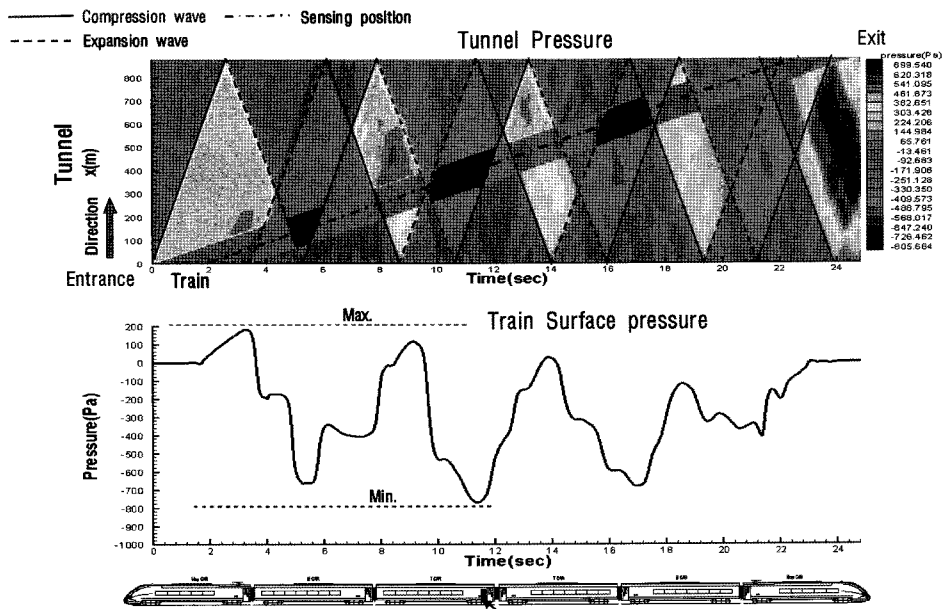


Fig. 1. X-t diagram and surface pressure variation

그리고 차량표면 압력은 전두부가 터널로 진입하면서 서서히 증가하다가 후미부 진입 시 발생한 팽창파에 의해서 급격히 감소한다. 또한, 터널출구에서 반사된 팽창파와 중첩되면서 또 다시 급격히 감소한다. 이렇게 감소한 압력은 압축파가 지나게 되면서 급격하게 상승하고, 출구에서 반사된 압축파에 의해 또 다시 상승한다. 이렇게 터널입구에서 발생한 압축파와 팽창파는 터널내부를 주행하는 차량과 서로 상호작용을 일으키면서, 차량 내/외부에서는 Fig. 1 (Train Surface pressure)과 같은 아주 급격한 압력변동을 발생시킨다[3]. 압력의 급격한 변동은 승객에게 이명감을 초래하여 승차감을 감소시키고, 차체의 피로하중을 증가시키는 등, 공기역학적 문제를 발생시키기 때문에 차량개발 시 반드시 고려해야 할 중요한 사항 중 하나이다[4].

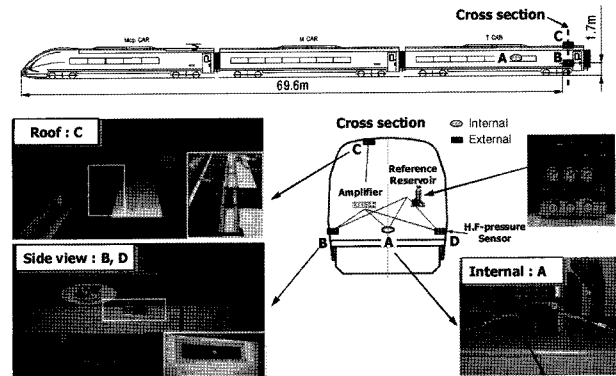
터널내부에서 발생하는 압력파의 크기는 주로 열차의 터널진입속도와 열차와 터널의 단면적 비에 의해서 결정된다 [5,6]. 틸팅열차의 경우 비교적 단면적이 작은 기존선 터널을 기존차량보다 빠른 속도로 주행하고, 기존차량에 비해 열차의 단면적이 다소 크다. 따라서 차후, 틸팅차량의 상용화를 위해서는 터널주행 시 압력파에 대한 문제점을 반드시 고려해야 한다. 본 논문에서는 한국형 틸팅차량(TTX)이 호남선 시험선 터널을 주행할 때 나타나는 실내/외 압력변화 및 변화율을 측정하고, 터널의 길이에 따른 그 영향을 분석하였다.

## 2. 실험기법 및 조건

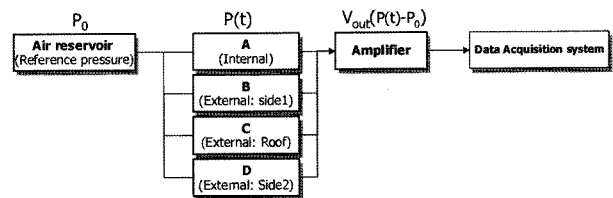
### 2.1 계측시스템 구성 및 설치

터널을 고속으로 주행하는 차량의 표면 압력분포는 압력

파와 상호작용으로 인해 차량의 길이방향에 따라 다르게 나타나고, 또한 차량표면과 터널벽면과의 거리에 따라 다르게 나타난다.



(a) Sensor installation



(b) Data acquisition process

Fig. 2. Schematic of measurement system

본 논문에서는 차량표면압력 측정을 위해서 전두부에서 길이방향으로 약 69.6m위치에 3개의 압력센서(B,C,D)를 설치하여, 터널벽면 방향의 차량표면, 터널중심 방향의 차량표면 그리고 차량천정에서의 압력을 측정하였다.

그리고 1개의 압력센서(A)를 실내에 설치하여 실내/외

압력을 동시에 측정하였다(Fig. 2(a)). 또한, 각 센서는 기준 압력저장장치(Air reservoir)와 연결하여, 각각 압력차를 데이터 저장장치(Data Acquisition System)으로 전달하고, 저장된다(Fig. 2(b)).

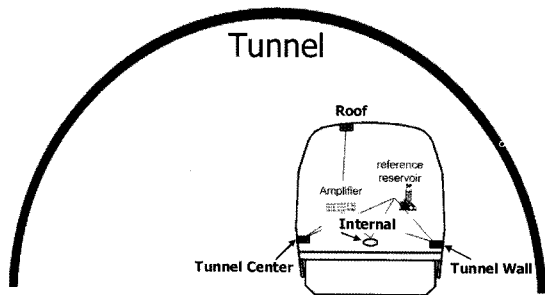


Fig. 3. Pressure sensor on train and tunnel

Fig. 3은 터널을 주행할 때, 터널벽면과 센서와의 상대위치를 나타낸 그림이다. 차량표면에 설치한 센서 중에서, 천정에 설치한 센서는 주행방향(상행/하행)에 따라 터널벽면과 거리에 큰 변화가 없다. 하지만, 옆면에 설치된 센서는 차량이 주행하는 방향(상행/하행)에 따라서, 터널벽면 방향과 터널중심 방향의 센서가 바뀌게 된다. 따라서 본 논문에서는 터널벽면 방향의 센서를 Tunnel wall, 터널중심 방향의 센서를 Tunnel center, 천정센서를 Roof 그리고 실내센서를 Internal 이라고 하겠다.

Table 1. Specification of test tunnel

		Length (m)	Cross-sectional Area (m <sup>2</sup> )
Tunnel	Samyoung1	340	61.1
	Samyoung2	175	61.1
	Anchang	880	61.1
	Hoam	154	61.1
	Gawun	570	61.1
TTX		144	10.4

Table 1은 시험터널과 틸팅차량의 길이 및 단면적을 나타낸 표이다. 시험터널은 호남선의 틸팅차량 시험선로에 존재하는 터널 중 일부로서, 입출구가 경사궤로 이루어져 있다. 그리고 시운전중인 한국형 틸팅차량의 단면적은 10.4m<sup>2</sup>이며, 길이는 144m이다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 터널 주행 시 실내 및 차량표면 압력변화

차량이 복선터널을 고속으로 진입하면, 터널의 벽면효과

에 의해서 차량표면 압력은 터널벽면과의 간극에 따라서 다르게 나타난다. 그리고 이러한 차량표면에서의 압력분포에 의해서 차체는 비대칭적인 압력분포와 이로 인한 공기역학적 진동이 발생한다[1,7].

Fig. 4는 틸팅차량이 안창터널(880m)을 158km/h의 속도로 진입할 때 실내 및 차량표면에서의 압력변화이다. 그래프의 기호는 각각 internal(■), Tunnel Center(▲), Roof(●), Tunnel Wall(▼)을 나타낸다. 전체적인 압력변화를 살펴보면, 터널진입 후에 나타나는 팽창파와 압축파로 인해 급격히 감소했다가 다시 상승하는 경향이 뚜렷이 나타난다. 차량 후미부 진입 시 발생한 팽창파에 의해 처음으로 압력감소가 나타나고, 다시 출구에서 반사된 팽창파가 중첩되면서 또 다시 압력감소가 발생한다. 그 후, 입구에서 반사된 압축파에 의해 급격히 압력이 증가하고, 다시 출구에서 반사된 압축파의 중첩에 의해 또 다시 상승한다. 이러한 현상은 차량이 터널을 통과하는 동안, 반복적으로 발생한다.

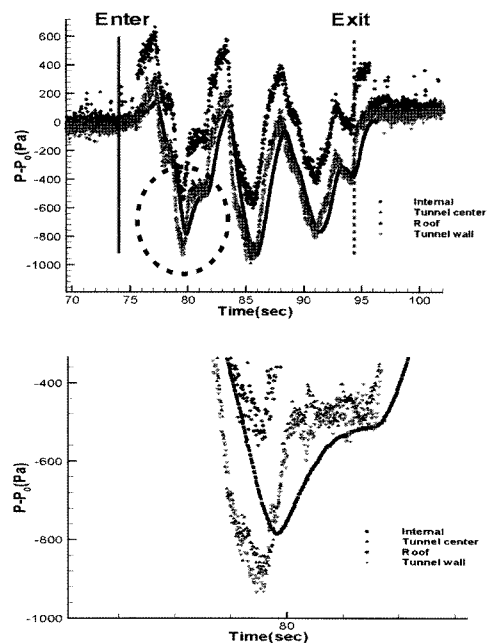


Fig. 4. Pressure variation (Anchang(880m), 158km/h)

각 센서의 압력변화를 살펴보면, Tunnel wall(▼)과 Tunnel center(▲)는 거의 같은 값을 나타내면서 변화한다. 하지만, 아래 확대한 그림에서 보면, Tunnel wall(▼)의 압력이 다소 낮게 나타난다. 이것은 센서(Tunnel wall)와 터널벽면과 간극이 상대적으로 작기 때문이다. 또한 Roof(●)에서 측정된 압력변화 패턴은 차량이 터널을 진입하면서 다른 센서에 비해 상대적으로 높게 형성되어 나타난다. 하지만, 절대적인 압력변화는 다른 센서와 유사한 범위에서 형성되며, 천정위에 설치된 공기조절장치(HVAC System)

등을 지난 유동이 터널을 진입하면서 센서에 직접 영향을 주기 때문으로 판단된다.

그리고 압력파에 의해 나타나는 압력변화가 차내로 전파되면서 실내압력이 급격히 변화시킨다. 차량 출입문 또는 실내파티션 등에 의해 Internal(■)은 시간지연 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 터널길이에 따른 실내 압력변화

앞서 살펴본 바와 같이, 터널 주행 시 발생하는 실내압력 변화는 차량진입 시 발생한 압력파(압축파, 팽창파)의 영향이다. 따라서 실내압력진동 폭과 진동양상은 차량길이, 차량속도, 터널길이에 따라 다르게 나타난다[8].

Fig. 5(a), (b)는 각각 호암터널과 안창터널을 통과할 때 나타나는 실내압력변동이다. 안창터널과 같이 다소 긴 터널에서는 차량 후미부가 터널입구를 진입하면서 발생한 팽창파와 터널출구에서 반사된 팽창파가 차량과 중첩되면서 큰 압력변동이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 5(b)). 하지만, Fig. 5(a)의 호암터널과 같이 길이가 짧은 터널에서는 압력 변동이 크게 발생하지 않는다. 이것은 터널의 길이가 짧아서 터널의 입/출구에서 발생한 팽창파의 중첩이 발생하지 않기 때문이다. 즉, 터널출구에 반사된 팽창파는 차량에 직접 영향을 미치지 못하고, 후미부 진입 시 발생한 팽창파에 의한 압력감소만 발생한다. 그 후, 차량이 터널을 빠져나가면서 압력이 회복된다.

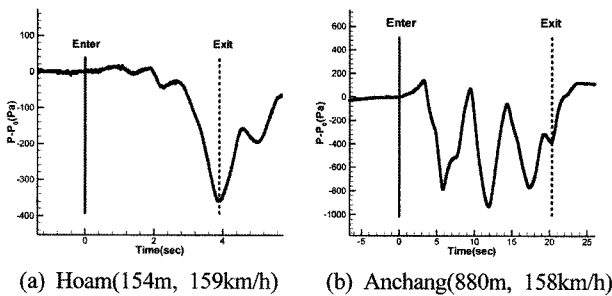


Fig. 5. Internal pressure variation of short and long tunnel

Fig. 6은 (a)가운터널(570m)과 (b)노령1터널(590m) 주행 시 실내압력변동을 나타낸 것이며, (c)는 가운터널 실험조건에 대한 수치해석 결과이다. 두 터널은 다소 긴 터널임에도 불구하고 실험 및 수치해석 결과에서 나타나는 바와 같이, 진입 초기 압력강하 이후에는 뚜렷한 압력변동이 나타나지 않는다. Fig. 6(c)의 x-t선도에서도 전두부 진입 시 발생한 압축파와 반사된 팽창파 그리고 후미부 진입에 의한 팽창파만 나타나고, Fig. 1과 같은 복잡한 압력파가 나타나지 않는다. 이러한 현상은 특정한 길이의 터널에서, 후미부 진입 시 발생하는 팽창파가 터널입구에서 반사된 압축파와

중첩되면서, 각 압력파의 특성이 상쇄되기 때문에 나타난다. 이처럼 성격이 다른 두 압력파(팽창파/압축파)가 중첩되어 서로 상쇄되는 현상은 특정한 길이의 터널에서 항상 나타나는데, 본 논문에서는 이러한 길이의 터널을 특성길이 터널(Characteristic length tunnel)이라고 하겠다.

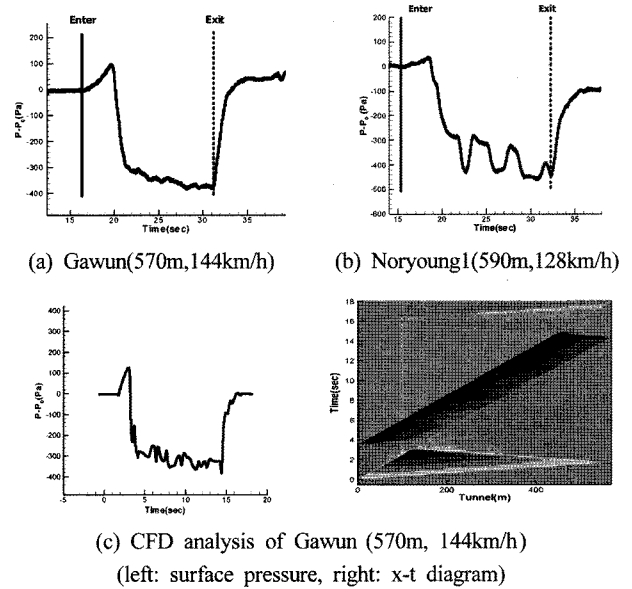


Fig. 6. Internal pressure variation of characteristic length tunnel

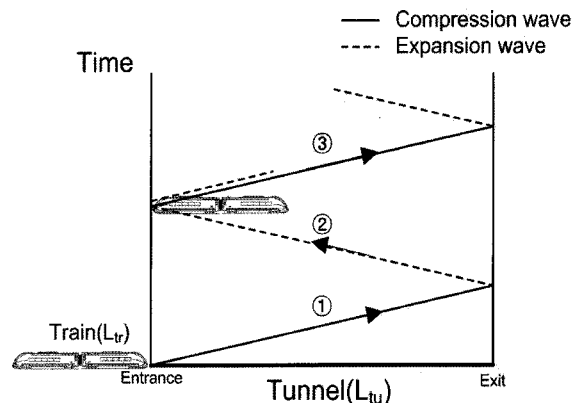


Fig. 7. Pressure wave superposition

Fig. 7은 특성길이 터널에서 압력파의 중첩현상을 나타낸 그림이다. 먼저, 전두부의 진입에 의해 발생한 ①압축파가 터널 출구에서 ②팽창파로 반사되어 전파된다. 그리고 터널입구에서는 다시 ③압축파로 반사된다. 이때, 차량의 후미부가 진입하면서 팽창파가 발생하여 서로 중첩된다. 결국, 압축파와 팽창파가 중첩되면서 압력변화가 서로 상쇄되어 나타난다. 즉, 이러한 현상은 전두부 진입 시 발생한 압축파가 터널출구에서 반사되어 다시 터널입구에 도달하기까지 걸린 시간과 전두부 진입에서부터 후미부 진입완

료까지 걸린 시간이 같은 경우에 발생한다. 따라서 터널길이, 열차길이, 열차속도의 관계가 식 (1)과 같은 경우에 나타난다.

$$\frac{L_{tr}}{V_{tr}} = \frac{2nL_{ct}}{C_0} \quad (1)$$

- $L_{ct}$ : characteristic tunnel length
- $L_{tr}$ : train length,  $V_{tr}$ : train velocity
- $C_0$ : speed of sound
- $n$ : return number of first compression wave

### 3.3 터널주행 시 이명감 분석

차량이 터널을 고속으로 주행할 때, 차량내부에서 발생하는 급격한 압력변화는 승객에게 심각한 이명감을 초래하여 차량의 터널주행 승차감을 저하시킨다. 사람이 느끼는 이명감은 압력변화율에 따라 결정되기 때문에 각 국가마다 이명감에 대한 평가기준을 압력변화율로 나타낸다.

Table 2. Regulation of pressure variation rate[9]

규격 기준	실내압력변화율 기준
객차등의 기압변화 세부기준	최고운행속도로 주행할 때의 객실내기압기준 (차량기밀도 $\tau = 11$ )
	1) 단위시간당 압력변화: $\Delta P / \Delta t \leq 500 \text{ Pa/s}$
	2) 3초간 최대압력변화: $\Delta P \leq 800 \text{ Pa}$
	3) 10초간 최대압력변화: $\Delta P \leq 1000 \text{ Pa}$
	4) 60초 이상에서의 최대압력변화: $\Delta P \leq 2000 \text{ Pa}$

우리나라에서는 Table 2와 같이 최고주행속도에서 일정 시간:  $t=1s, 3s, 10s, 60s$  동안 최대압력변화를 각각 500Pa, 800Pa, 1000Pa, 2000Pa 이내로 규정한다.

Fig. 8(a)와 (b)는  $\Delta t=1sec, 3sec$ 일 때, 시험선 터널(삼영1, 삼영2, 안창, 호암, 가운)에 대한 틸팅차량의 실내압력변화율을 나타낸다. 그리고 Table 3은 각 터널의 진입속도와 최고압력변화율을 타나낸 표이다.

Fig. 8(a)에서 길이가 짧은 삼영2, 호암터널에서는 압력 변화율이 적게 나타난다. 하지만, 나머지 터널에서는 규정에 근접하거나 초과하여 나타난다. 특히, Fig. 8(b)의 안창터널에서는 뚜렷한 압력파와 팽창파의 중첩으로 압력변화율의 규정을 크게 초과하여 나타난다. 그러나 특성길이에 가까운 가운터널은 Fig. 8(a)  $\Delta t=1sec$ 에서는 초과하지만, Fig 8(b)  $\Delta t=3sec$ 에서는 크게 줄어든다. 그 이유는 앞에서

설명한 바와 같이, 압축파와 팽창파가 중첩되어 터널내부에서 압력변동이 크게 나타나지 않고, 터널출구에서 반사된 팽창파만 초기 압력강하에 영향을 미치기 때문이다.

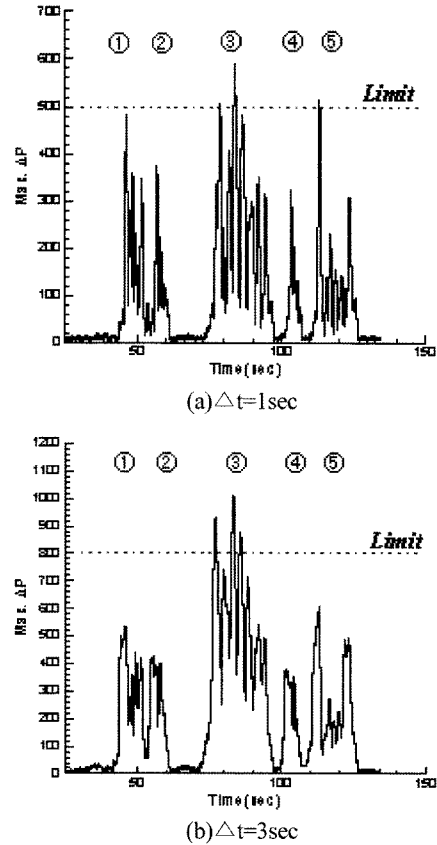


Fig. 8. Internal pressure variation rate

Table 3. 호남선 시험선 터널주행 시 최대압력변화율

Tunnel name	Max. $\Delta P$ ( $\Delta t = 1sec$ ) (Pa/s)	Max. $\Delta P$ ( $\Delta t = 3sec$ ) (Pa/s)	velocity (km/h)
① Samyoung1	481	534	147
② Samyoung2	373	425	149
③ Anchang	590	1008	158
④ Hoam	321	377	159
⑤ Gawun	513	608	155

## 4. 결론

현재 시운전중인 한국형 틸팅차량의 터널주행 공력특성 평가를 위하여, 호남선 시험구간에 존재하는 터널에 대한 실차 실험을 수행하였다. 각 터널 구간을 주행하면서, 실내 압력과 열차 외부의 표면 압력 및 실내압력변화율을 측정/분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현재 틸팅차량의 기밀도 수준에서는 실외 압력파가 객차내로 전파되면서 실내/외 압력변동의 경향이 비슷하게 나타나며, 그 압력차 또한 크지 않다.
2. 길이가 짧은 터널에서는 차량에 미치는 압력파(압축파/팽창파)의 영향이 상대적으로 적어서, 압력변동 역시 적게 나타난다. 하지만, 길이가 긴 터널에서는 서로 같은 성격의 압력파(팽창파-팽창파, 압축파-압축파)가 중첩되어서 급격한 압력변동이 발생한다.
3. 가운터널과 같이 특정 길이의 터널에서는 차량 후미부 진입 시 터널입구에서 발생한 팽창파와 입구에서 재반사되는 압축파가 중첩되어 각파의 성향이 크게 상쇄되며, 압력변동 역시 크게 줄어든다.
4. 현재 틸팅차량의 기밀수준에서는 안창터널과 같은 긴 터널을 고속주행 시 실내압력변화를 기준을 초과할 것으로 예상되며, 따라서 차량 상용화 시 차량 기밀도 보완이 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 한국철도기술연구원의 미래철도기술개발사업과 2008년도 2단계 두뇌한국21사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. Takanobu Ogawa, (1997), "Numerical Investigation of three dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel", Computers & Fluids Vol. 26 pp.565-585.
2. Hideo Kashimura, (2001), "Distortion of Compressible Wave Generated by Reflection of Propagating Expansion Wave at Open-end of Tube", Theoretical and Applied Mechanics Vol. 50, pp.365-370.
3. 권혁빈, (2000), "터널을 통과하는 고속철도차량에 의해 형성되는 비정상 유동장의 수치해석", 한국철도학회논문집, 제3권, 제4호, pp. 229-236.
4. 박춘수, (2004), "고속열차가 터널내에서 받는 압력변동 특성 분석", 한국철도학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp.690-695
5. M.S. Howe, (1998), "Mach Number Dependence of the compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel", Journal of Sound and Vibration, Vol. 212(1), pp.23-36.
6. Matsuo, K., Aoki, (1997), "Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel", Proceedings of the 9th Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHR Croup Conference Series Publication, No. 27, pp. 925-934
7. Tsuyoshi Ishihara, Michio Utsunomiya, Masahiro Okumura, Yutaka Sakuma and Takayuki Shimomura (1997), "An investigation of Lateral vibration caused by Aerodynamic continuous force on high-speed train running within tunnels", Proceedings of World Congress on Railway Research E, pp. 531-538
8. 남성원 (2004), "KTX차량 내외부의 압력변동 특성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제7권 제1호, No. 6, pp. 26-31
9. 철도차량 안전기준에 관한 지침, 국토해양부고시 제2006-247호

접수일(2008년 12월 1일), 수정일(2008년 12월 18일),  
계재확정일(2009년 4월 13일)