

## KTX차량 내외부의 압력변동 특성에 관한 연구

### A Study on the Characteristics of Internal and External Pressure Variation for KTX

남성원<sup>1</sup>  
Seong-Won Nam

#### Abstract

A study is conducted to clarify internal and external pressure variation of passenger cabin for KTX. These pressure variation may give rise to the ear-discomfort for passenger and fatigue for carbody. In this study, the pressure variation of interior, gangway and exterior of KTX passenger car is measured by using the atmospheric pressure sensors and portable data acquisition system. The tunnel from 4000m to 200m in length are chosen for the investigation of tunnel length effects. From the results of experiment, the pressure variation of interior per second is under the ear-discomfort limitation in all of tunnel. And, We found that there are similar patterns of exterior pressure variation for each critical tunnel length. These results generally agree to RTRI's experimental result for Shinkansen.

**Keywords :** Pressure Variation(압력변동), KTX(한국 고속철도), Ear-Discomfort(귀 불편감), Expansion Wave(팽창파), Compression Wave(압축파), Critical Tunnel Length(임계터널길이)

## 1. 서론

최고속도 300km/h로 주행하는 고속철도가 운행되면, 140km/h로 운행되던 기존선에서는 경험하지 못한 여러 가지 공기역학적 문제가 대두되며, 이러한 문제들을 해결하기 위한 방안이 여러 각도에서 검토되고 있다. 열차 속도가 증가하면 차량 공력소음은 속도의 5~6승에 비례하여 증가하며, 양력에 의한 가선과 판토품의 이선, 차량 주행 저항의 증가, 선로변 및 통과역의 열차풍 및 객실내외의 압력변동으로 인한 귀 불편감 및 차체 피로하중 증가 등과 같은 공기역학 관련 문제들이 새로이 야기된다. 객실내 압력변동은 철도를 이용하는 승객에 직접적인 영향을 주는 문제로서, 철도의 실내 쾌적성 향상 또는 승차감 향상과 밀접한 관련이 있다. 철도차량이 터널내를 주행하면 터널내부에는 압력변동이 발생하며, 그 압력이 객실내부에 전파되어 허용압력 이상이 되면 승객에게 귀 불편감을 주게 된다. 최근 해외 선진국에서는 고속철도뿐만 아니라 기존선

에서도 고속화가 진행되어 단선 터널의 경우, 터널내 차외 압력 변동이 고속철도에 필적할 정도로 증가하는 경우도 발생하였다. 이처럼 차량외부의 압력변화는 HVAC(Heating, Ventilating and Air-Conditioning)장치 및 출입문과 같은 차량의 기밀취약 부분을 경유하여 객실내 압력변화를 일으키며 이러한 객실내 압력변화는 인체의 外耳와 中耳의 압력차를 야기하여 불편감을 느끼게 된다. 그 외에도 차량내부의 불균일한 압력변동은 담배연기 또는 화장실 악취가 객실로 역류되는 현상을 일으키기도 한다[1-4].

본 연구에서는 경부고속철도 서울-대전 구간에서 최고 속도로 주행할 때에 차량 내외의 압력 변화를 터널 길이별로 측정하고, 각각에 대한 정량적 및 정성적인 특징을 검토하였으며, 일본 철도종합기술연구소에서 실시한 신간선에 대한 결과와 비교하여 양호하게 일치된 실험 결과를 얻었다.

## 2. 실험개요 및 방법

그림 1에 고속철도의 주행중 객실내의 압력변동의 계측 시스템의 개략도를 나타내었다. 압력변동의 계측 방법은 운

1 정희원, 한국철도기술연구원 공기유동연구그룹, 선임연구원

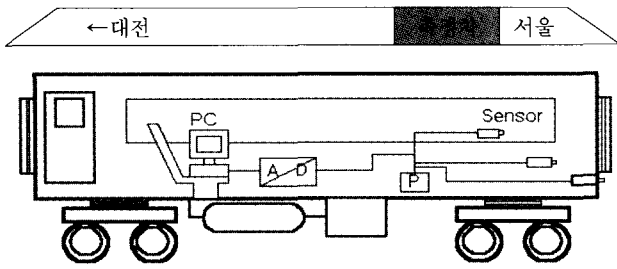


Fig. 1. Schematic sketch of a test car

행중인 차량의 차체외부인 대차부, 객실내 통로 및 의자의 선반위에 각각 압력 센서를 설치하고 실시간으로 측정된 데이터를 AD변환기를 경유하여 휴대용 컴퓨터에 저장하였다. 사용한 압력 센서는 일반적으로 철도차량의 객실 내외부 압력변동 크기인  $\pm 10\text{kPa}$ 의 범위에서 사용 가능한 Druck사의 PMP4070대기압계로 최대 샘플속도는  $100\text{kS/s}$ 이며, 16비트 16채널의 AD변환기로 받은 데이터를 그래픽 처리하였다.

주행중인 차량 객실내외의 압력변화를 측정하기 위하여 본 연구에서는 실차 실험을 시행하였다. 대상노선은 경부고속철도 출발역인 서울역에서 신선 선로공사가 마무리된 대전역까지의 구간내에 있는 다양한 길이의 터널을 대상으로 하였으며, 속도는 가능한 한 구간별 최고 허용속도로 주행하도록 하였다. 대상열차는 KTX 102102차량이며 서울방향 18량 위치의 특실 객실내에서 압력 및 터널 진출입을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

일반적으로 귀 불쾌감 현상은 차량 내외의 압력크기 및 시간당 압력 변화율에 의하여 생기는 것이며, 엘리베이터나 항공기 등의 고도변화를 동반하는 경우에도 기압변동에 따라 귀 불쾌감이 발생한다. 압력변동은 대략 차량속도의 2승에 비례하므로 열차가 고속으로 터널을 주행하면 귀 불쾌감 현상이 발생하기 쉬우며 철도분야에서는 1964년에 일본의 신간선 개통과 함께 문제화되기 시작하였다. 일본의 신간선에서는 기밀장치에 채택되었으나 국제적으로 보면 기밀화가 그다지 일반적이지는 않았다. 유럽에서는 비기밀 차량의 고속화가 서서히 진행되는 과정에서 귀 불쾌감의 발생은 끊임없이 검토 과제화되어 영국에서는 1970년대 이후 승객의 불쾌감을 지표로 한 압력변동 가이드 라인을 작성할 기밀 실험실과 현차 시험을 시행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

① 귀 불쾌감 현상은 개인차가 크며 동일인일지라도 건강상태, 기분, 평가상황에 따라 같은 압력변동에 대한 평가

결과가 크게 변화한다.

- ② 기밀실험실 결과에서는 압력이 상승할때에 불쾌감을 느낀다는 결과가 나왔으나, 열차 터널주행과 같이 압력 상승과 하강을 단시간에 반복하는 경우는 귀 내부의 수동적 개구로 인하여 압력 하강시에도 귀 불쾌감이 발생한다.
- ③ 압력변동이 천천히 변하는 경우, 귀의 능동적 및 수동적 개구가 모두 관여하므로 압력변동 속도도 무시할 수 없으나 철도 터널 주행과 같이 급격한 압력변동에 의한 귀 불쾌감 현상의 경우, 원래 상태와의 압력차이가 더 큰 작용을 한다.
- ④ 압력변동의 반복으로 인한 영향도 크므로 터널구간이 많은 경우는 평가기준이 강화된다.

표 1에는 영국 철도연구소 BR의 연구결과 기준을 차량 및 구간 형태별로 나타내었다.

한편, 일본 철도종합기술연구소(RTRI)와 운영기관인 JR에서도 압력변동과 귀 불쾌감의 관계를 파악하기 위하여 기밀실 실험을 통하여 최대 압력과 압력변동 속도간의 가이드

Table 1. Criteria of Pressure Variation(BR)

차량 및 구간 형태 구분	압력변동 허용 기준	
	극단적인 경우	통상적인 경우
A. 기존 비기밀 차량, 터널구간 10% 이하	4.0 kPa/4s	2.5 kPa/4s
B. 기존 비기밀 차량, 터널구간 25% 이상	3.0 kPa/4s	2.0 kPa/4s
C. 신형 기밀 차량, 터널구간 25% 이상	1.25 kPa/4s	0.8 kPa/4s
D. 신형 기밀 차량, 터널구간 50% 이상	1.0 kPa/4s	0.7 kPa/4s

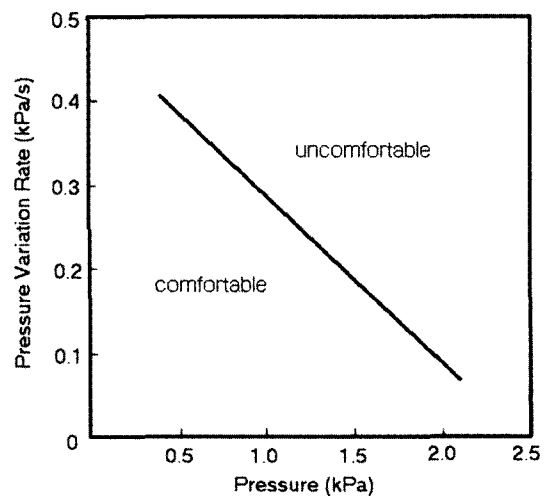


Fig. 2. Criteria of Pressure Variation(JR)

라인을 구하였다.

우리나라 고속전철인 KTX의 경우, 프랑스 TGV를 도입 하면서 SNCF에서 제안하는 기준값인 차량 객실 내부의 압력 변화와 내부 압력 변화율에 대하여 각각  $|\Delta p| \leq 2.0 \text{ kPa}$  과  $dp/dt \leq 200 \text{ Pa/s}$ 를 적용하고 있다.

고속전철이 터널을 고속으로 진출입하면서 발생하는 큰 압력변화는 일반적으로 승객에 대하여는 귀 불쾌감과 같은 쾌적성 저하를 가져오며, 차량과 터널에 대하여는 피로 반복하중을 부가하여 창문이나 차체의 균열과 노후된 터널 내부의 콘크리트 박리와 같은 결과를 가져온다. 이러한 압력 변화는 열차가 터널에 진입할 때에 발생하는 압력파의 터널 내에서의 전파와 반사에 의하여 야기되는 것으로 알려져 있다. 터널 진입시 형성되는 압축파의 압력 상승은 이론적으로 다음과 같은 간이식으로 구할 수 있다[5].

$$\Delta p = \rho V^2 \frac{R(1+R)}{1-M^2} \quad (\text{Pa}) \quad (1)$$

여기서,  $\rho$  : 밀도( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  : 열차속도( $\text{m/s}$ )

$M$  : 마하수 ( $V/V_0$ )

$R$  : 열차-터널 단면적비

위 식을 이용하여 열차-터널 단면적비가 0.178인 일본 신간선 300계 열차와 단면적비가 0.095인 KTX가 차량속도 300km/h로 터널에 진입할 때의 압력 상승값은 각각 1548Pa 과 768Pa로 KTX 차량의 터널내 압력 및 미기압과 문제는 신간선에 비하여 다소 여유가 있음을 알 수 있다.

그림 3~그림 9에 차량 객실 내외부의 압력변화를 나타내었다. 측정 구간 노선의 터널 중에서 길이별 대표적인 것으

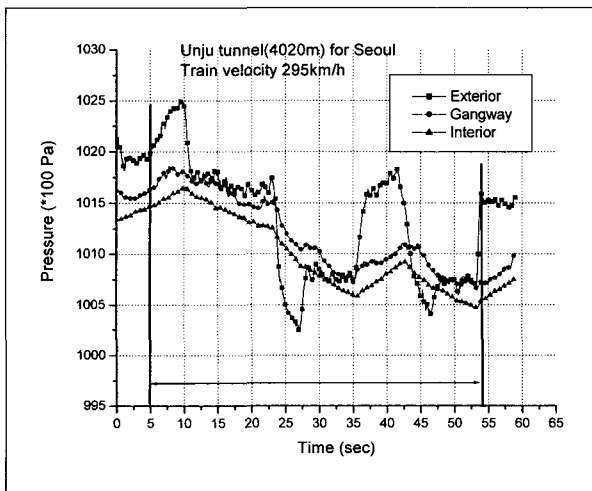


Fig. 3. Unju Tunnel

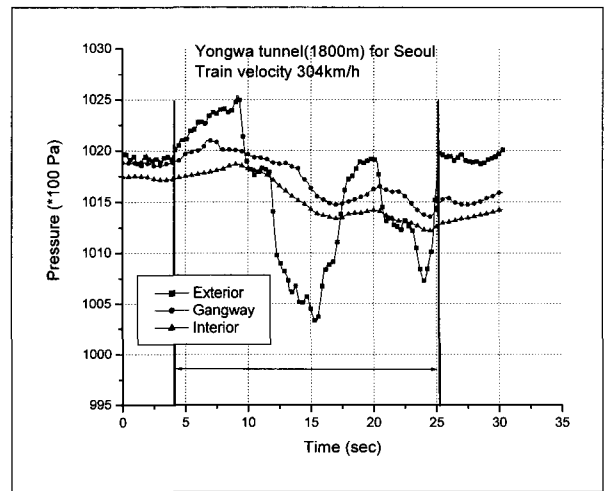


Fig. 5. Yongwa Tunnel

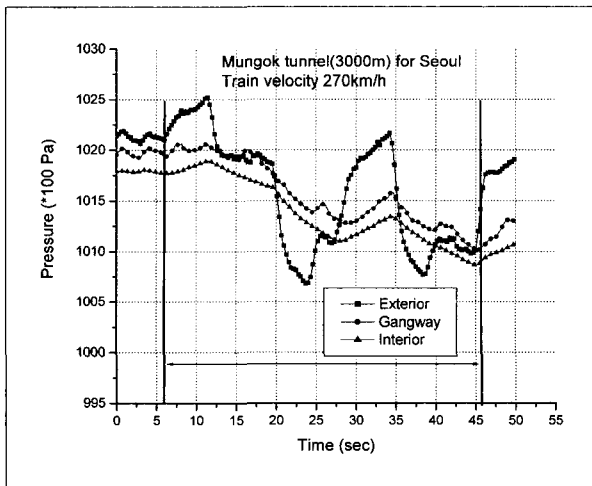


Fig. 4. Mungok Tunnel

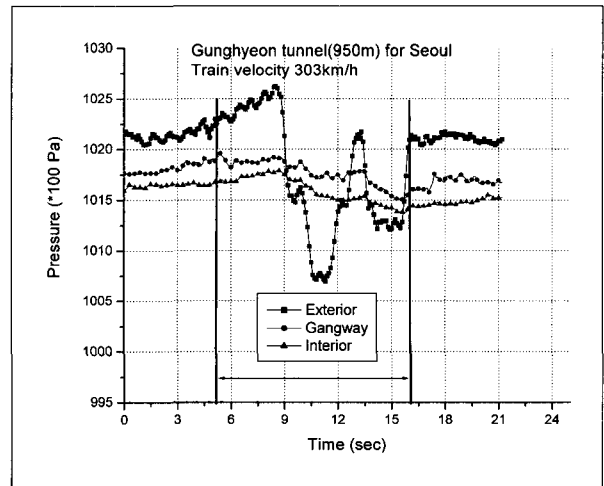


Fig. 6. Gunghyeon Tunnel

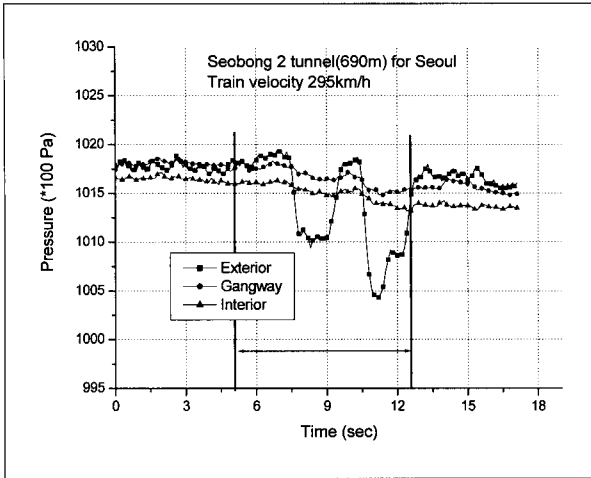


Fig. 7. Hyudae Tunnel

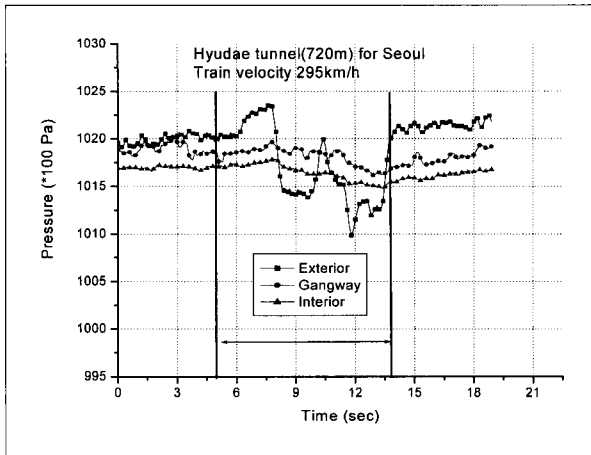


Fig. 8. Seobong 2 Tunnel

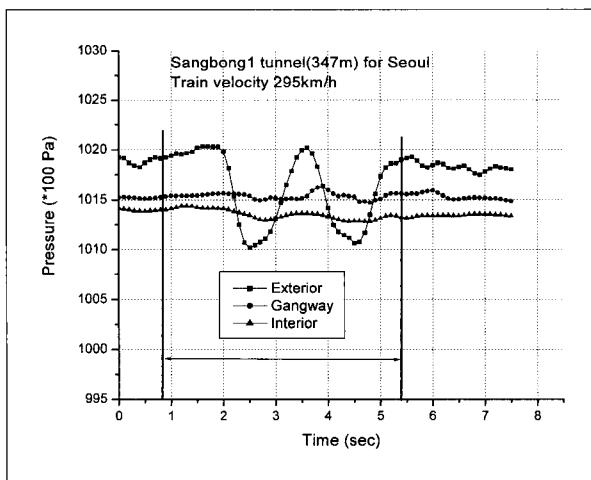


Fig. 9. Sangbong 1 Tunnel

로 운주터널(4020m), 문곡터널(3000m), 용와터널(1800m), 궁현터널(950m), 휴대터널(720m), 서봉2터널(690m), 상봉1

터널(347m)을 선정하였다.

각 터널에서의 열차 평균 속도는 270km/h~304km/h로 다소 편차가 있으나, 이는 각 구간마다 구배 및 곡선 반경등의 선로조건에 따라 최고 운행속도가 정하여져 있기 때문이다. 그림에서 알 수 있듯이 시험 대상 터널의 차량외부 압력 변화는 터널 길이별로 각각 다른 형태를 나타내며, 크게 4가지 형태로 분류할 수 있다. 최장 터널인 운주터널의 경우는 차량진입시에 형성되는 압축파와 차량후부의 진입에 따른 팽창파로 인하여 형성되는 차량외부 압력변화 패턴이 그림 10의 일본철도종합연구소에서 신간선 500계 열차가 300km/h로 3000m 터널을 주행할 때에 실시한 실차 실험결과와도 정성적으로 잘 일치함을 보여준다. 즉, 터널내에서 후부 팽창파, 전두부 팽창파, 후부 압축파, 전두부 압축파, 전두부 팽창파, 후부 팽창파, 전두부 압축파의 순서로 압력 변동이 일어나게 된다. 이 과정에서 팽창파와 교차되는 지점에서는 압력하강이, 압축파와 교차하는 지점에서는 압력상승이 일어난다.

열차가 터널에 돌입할 때에 발생하는 압력변동은 다음과 같은 3가지 원인에 기인하는 것으로 알려져 있다. 열차 전두부의 돌입에 의한 압축파의 전파, 열차 후미부의 돌입시에 발생하는 팽창파의 전파, 열차가 터널에 돌입할 때에 받는 압력상승이다. 각각에 대한 메카니즘은 다음과 같다. 열차 전두부가 터널에 진입할 때에 열차전면에는 압축파가 형성된다. 이 압축파는 음속으로 터널출구로 전파되며, 터널출구에서 펄스상의 압력파가 되어 외부로 방사되며 이를 미기압파라한다. 그때에 터널출구에서는 팽창파가 되어 반사되어 터널입구 방향으로 진행되며, 터널입구에서 다시 반사되어 압축파가 되어 터널 출구방향으로 진행하는 것을 반복하게 된다. 열차의 후미부가 터널에 진입할 때에 열차 후면에서는 압력이 저하하여 팽창파가 형성된다. 이 팽창파도 음속으로 터널출구 방향으로 진행하여 위와 같은 과정을 반복하게 된다. 한편, 열차가 터널에 진입할 때에는 열차 전면의 정체점 부근에 열차 외압이 증가하는 압력 상승은 후부 돌입에 의한 팽창파와 부딪히면서 없어진다.

그림 10 및 그림 11에서 알 수 있듯이, 열차가 터널진입후 첫 번째 팽창파와 만나게 되는 시간  $t_0$ 까지는 압력상승이 일어나며, 후부에서 형성된 팽창파와 만나는 시간  $t_0$ 에서 압력강하가 발생한다. 그 후 큰 압력변화 없이 유지되나 전방에서 오는 팽창파를 만나는 시간  $t_1$ 에서 압력강하가 일어나고, 후부 팽창파의 반사로 인하여 형성된 압축파와 만나는 시간  $t_2$ 에서는 압력상승이 일어난다. 이처럼 전후부에 상관없이 압축파와 부딪히는 지점에서 압력상승이, 팽창파와 부딪히는 지점에서는 압력하강이 일어나는 과정을 형성

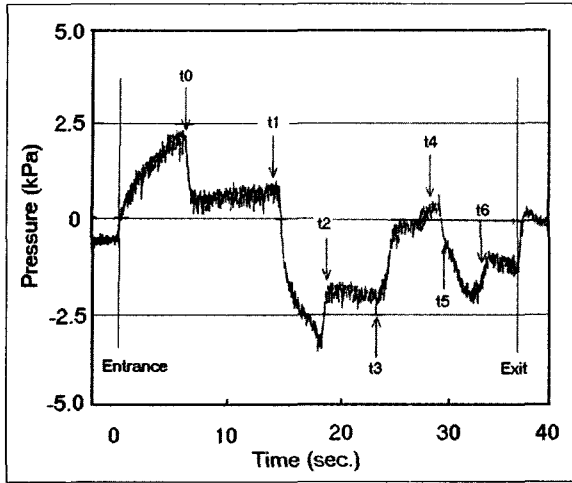


Fig. 10. Pressure variation of Shinkansen

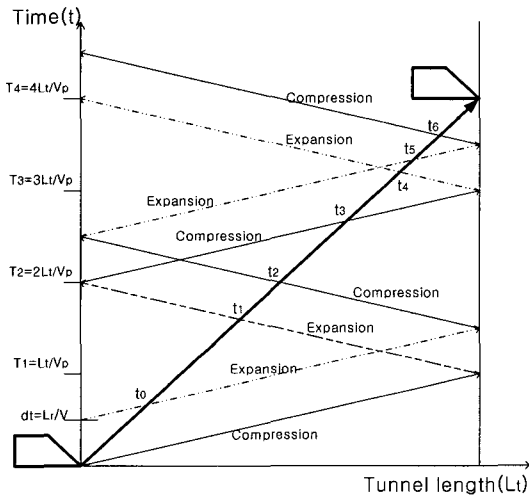


Fig. 11. Pressure wave pattern

한다.

한편, 터널내 압력 변화는 정해진 차량 제원과 차량속도 및 터널 크기에 대하여 터널 길이별로 유사한 압력변동 유형을 나타냄을 알 수 있으며, 이러한 압력변동 유형별 터널 길이는 터널내에서의 압력파의 전파에 소요되는 시간과, 차량 속도 선도를 같이 표시하는 L-t 선도로부터 임계 터널 길이를 산출할 수 있다[6].

이론적으로는, 열차 후미부가 터널에 들어오기까지의 시간  $dt$ 는 열차길이  $L_r$ 과 열차속도  $V$ 로부터  $dt=L_r/V$ 이며, 열차가 터널을 통과하는데 소요되는 시간은  $t_r=L/V$ 이고, 후미부 돌입에 의하여 형성된 팽창파가 전파되고 출구에서 반사되어 열차속도 선도와 만나게되는 지점에 도달하는데 소요되는 시간은  $t_B=3L_r/V_p+dt$  이므로 두 시간이 같아지는 터널길이는  $L_t=L_r V_p/(V_p-3V)$  와 같이 나타낼

수 있다. 이 식에 KTX의 차량길이  $L_r=387m$ , 음파속도  $V_p=340m/s$ , 차량속도  $V=83.3m/s(300km/h)$ 의 경우는 임계 터널길이는 1462m임을 알 수 있다. 그러나 시험결과에서 알 수 있듯이 터널길이가 이 보다 짧은 휴대터널, 상봉1 터널, 서봉2 터널에서는 그림 10과는 다른 압력변화 형태를 나타내므로 모든 터널에 대하여 통일적으로 이 임계 터널식을 적용하기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 각 터널길이와 차량길이 및 차량속도에 따라서 압력파형이 다르게 나타남을 알 수 있었으며, 그것은 압력파가 터널입출구에 도달하는 시간과 열차 후미부가 터널에 진입하는데 소요되는 시간과의 비에 의하여 분류할 수 있다.

후미부 진입에 의한 팽창파가 진행하여 차량 L-t 선도와 만나는 시간  $t_3$  및  $t_5$  동안 이동하는 거리는

$$L_3 = \frac{L_r V_p (V_p + V)}{3V(V_p - V)} \quad (2)$$

$$L_5 = \frac{L_r V_p}{V_p - V} \quad (3)$$

여기서,  $L_r$  : 열차길이(m)

$V_p$  : 압축파 전파속도(m/s)

$V$  : 차량속도(m/s)

이며, 차량속도 300km/h에서는 각각 868m, 513m에 해당된다. 즉, 터널 길이가 1462m 이상의 터널에서는 그림 10과 같은 압력변동 형태인 팽창파-팽창파-압축파-압축파-팽창파-팽창파-압축파의 순서로, 터널 길이가 868m 이상에서는 팽창파-팽창파-압축파-압축파-팽창파의 순서로, 513m 이상의 터널에서는 팽창파-압축파-팽창파-팽창파-압축파의 순서로, 이 보다 더 짧은 터널에서는 팽창파-압축파-팽창파의 순서로 부딪히게 된다.

이러한 유형은 실험 결과로부터 터널길이가 4020~950m 인 운주, 문곡, 용와 터널과 터널길이가 950~720m인 궁현, 휴대 터널과, 690m인 서봉2 터널, 347m인 상봉1 터널이 서로 다른 터널내 압력변화 유형을 나타냄을 알 수 있다.

또한, 운주터널에서는 터널 진출입후의 차량외부 압력이 약 500Pa 변한 것을 볼 수 있는데 이는 터널을 전후하여 선로의 구배로 인한 표고 차이가 있기 때문에 나타난 것으로서, 고도 100m당 약 1.0kPa의 기압 변화와 외기의 풍속에 영향을 받은 것으로 판단된다.

따라서, 터널에 구배가 없다면, 실내의 기밀 유지로 압력이 서서히 회복되어 이러한 터널 통과 전후의 실내 압력 차이는 없어질 것으로 사료된다.

각 터널에서의 최대압력차, 내외부 압력 변화율등을 표 2

Table 2. Pressure variation of KTX

터널명	길이 (m)	실내압력변화율 (Pa/s)	외부압력변화율 (Pa/s)	압력차 (Pa)
운주	4020	55	386	2300
문곡	3000	48	344	1854
용와	1800	70	423	2194
궁현	950	75	895	1862
휴대	720	79	1450	1380
서봉2	690	87	1660	1400
상봉1	347	100	1683	1007

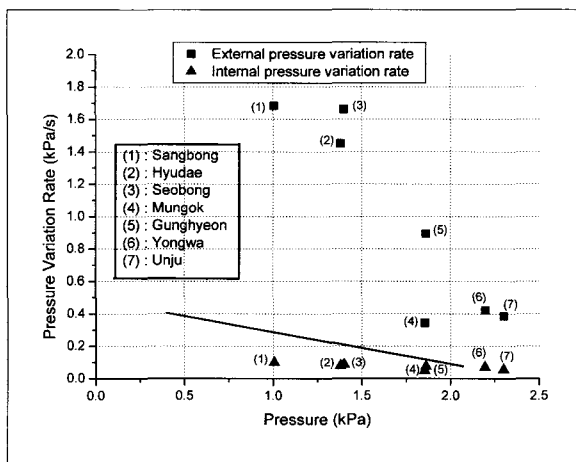


Fig. 12. Pressure variation rate of KTX

에 나타내었다. 표에서 최대압력차이는 차량 외부 압력의 최대값과 최소값과의 차이를 나타내며, 압력변화율은 압력 변화가 가장 큰 구간에서의 1초당 변화량으로 나타내었다. 터널내에서의 압력차이는 동일한 차량속도에서는 터널길이 가 길수록 커지지만 압력변화율은 길이에 반비례함을 알 수 있다. 상봉1 터널의 경우는 최대 압력차이는 작지만, 초당 압력변화율은 가장 크게 나타났으며, 이는 터널길이 짧기 때문에 전파된 팽창파와 되돌아 오는 압축파간의 시간 간격이 짧아서 압력변화가 긴 터널에 비하여 짧은 시간에 일어났기 때문이며, 전두부에 의하여 생성된 압축파로 인한 압력상승과 후미부의 팽창파로 인한 압력강하가 부가되어 큰 압력 변화율을 나타낸 것으로 판단된다.

차량외부의 큰 압력변화에 비하여 차량 실내에서는 대부분의 터널에서 압력 변동 허용 기준값인 200Pa/s와 영국BR 기준인 0.7kPa/4s를 훨씬 밑도는 값을 나타내지만, 최대 압력차를 변수로 사용하는 일본의 기준에 대한 결과 그림 12에서는 최장 터널인 4020m의 운주터널과 304km/h의 최고속도로 차량이 주행한 용와터널의 경우는 기준 영역 범위를 벗어남을 알 수 있다. 그러나, KTX 고속철도 차량의 경우,

Recy flow와 같은 연속 환기식이 아니라 터널 진출입시에 외부 신선 공기 환기구의 플랩을 여닫는 비교적 간단한 차단식을 채택하고 있으며, 이 방식으로도 객실 압력변동 기준값을 만족함을 알 수 있다.

그러나 향후에 새로운 고속선로를 건설할 때에 지금보다 긴 장대터널에서 차량속도가 향상되면, 객실내의 신선공기 환기 공급측면에서 연속 환기 방식과 같은 여압 장치가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 KTX 고속철도 차량의 터널 진출입시에 차량 외부 및 내부의 압력변동에 대한 실차 실험을 실시하였다. 현재, 국내에서 운용중인 열차중 운행 최고속도에 근접한 노선을 선정하여 객실내부, 통로 및 차량 외부의 압력변화를 측정하였으며, 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 다양한 길이의 터널에서 현재 국내에서 시운전중인 고속전철의 최고속도에 대한 차량 객실 내외부의 압력변화 특성을 정성적 및 정량적으로 파악할 수 있었다.
- (2) 차량길이 387m의 고속전철이 시운전 최고속도 300km/h로 터널을 주행할 때에 발생하는 압력 변동 형태는 임계 터널 길이별로, 1462m 이상의 터널에서는 팽창파-팽창파-압축파-압축파-팽창파-팽창파-압축파 순서로, 868m 이상의 터널에서는 팽창파-팽창파-압축파-압축파-팽창파, 513m 이상의 터널에서는 팽창파-압축파-팽창파의 순서로 압력 변화 유형을 나타낸다.
- (3) 시운전 대상 터널 전구간에서의 객실내 압력 변동값은 KTX 객실내 기준값 200Pa/s 이하를 만족한다.

#### 참고문헌

1. J.Matsuo and K.Akutsu, 1999, RTRI report, Vol.13, No.10, pp. 31-34.
2. 小野純郎, "鐵道のスピードアップ", 日本鐵道運輸協會, 1996.
3. 小林 實 外 3名, 新幹線列車トンネル走行時の車外,車内壓變動解析, 日本機械學會論文集B, 61卷591号, 1995, pp256-262.
4. 新孫子 博 外 3名, "快適性向上を目指した空調システム", J-rail96, 1996, pp.287-290.
5. 原 朝茂, 高速でトンネルに突入する場合に列車に作用する空氣力, 日本機械學會論文集B, 26卷171号, 1960, pp.1581-1586.
6. 남성원, "터널에서의 고속 철도 압력 특성에 관한 이론적 해석", 대한기계학회 논문집 투고중.