

KTX차량 객실내외의 압력변동특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Characteristics of the Inside and Outside Pressure Variation for KTX

남성원* 홍현주**
Nam, Seong-Won Hong, Hyeon-Ju

ABSTRACT

Experimental study is conducted to clarify the inside and outside pressure variation of passenger cabin for KTX. These pressure variation may give rise to the ear-discomfort. Generally ear-discomfort has been considered as a problem related to high speed train. 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 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 is a similar pattern of exterior pressure variation. These results generally agree with RTRI's experimental result for Shinkansen.

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 주행저항의 증가, 선로변 및 통과역의 열차풍 및 객실내외의 압력변동으로 인한 이명감 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 이명감과 같은 불쾌감을 주게 된다. 최근 해외 선진국에서는 고속철도 뿐만아니라 기존선에서도 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 통로문과 같은 차량의 비기밀부분을 경유하여 객실내 압력변화를 일으키며 이러한 객실내 압력변화는 인체의 外耳와 中耳의 압력차를 야기하여 불쾌감을 느끼게 된다. 그 외에도 차량내부의 불균일한 압력변동은 담배연기 또는 화장실 악취가 객실로 역류되는 현상을 일으키기도 한다[1-4].

본 연구에서는 경부고속철도 서울-대전 구간에서 최고속도로 주행할 때에 차량 내외의 압력 변화를 터널 길이별로 측정하였으며, 각각에 대한 정량적 및 정성적인 특징을 검토하였으며, 일본 철도중합기술연구소에 실시한 신간선에 대한 결과와 비교하여 양호하게 일치된 실험결과를 얻었다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 실험개요 및 방법

그림1에 주행중 객실내의 압력변동의 계측시스템의 개략도를 나타내었다. 압력변동의 계측 방법은 운행중인 차량의 차체의부인 대차틀, 객실내 통로 및 의자위 선반위에 각각 압력 센서를 설치하고 실시간으로 측정한 데이터를 AD변환기를 경유하여 휴대용 컴퓨터에 저장하였다. 사용한 압력 센서는 일반적으로 철도차량의 객실 내외부 압력변동 크기인 $\pm 10\text{kPa}$ 의 범위에서 사용 가능한 Druck사의 PMP4070시리즈로 최대 표본속도는 100kS/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 대전역 까지의 구간내에 있는 다양한 길이의 터널을 대상으로 하였으며, 속도는 가능한 한 구간별 최고 허용속도로 주행하도록 하였다. 대상열차는 KTX 102102차량에서 서울방향 18량 위치에서 측정하였다.

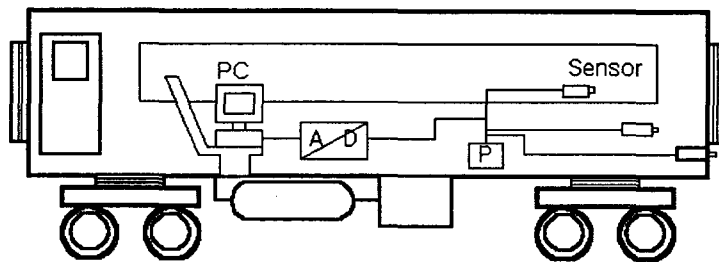


Fig. 1. Schematic sketch of a test passenger car

3. 결과 및 고찰

일반적으로 이명 현상은 차내의 압력크기 및 시간당 압력 변화율에 의하여 생기는 것이며, 엘리베이터나 항공기 등의 고도변화를 동반하는 경우에도 기압변동에 따라 이명감이 발생한다. 압력변동은 속도의 2승에 비례하므로 열차가 고속으로 주행하면 이명현상이 발생하기 쉬우며 철도분야에서는 1964년에 일본의 신간선 개업과 함께 문제화되기 시작하였다. 일본의 신간선에서는 기밀장치가 채택되었으나 국제적으로 보면 기밀화가 그다지 일반적이지는 않다. 유럽에서는 비기밀 차량의 고속화가 서서히 진행되는 과정에서 이명감의 발생은 끊임없이 검토 과제화되어 영국에서는 1970년대 이후 승객의 불쾌감을 지표로 한 압력변동 가이드 라인을 작성할 기밀 실험실과 현차 시험을 시행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- ①이명현상은 개인차가 크며 동일인일지라도 건강상태, 기분, 평가상황에 따라 같은 압력변동에 대한 평가 결과가 크게 변화한다.
- ②기밀실험실 결과에서는 압력이 상승할때에 불쾌감을 느낀다는 결과가 나왔으나, 열차 터널주행과 같이 압력 상승과 하강을 단시간에 반복하는 경우는 귀 내부의 수동적 개구로 인하여 압력 하강시에도 이명감이 발생한다.
- ③압력변동이 천천히 변하는 경우, 귀의 능동적 및 수동적 개구가 모두 관여하므로 압력변동 속도도 무시할 수 없으나 철도 터널 주행과 같이 급격한 압력변동에 의한 이명 현상의 경우, 원래 상태와의 압력차이가 더 큰 작용을 한다.
- ④압력변동의 반복으로 인한 영향도 크므로 터널구간이 많은 경우는 평가기준이 강화된다.

표1에는 영국BR의 연구결과 기준을 표로 나타낸 것이며 여기서 평점기준 7이 지극히 불쾌하다이며 전혀 불쾌하지 않다는 1점으로 하였다.

Table 1. Limitation for pressure variation (BR)

차량 및 구간 형태 구분	압력변동 허용 기준		7단계 평점
	극단적인 경우	통상적인 경우	
A. 기존 비기밀 차량, 터널구간 10% 이하	4.0 kPa/4s	2.5 kPa/4s	4.5
B. 기존 비기밀 차량, 터널구간 25% 이상	3.0 kPa/4s	2.0 kPa/4s	3.5
C. 신형 기밀 차량, 터널구간 25% 이상	1.25 kPa/4s	0.8 kPa/4s	2.5
D. 신형 기밀 차량, 터널구간 50% 이상	1.0 kPa/4s	0.7 kPa/4s	2.0

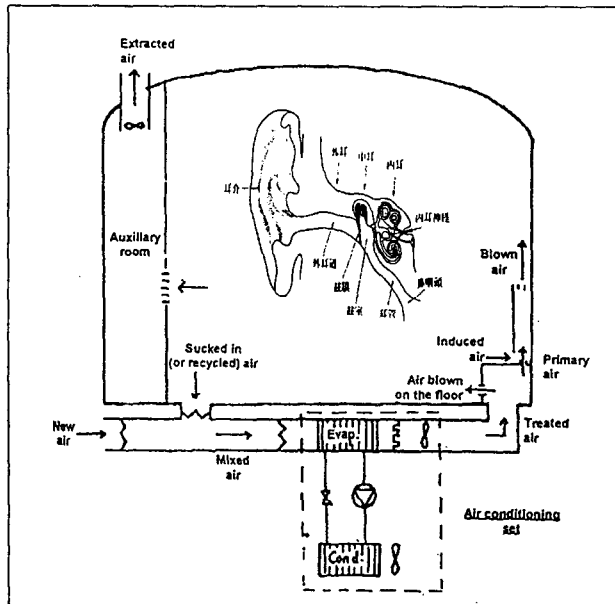


Fig. 2. Pressure Transfer Mechanism of KTX

그림3~그림8에 차량 객실 내외부의 압력변화를 나타내었다. 측정구간의 대상 노선의 터널 중에서 길이별로 대표적인 것으로서 운주터널(4020m), 문곡터널(3000m), 용와터널(1800m), 서봉1터널(1370m), 궁현터널(950m), 상봉1터널(347m)을 선정하였다. 각 터널에서의 열차 진입속도는 270km/h~304km/h로 다소 편차가 있으나, 이는 각 구간마다 구배 및 곡선반경등의 선로조건에 따라 최고 운행속도가 정하여져 있기 때문이다. 그림에서 알 수 있듯이 시험대상 터널 중에서 가장 짧은 상봉1터널을 제외하곤 대부분의 터널에서 압축파와 팽창파가 반복되는 압력변동 형태를 나타내며 이러한 결과는 그림9의 일본철도종합연구소에서 신간선을 대상으로 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 일어난다. 또한, 터널길이가 일정 길이 이상이 되면 거의 유사한 압력변동 형태를 나타낼 수 있으며, 이는 터널내에서의 압력파의 전파에 소요되는 시간과, 차량속도로부터 개략적

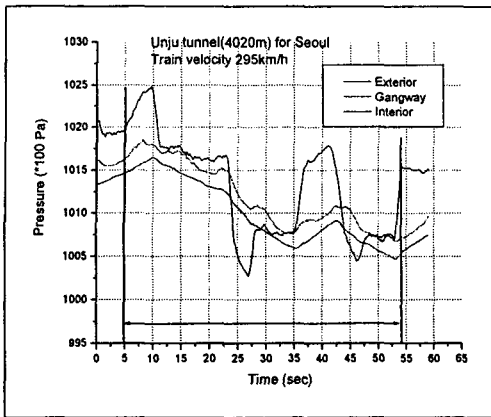


Fig. 3. Unju tunnel

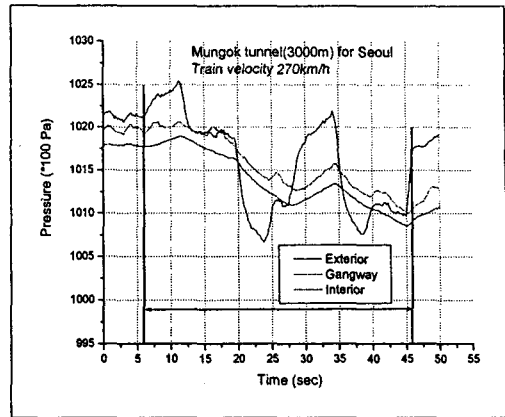


Fig. 4. Mungok tunnel

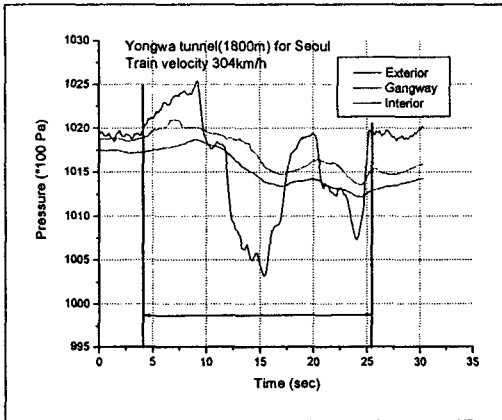


Fig. 5. Yongwa tunnel

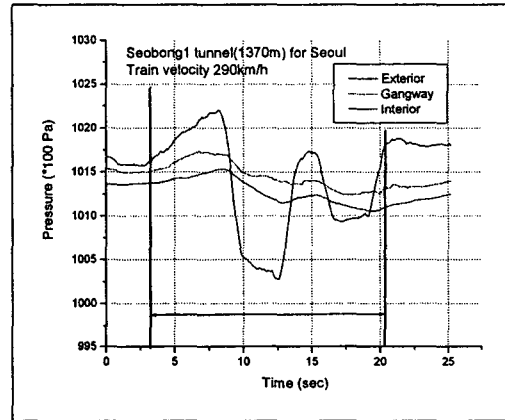


Fig. 6. Seobong1 tunnel

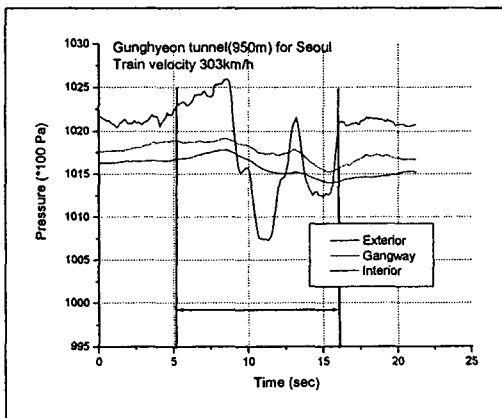


Fig. 7. Gunghyeon tunnel

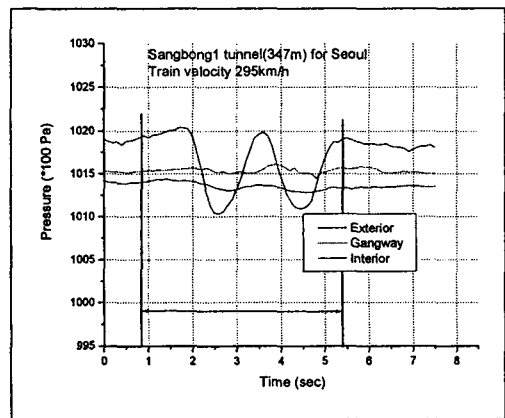


Fig. 8. Sangbong1 tunnel

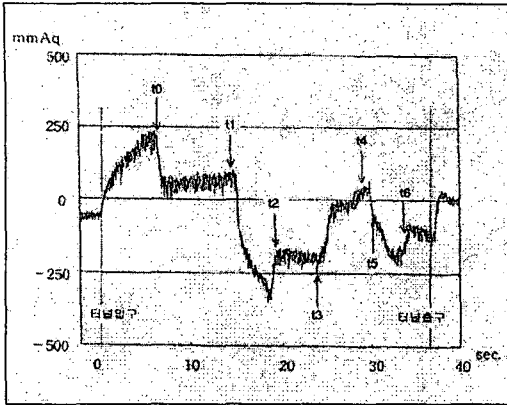


Fig. 9 Pressure variation of Shinkansen

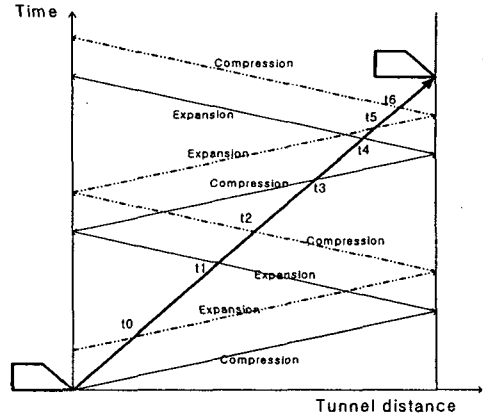


Fig. 10 Pressure wave pattern

인 터널길이를 산출할 수 있다. 즉, 단위 초당 압력파가 진행되는 길이를 차량속도 300km/h로는 약 4초가 소요되므로 압축파 팽창파에 각 2번씩 부딪히는 그림 10과 같은 형태로 이루어지며, 따라서 차량이 시속 300km/h로 4초간을 주행하는 거리는 330m이므로 터널길이가 330m 이상되는 경우에는 그림9와 같은 압력변동 형태를 나타내게 된다. 그러나 압력파가 터널내를 진행하면서 여러 가지 저항 요소를 거치게 되므로 이상적인 전달 시간보다 다소 더 소요된다고 가정할 수 있으므로 터널길어도 더 늘어나 그림 10과 같은 압력파의 형태가 나타나는 것은 터널 임계길이가 400~600m 정도로 유추할 수 있다. 이는 실험 결과로부터 터널길이가 4000~950m인 운주, 문곡, 용와, 서봉1, 궁현 터널과 임계터널길이 이하인 347m인 상봉1터널이 다소 다른 압력파형을 나타냄을 알 수 있다.

또한, 운주터널에서는 터널 진출입후의 차량외부 압력이 변한 것을 볼 수 있는데 이는 터널을 전후하여 표고 차이가 있기 때문에 나타난 것으로서, 고도 100m당 약 9800Pa의 기압 변화와 외기의 풍속에 영향을 받은 것으로 판단된다.

각 터널에서의 최대압력차, 내외부 압력 변화율등을 표2에 나타내었다. 표에서 최대압력차이는 차량 외부 압력의 최대값과 최소값과의 차이를 나타내며, 압력변화율은 압력변화가 가장 큰 구간에서의 1초당 변화량으로 나타내었다. 상봉1터널의 경우는 최대압력차이는 작지만, 초당 압력변화율은 가장 큰 점이 특이하며 이는 터널길이가 짧기 때문에 전파된 팽창파와 되돌아 오는 압축파간의 시간 간격이 짧아서 일어난 현상으로 사료된다.

Table 2 Pressure variation of interior and exterior of KTX

터널명	터널길이 (m)	차량진입속도 (km/h)	실내압력변화율 (Pa/s)	외부압력변화율 (Pa/s)	최대압력차 (Pa)
운주	4020	295	55	386	2227
문곡	3000	270	48	344	1854
용와	1800	304	70	432	2194
서봉1	1370	290	85	431	1930
궁현	950	303	92	895	1862
상봉1	347	295	100	1400	1007

차량외부의 큰 압력변화에 비하여 차량 실내에서는 대부분의 터널에서 압력 변동 허용 기준값인 200Pa/s와 영국BR기준인 0.7kPa/4s를 훨씬 밑도는 값을 나타냄을 알 수 있으며, KTX 고속철도 차량이 Recy flow 연속환기식이 아닌 플랩을 여닫는 차단식으로도 기준값을 만족함을 알 수 있다. 그러나 향후에 새로운 고속선로를 건설할 때에 더욱 긴 장대터널이 생긴다면, 객실내의 신선공기 환기 공급측면에서 연속 환기 방식과 같은 여압장치가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 KTX 고속철도 차량의 터널진출입시에 차량 외부 및 내부의 압력변동에 대한 실차 실험을 실시하였다. 현재, 국내에서 운용중인 열차중 운행 최고속도에 근접한 노선을 선정하여 객실내부, 통로 및 차량외부의 압력 변화를 측정하였다. 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 길이별로 대표적인 터널에서 현재 국내에서 시운전중인 최고속도에 대한 차량 객실 내외부의 압력변동 특성을 정성적 및 정량적으로 파악할 수 있었다.
- (2) 시운전 최고속도에서의 압력변동은 터널길이가 대략 500m 이상인 경우 같은 유형을 나타낸다.
- (3) 시운전 대상 터널 전구간에서의 객실내 압력 변동값은 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", 日本鐵道運轉協會, 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, pp287-290.