

틸팅 열차의 터널주행 시 실내 압력변화에 대한 실험적 연구

Experimental study of Internal pressure variation of the TTX traveling in conventional tunnels

윤수환* · 이영빈* · 광민호* · 박훈일* · 김규홍** · 이동호** · 권혁빈*** · 고태환***

Su-Hwan Yun · Young-Bin Lee · Min-Ho Kwak · Hoon-il Park · Kyu-Hong Kim

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 nose each other. Because the compression wave and expansion wave have interactions with the train in a tunnel repeatedly, the internal pressure of the train is dramatically varied. And this pressure variation gives passengers discomfort like ear-ache. In this paper, we had measured the internal pressure variation of TTX developed and being on Test-Running in Honam line and made an analysis of pressure variation rate. As a result, the internal pressure variation was different as to the length of tunnel. Though the entering velocity of TTX is similar on test tunnels, on the short tunnel, the pressure drop was lower than that of the long tunnel. And it was expected that the rates of internal pressure variation would be exceeded the limits on 160km/h entering velocity.

1. 서론

열차가 고속으로 터널을 진입하면, 전두부 진입에 의해 압축파(Compression wave)가 발생하며, 후미부 진입에 의서는 팽창파(Expansion wave)가 각각 발생한다. 터널 입구에서 발생한 압축파와 팽창파는 터널 출구 방향으로 음속의 속도로 진행하다가 터널 출구에서는 각각 팽창파와 압축파로 반사되어 다시 터널 입구방향으로 진행한다[5]. 터널내부에서 반복적으로 발생하는 압축파와 팽창파는 터널내부를 주행하는 차량과 서로 상호작용을 일으키면서, 차량 내부에서는 아주 급격한 압력변동이 발생하게 된다. 차량 내부의 급격한 압력변동은 승객에게 이명감을 초래하는 등, 차량의 터널주행 성능에 영향을 미치기 때문에 차량개발 시 반드시 고려해야 할 중요한 사항 중 하나이다[1,2]. 본 논문에서는 국내에서 개발되어, 현재 시운전 중인 한국형 틸팅차량(TTX)의 터널주행 성능분석을 위해서, 호남선 시험선에 존재하는 터널에 대하여 실내압력변동을 측정하고, 이에 대한 실내 압력변화율을 경부고속전철의 기준에 적용하여 분석하였다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 계측시스템 구성

고속으로 터널을 주행하는 차량의 실내압변화를 측정하기 위해서는 작은 압력변화에도 민감하게 반응하는 센서

* 서울대학교 기계 항공 공학부, 정회원

E-mail : suhwan12@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7399 FAX : (02)882-7927

** 서울대학교 기계 항공 공학부

*** 서울대학교 기계 항공 공학부, 교수, 정회원

**** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 정회원

와 센서에서 발생된 신호를 정확하게 샘플링하여 수집/저장할 수 있는 시스템이 필요하다. 본 실험에서는 표 1에 나타난 것과 같이 MKS사의 Type 220 차압센서를 실내압력 측정에 사용하였으며, 데이터 수집 장치로는 NI사의 PCI-6024E를 이용하였다.

표 1 계측시스템 제원

	Pressure Transducer	DAQ system
Model	MKS Type 220 BARATRON MANOMETOR	CPU 1.8 Dual-core PCI-6024E DAQ device
Output Range	100Torr	200ks/s
Error	±0.15%	±0.05% to ±10V

앞서, 설명한 차압센서와 데이터 수집/저장장치를 이용하여 그림 1과 같은 계측시스템을 구성하였다. 차압센서는 두 지점의 압력차를 나타내기 때문에, 한 지점은 측정하고자 하는 객실내부에서의 압력($P(t)$), 나머지 한 지점은 기준압력(P_0)으로 설정하여야 한다. 이 기준압력 설정을 위해, 그림 1과 같이 기준압력 저장장치를 제작, 설치하였다. 시간에 따른 실내압력($P(t)$)과 기준압력(P_0)과의 압력차를 차압센서가 전압으로 AMP에 전달하고, 증폭된 전압 신호가 다시 DAQ시스템으로 전달되고 기록된다. 그리고 차량의 터널 진입속도 및 터널 진출입 상대시간은 차량에 설치된 모니터를 통하여 획득하였다.

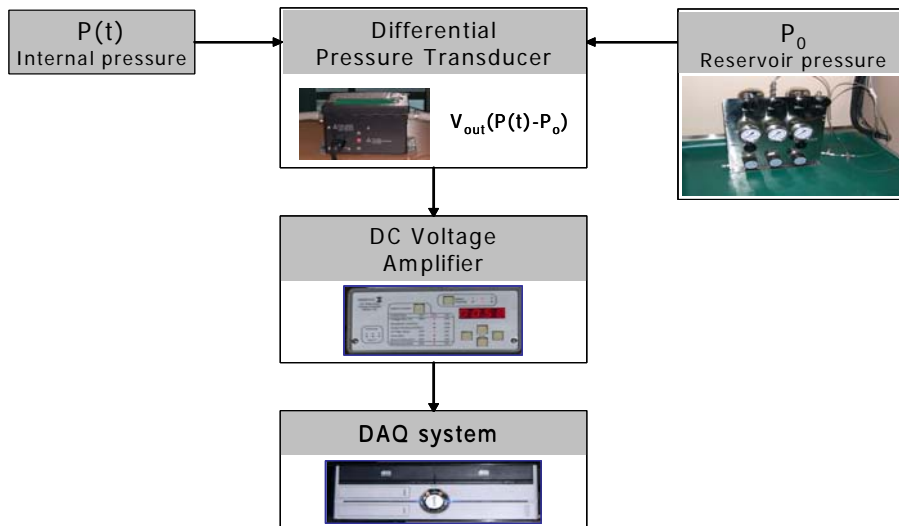


그림 1 계측시스템 구성도

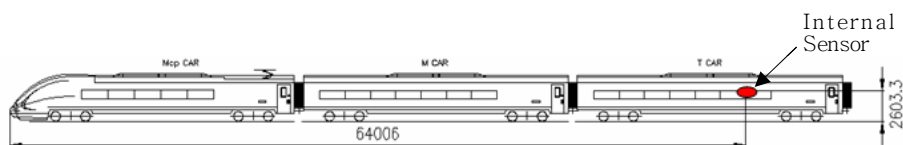


그림 2 실내 압력센서 위치

객실 압력측정 지점은 그림 2와 같이 차량의 길이방향으로 약 64m(총 차량길이: 약 144m)지점, 높이

약 2.5m 지점으로 승객의 승차 예상위치를 고려하여 TCAR 내부에 설치하였다.

2.2 실험터널

본 실험에서는 시험선 구간에 존재하는 터널을 주 대상으로 수행하였다. 표 2는 시험선에 존재하는 실험터널과 단면적 그리고 터널길이를 나타낸다.

표 2 실험터널 단면적 및 터널 연장

터널명	단면적(m ²)	터널 길이(m)
삼영1	61.1	340
삼영2	61.1	175
안창	61.1	880
호암	61.1	154
가운	61.1	570
약곡	61.1	1900

3. 실험결과 및 분석

터널주행 시 터널내부에 발생하는 압력과의 크기는 차량/터널 단면적비, 터널진입속도, 터널길이, 전두부형상, 터널 입/출구 형상 등 많은 요소에 의해 영향을 받는다. 이러한 요소들 중 본 논문에서는 시험선 터널길이에 따른 압력과 특성을 분석하고, 틸팅차량의 터널주행 성능을 국내 객실 기압변동 규정을 기반으로 분석하였다[3,4].

3.1 터널길이에 따른 압력변동

그림 3는 터널길이에 따른 실내압력변동을 나타낸 그림이며, 괄호안의 수는 터널진입 속도를 나타낸다. 일반적으로 전두부가 터널에 진입하게 되면, 터널입구 및 터널 내부벽의 벽면효과에 의해서 압력이 서서히 증가한다. 그 이후, 차량의 압력변동은 그림 3과 같이 터널길이에 따라 다르게 나타난다. 그림 3에서 터널길이가 긴 (c)안창터널(880m)이나 (d)약곡터널(1900m)의 경우 2단으로 압력강하가 발생한다. 하지만, 길이가 짧은 (a)호암터널에서는 보다 높은 속도로 진입함에도 불구하고 압력강하가 안창이나 약곡터널에 비해 약 50% 정도 나타난다. 이 현상은 그림 4를 통해 분석하면 알 수 있다. 그림 4는 안창터널을 틸팅차량이 150km/h의 속도로 주행하는 상황에 대한 수치해석 결과이다. 그림 4에서 상단 그림은 터널내부에서의 압력값을, 그리고 하단 그림은 TCAR의 방향지시판에서의 차량표면압력을 같은 시간축에 대해서 나타내었다. 먼저, 후미부 진입으로 인해 발생한 팽창과에 의해 압력강하가 발생하고, 그 뒤 출구에서 반사된 팽창과에 의해 한번 더 압력강하가 발생한다. 이로 인해, 그림 3과 같이 길이가 긴 (c)안창터널, (d)약곡터널에서는 2단으로 압력강하 현상이 나타난다. 하지만, (a)호암터널에서는 후미부 진입에 의한 팽창과가 차량에 큰 영향을 미치지 못하며, 압력강하도 상대적으로 적게 나타난다. 또한, (b)가운터널(570m)의 경우는, 입구에서 반사된 압축과와 후미부 진입에 의한 팽창과가 서로 중첩되어 객실 압력변동을 크게 완화시킨다.

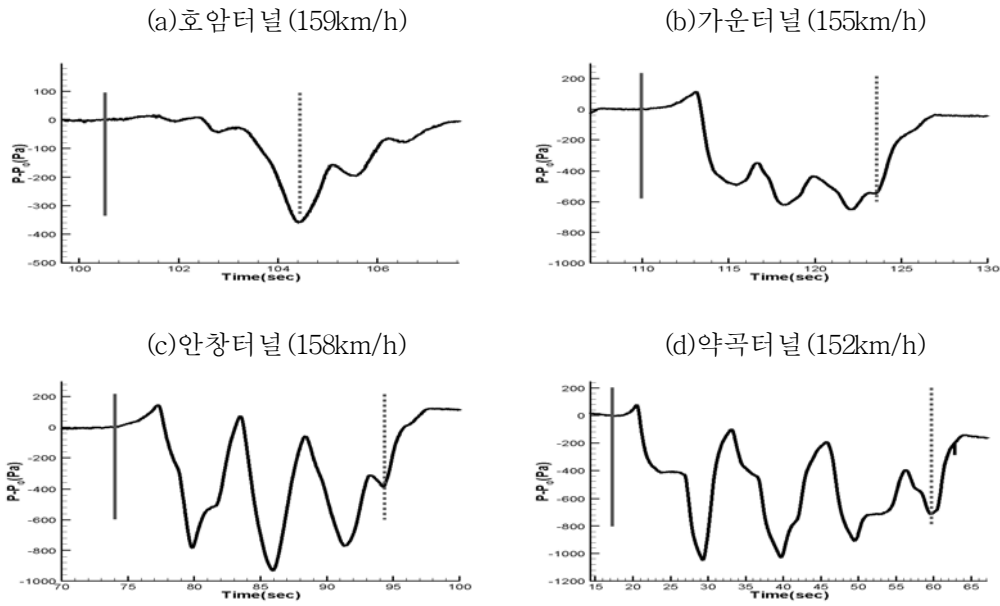


그림 5 터널길이에 따른 실내압력변동(— : 터널 진입, : 터널 진출)

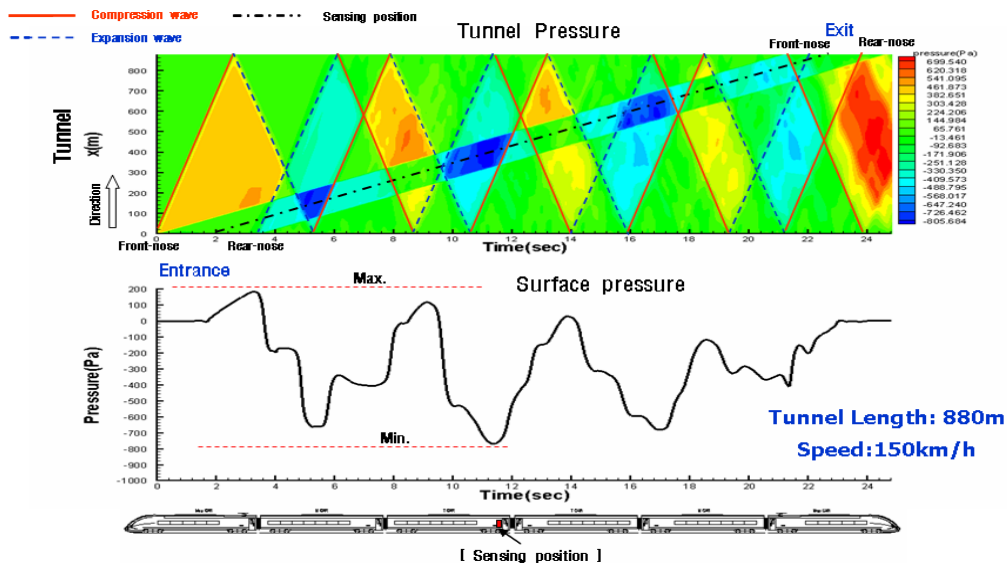


그림 6 터널주행 시 차량표면 및 터널내부 압력변화

3.3 실내 압력변화율 분석

객실 내부에서의 급격한 압력변동은 승객에게 심각한 이명감을 초래하면서 차량의 터널주행 승차감을 저하시키는데, 이러한 이명감은 압력변화율에 의해 크게 좌우된다. 따라서 이명감에 대한 평가기준은 일반적으로 표 3과 같이 압력변화율을 기반으로 한다. 경부고속철도는 역시 표 3에 나타난 것과 같이, 최고주행속도에서 일정시간: $t=1s, 3s, 10s, 60s$ 동안 최대압력변화를 각각 500Pa, 800Pa, 1000Pa, 2000Pa 이내로 규제한다. 그림 4는 틸팅차량의 시험선 터널(삼영1, 삼영2, 안창, 호암, 가운데)에 대한 실내 압력변화율을 나타냈으며, 점선은 각 시간에 따른 압력변화율 기준값을 나타낸다.

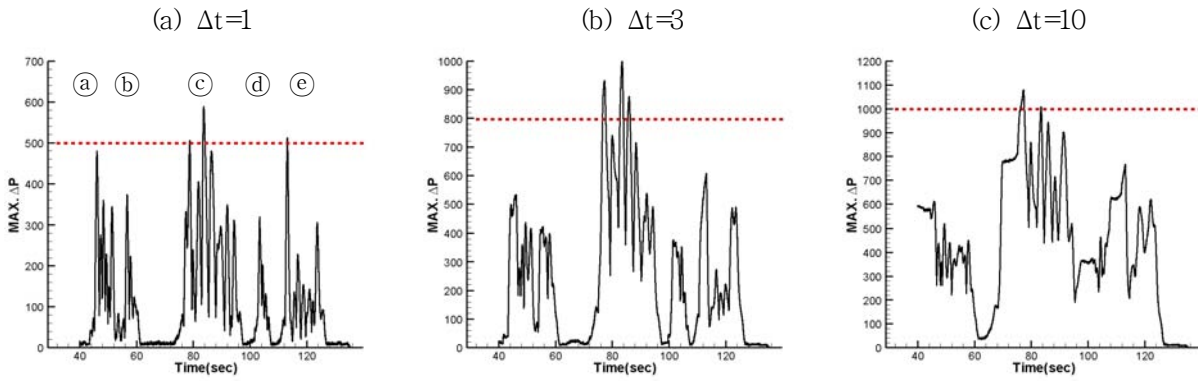


그림 7 시험선 터널주행 시 실내 압력변화율에 대한 분석

[㉑:삼영1(147km/h), ㉒:삼영2(149km/h), ㉓:안창(158km/h), ㉔:호암(159km/h), ㉕:가운(155km/h)]

그림 4에서 나타난 압력변화율은 경부고속철도의 최고속도에 비해 낮은 속도로 진입한 값이지만, 실험터널의 단면적이 경부고속철도 터널단면적(107m²)에 비해 상대적으로 작기 때문에 안창터널에서 그 규정값을 초과한다.

표 3 국내/외 터널주행 시 실내 압력변동 기준 [4]

규격 기준	특 징	실내압력변화율 기준
UIC 779-11	많은 수의 터널을 가진 도시 간 철도 서비스 - 노선 연장에서 터널이 30% 이상 - 비기밀 차량에 대한 기준이지만 본 연구에서 기밀차량에 적용하여 엄격 적용하기로 함	4초간의 시간 간격에서 2000 Pa
경부고속철도 기준	차량 출고 인도 시 시험조건 (차량기밀도 $\tau = 11$ 인 경우에 해당)	최고운행속도로 주행할 때의 객실 내 기압기준 (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: $\Delta P \leq 2000 \text{ Pa}$
일본	신간선 철도차량의 객실내 최대압력 변화율	$\frac{dP}{dt} \leq 300 \sim 400 \text{ Pa/s}$
이태리	객실 내 최대압력 변화율	500 Pa/s
프랑스 SNCF	객실 내 최대압력 변화율	400 Pa/s

4. 결론

현재 시운전중인 한국형 틸팅차량의 실내압력 기밀평가를 위하여, 호남선 시험구간에 존재하는 터널에 대한 실차 실험을 수행하였다. 각 터널 구간을 주행하면서, 객실 압력을 측정/분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열차가 터널에 진입한 후, 객실내 압력변화는 터널길이에 따라 달리 나타난다. 길이가 짧은 터널에서는 압력파(압축파/팽창파)가 차량의 미치는 영향이 상대적으로 적어서, 압력강하 역시 상대적으로 적게 나타난다. 하지만, 길이가 긴 터널에서는 압력파가(압축파/팽창파)가 차량에 중첩되어서 급격한 압력강하가 발생한다.
- (2) 가운터널과 같이 특정 길이의 터널에서는, 압축파와 팽창파 중첩되어 압력변화를 완화시킨다.
- (3) 한국형 틸팅차량이 실험터널을 진입할 때, 약 160km/h 이상의 진입속도에서는 고속철도 실내압력변화율 기준을 초과할 것으로 예상된다.

후 기

본 논문은 한국철도기술연구원의 미래철도기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 남성원(2004), "KTX차량 내외부의 압력변동 특성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제7권 제1호, pp.26-31
2. 남성원, 한기홍(2000년), "기존선 속도향상을 위한 객실내 압력변동에 관한 연구", 2000년 한국철도학회 추계학술대회, pp.521-526
3. 김동현 외(2000년), "초단면 기존 철도터널에서 통풍공 개수에 따른 터널내 풍압변동 저감효과에 대한 연구", 2000년 한국철도학회 추계학술대회, pp.382-389
4. 김동현 외(2001년), "G7 고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드개발", G7 선로구축물 시스템엔지니어링 기술개발 하위단위과제 보고서
5. Masanobu IIDA(2001), "Pressure Waves Radiated Directly from Tunnel Portals at Train Entry or Exit". QR of RTRI, Vol.42, No. 2, May. 2001