

기존선 터널 주행시의 고속열차 차체가 받는 압력변동 계측 및 분석 (Measurement and analysis of Pressure fluctuation by high speed train passing through tunnels in conventional line)

이억재* 박춘수* 서승일*
Lee, Uk-Jae Park, Choon-Soo Seo, Sung-II

ABSTRACT

Pressure waves are generated when high speed train runs through the tunnels. These pressure waves not only affect passenger's health, but also can cause fatigue failures on the vehicle structure. The current high speed train should run on the conventional lines. In this study, pressure fluctuations by the high speed trains such as G7 Korea High Speed Train and Korea Train eXpress are measured in the cabin and the carbody surface when they pass through the tunnels. The measured results are analyzed and the related parameters are investigated

1. 서 론

철도가 다른 운송수단과 경쟁할 수 있는 것은 고속성이다. 고속성을 높이고 직진성 유지를 위해 새로 건설된 선로는 기존선로보다 터널과 교량구간이 많다. 따라서 고속열차는 터널을 주행하는 경우가 증가하는데 고속열차가 터널을 주행하면 터널내부에서 압력변동이 발생하고, 발생한 압력 변동은 열차의 피로 하중으로 작용한다. 또한 이 압력변동은 승객의 안락감에 영향을 미치고, 열차가 고속으로 주행하면 압력변동은 상대적으로 크게 발생한다. 그런데 현재 고속열차의 운행구간을 보면 아직까지 기존선을 이용하는 구간이 있다. 비록 고속선에 비해 속도는 낮지만 상대적으로 터널의 단면적이 작아졌으므로 터널을 주행시 발생하는 압력변동이 심하게 발생할 것이다.

본 논문에서는 G7 한국형 고속전철 및 KTX(Korea Train eXpress)가 기존선 터널을 주행할 때 진입속도, 터널길이 등에 따라 차량이 받는 실내외 압력변동의 특성변화를 계측하였으며, 이를 분석하였다.

2. 차량의 터널 통과시 압력파형

2.1 터널 통과시 압력 변화의 특성

열차가 터널을 통과하는 경우는 열차가 단독으로 주행하는 경우와 반대편에서 주행하는 열차와 터널내에서 교행하는 경우로 나눌 수 있다. 먼저 단독으로 터널을 주행할 때를 살펴보면, 열차는 진입할 때 발생한 압축파의 전파로 인한 압력변동을 받게 된다. 이는 열차의 반복하중으로 작용된다. 열차 전두부가 터널내에 진입할 때는 열차 전두부에서 압력 상승과 압축파(entry compression wave)가 생성된다. 이 압축파는 열차의 속도보다 빠른 음속으로 터널내에 전파되고, 터널의 끝에

* : 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단, 정회원

도착하면 일부는 충격파(impulsive wave)로 터널 출구 주변으로 방사되고 나머지는 팽창파(expansion wave)로 반사되어 터널 입구로 전파된다. 터널 출구에서 반사되어 입구에 도착한 팽창파는 다시 반사되어 압축파로 전파되는 과정을 반복한다. 그리고 열차의 후미부가 터널에 진입하면 팽창파가 발생하여 터널 출구 방향으로 전파되며, 이러한 현상은 열차의 전두부가 터널에 진입하면서 발생하는 압력파와 동일한 거동을 보인다. 결국 열차가 받는 것은 전두부와 후미부에서 각각 발생한 압력파의 합으로 받게 된다. 여기서 터널 출구에서 주변으로 방사되는 충격파를 미기압파(micro-pressure wave or tunnel sonic boom)라고 부르며, 터널주변의 민가 등에 압력에 의한 영향과 폭발적인 소음으로 인한 피해를 주게 된다. 그림 1은 열차가 터널을 진입했을 때 발생하는 압력파의 진행방향과 파의 형태를 나타낸 것이며, G7 한국형 고속전철이 고등터널을 290km/h로 주행할 때의 압력파형이다.

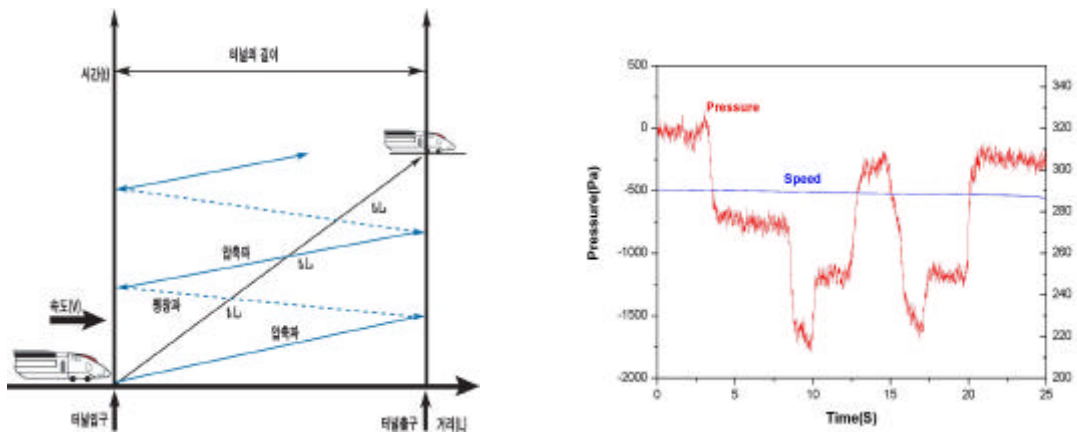


그림 1. 터널 주행시 발생하는 압력파의 형태와 압력파형
(전두부에 의한 압력파, 고등터널)

또한 열차가 터널 진입시에는 압력상승이 발생한다. 압력상승은 열차의 전두부 형상, 터널의 단면적, 열차의 진입속도 등 여러 가지 요인으로 인해서 발생한다. 열차가 터널 돌입시에는 압력이 급하게 높아지지만 후미차 돌입시에 발생한 팽창파 전파에 따라 압력의 상승은 멈추고 팽창파의 영향으로 압력이 낮아진다. 그림1에서 보면 터널 진입후 압력의 상승이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 열차가 터널에서 교행이 발생한 경우에는 다음과 같은 압력들이 발생하게 되는데, 첫 번째로는 단독으로 터널을 통과하는 경우에 받는 압력변동(ΔP_1), 여기에 덧붙여서 대향차의 압축파, 팽창파에 의한 압력변동(ΔP_2), 그리고 열차가 마주오는 열차와 맞스쳐가는 순간의 압력변동(ΔP_3) 등이 존재한다. 따라서 터널 주행 시 압력변동(차압범위) ΔP 는 이것이 겹쳤을 때 최대를 생각하면 된다.

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (1)$$

3. 압력계측시스템의 구성

3.1 계측시스템의 구성 및 계측 위치

기존선 구간을 주행하는 열차가 터널에서 받게되는 압력파를 계측하기 위해 한국형 고속전철과 KTX에 압력계를 설치하였다. 주행시에 받는 압력을 열차 내·외부에서 계측하였다.

먼저 한국형고속전철에서 압력 계측을 위한 계측시스템의 구성을 간략하게 살펴보면 객차(TT3) 좌우 차체 표면과 객실내 및 동력차의 하부 대차부위 등에 압력계를 설치하고 객차(TT3) 내부에

설치된 계측시스템에 연결하여 열차의 속도, 운행거리 등과 함께 계측된 압력이 저장되도록 하였다. 이를 그림으로 살펴보면 다음과 같다.

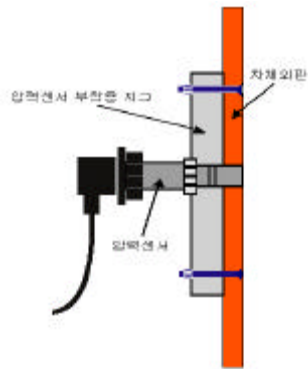
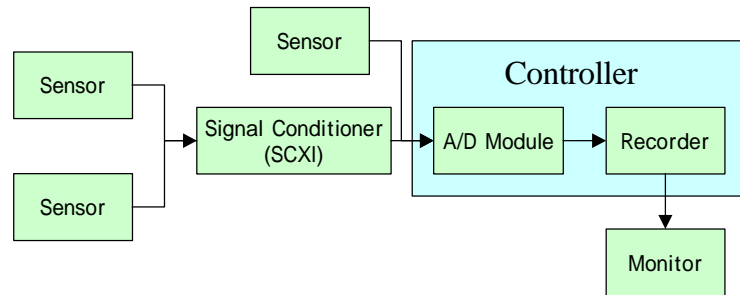


그림 2. 계측시스템의 구성도 및 열차 외판에 부착된 압력계 모습

계측을 위한 H/W 및 S/W는 National Instrument 사의 SCXI, PXI Module과 LabVIEW 6i를 사용하였으며, 계측된 Data는 LabView 6i로 프로그램된 후처리 프로그램에서 시간축으로 속도, 거리 등과 동시에 분석할 수 있도록 하였다. KTX의 경우에는 압력계의 위치는 실외의 경우에는 18번 객차 하부에 부착하였고, 실내의 경우에는 18번 객차의 중간에 약 1.2m 높이에 설치하였다. 계측방법은 G7 한국형 고속전철과 같은 방법으로 계측하였다.

4. 계측 결과

4.1 압력변동값

고속열차가 기존선 구간을 운행하였을 경우 주행속도는 최고 160km/h이다. 터널의 단면적은 신선의 경우에는 $107 m^2$ 이고, 기존선의 경우에는 복선인 경우 $57 m^2$ 인 터널이 주를 이룬다. 같은 속도로 고속선 터널과 기존선 터널을 진입했을 때 기존선 터널의 압력변동이 컸는데 이는 압력변동값은 열차와 터널의 단면적의 비에 비례한다는 이론과 일치하였다.

열차가 일정한 속도로 터널을 진입하면 열차는 여러 번의 압축파와 팽창파를 받게된다. 열차의 속도가 낮아지게 되면 열차가 받는 압력파의 횟수는 늘어나게 된다. 기존선 터널은 터널의 길이에 비해서 진입속도가 낮으므로 고속선 터널에서보다 더 많은 횟수의 압력파와 팽창파를 받는다. 그림 3을 보면 KTX보다 G7의 압력변동값이 약간 큰 것을 알 수 있다. 그리고 원형부분은 성현터널의 압력변동을 나타낸다. 성현터널은 단선 터널이므로 같은 속도에 비해서 압력변동값이 큰 것을 알 수 있다. 그림4은 기존선 터널을 주행했을 경우의 압력파형을 나타낸다. 성현터널을 보면 열차가 터널을 진입하면서 순간적으로 압력상승이 발생하였는데 이는 성현터널이 단선이어서 단면적이 극단적으로 낮아져서 다른 터널에서 상승하는 압력변동값보다 훨씬 크다. 도표1은 기존선 구간을 운행하였을 때 한국형고속전철과 KTX의 압력변동값을 계측한 것이다.

도표1. 기존선구간의 터널 주행시 압력변동값

운행 구간	터널명	터널 길이	한국형고속전철				KTX			
			하행		상행		하행		상행	
			진입 속도	압력 변동	진입 속도	압력 변동	진입 속도	압력 변동	진입 속도	압력 변동
동대구-부산	갈마터널	940	149.8	792.3	126.6	795.42	116.5	946.3	124.5	668.1
	성현터널	2530	117.4	1829.2	112.5	1762.18	121.5	1954.5	108.7	1677.5
	신거터널	1436	145.6	1637.0	157.6	1407.69	131.1	793.2	146.1	907.4
	옥산터널	703	149.8	1210.7	158.4	1427.01	148.3	721.9	142.6	733.2
	밀양터널	1001	133.0	1082.8	138.1	1209.12	102.3	1037.1	137.7	959.5
	검세터널	60	128.2	194.1	133.2	374.17	117.3	530.7	142.9	715.0
	작원터널	530	129.7	1364.1	144.9	1214.05	135.2	972.2	123.2	861.4
서대전-광주	물금터널	656	122.6	861.9	136.0	1043.64	114.2	672.2	102.5	611.6
	노령1터널	590	132.2	565.0	129.4	561.11	129.8	574.3	128.6	544.1
	노령2터널	2300	133.4	1156.0	132.3	1211.39	128.8	1042.1	115.2	770.7
	신월터널	180	139.2	489.5	148.5	516	144.9	352.6	153.4	557.5
	안평터널	980	160.5	1270.8	150.8	1086.11	157.2	518.1	153.7	467.5
	장수터널	220	156.1	848.6	143.9	723.42	157.1	1190.9	155.8	1064.0

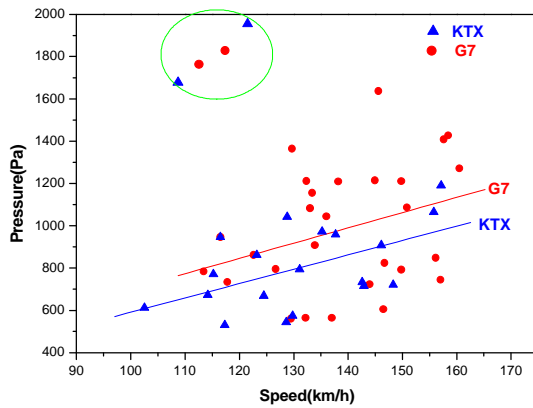
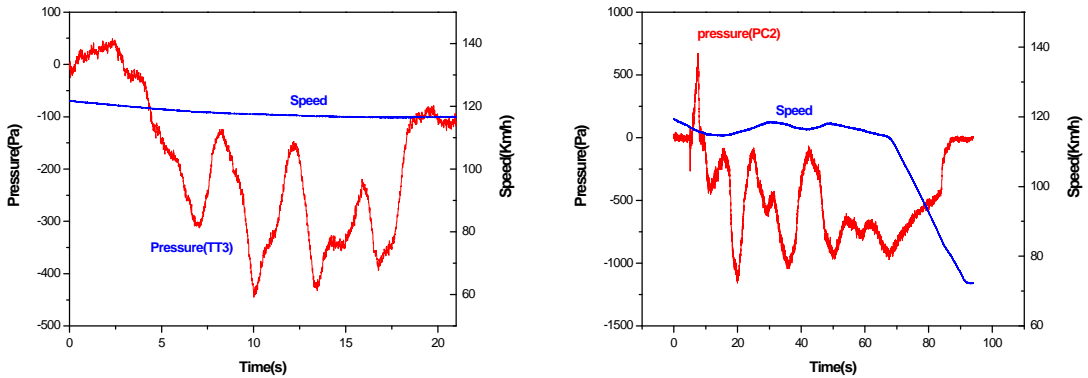


그림 3. 기존선구간의 터널 주행시 압력변동 분포도



(a) 노령터널

(b) 성현터널

그림4. 터널 통과시의 차체에 작용하는 압력파형

4.2 압력변동률

4.2.1 압력 변동에 대한 국제 규격

- 영국 BR 기준

차량-구간 형태	압력변동 허용기준		7단계 평점
	극단적인 경우	통상적인 경우	
A. 기존 비기밀차량 터널구간 10% 이하	4.0kPa/4s	2.5kPa/4s	4.5
B. 기존 비기밀 차량 터널구간 25% 이상	3.0kPa/4s	2.0kPa/4s	3.5
C. 신형 기밀차량 터널구간 25% 이상	1.25kPa/4s	0.8kPa/4s	2.5
D. 신형 기밀차량 터널구간 50% 이상	1.0kPa/4s	0.7kPa/4s	2.0

- 일본 규격 (RTRI)

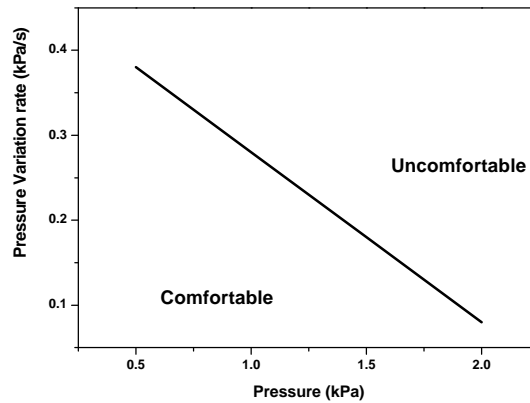


그림5. 객실내 압력변동에 대한 일본 규격

- UIC 779-11

- Pressure comfort criteria : 국제적으로 통용되는 기준은 없으며, 다음의 각국 별 사용 기준을 추천함
- 일본 신간선 : 200 Pa/s, 최근에는 300~400 Pa/s 로 완화함
- 미국 지하철 : 700 Pa within 1.7 sec (80~100km/h, 비기밀차량)
- 독일(DB) : 500 Pa within 1 sec, 800 Pa within 3 sec,
1000 Pa within 10 sec (단독주행시, 240, 280km/h)

- 한국 규격(KTX, G7)

KTX의 경우, 프랑스의 TGV를 도입하면서 SNCF에서 제안하는 기준값인 차량 객실 내부의 압력변화와 내부 압력변화에 대하여 각각 $|\Delta P| \leq 2.0 \text{ kPa}$ 과 $dp/dt \leq 200 \text{ pa/s}$ 를 기준으로 평가하고 있다. G7의 경우도 같은 기준을 적용한다.

4.2.2 압력변동률

기준선에서 터널을 통과할 때는 차량 외부의 압력변동과 객실내 압력 변동이 동일하게 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 기준선 터널 통과시에는 ATC 시스템이 가동되지 않으므로 통풍구를

달지 못하여 기밀을 유지하지 못하기 때문이다. 따라서 단위시간당 압력변동률이 기준을 초과하고 있다. 그림6에서 보는 것처럼 KTX의 기준값 200pa/s를 초과하는 터널들이 있다. G7 한국형 고속전철도 여압시스템을 가동하지 않아 압력변동률이 기준을 초과하는 터널이 있다.

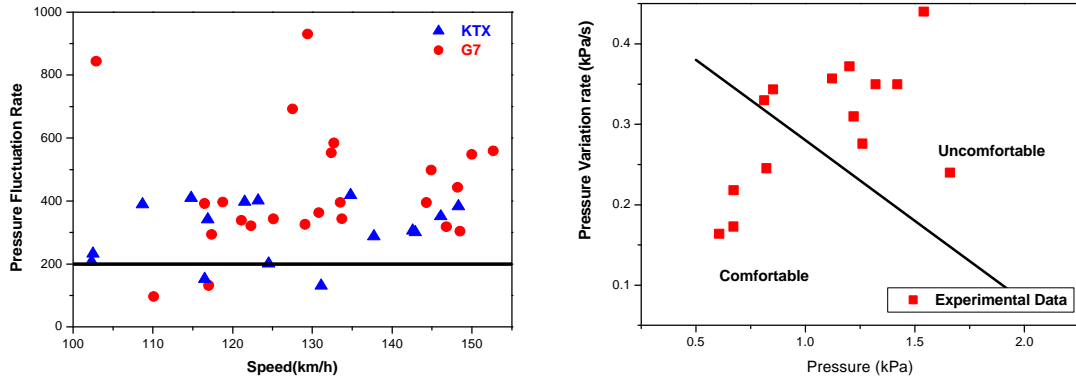


그림6. 압력변동률 및 일본규격 시험 결과

5. 결 론

고속열차가 기존선 구간을 운행하였을 때 압력변동은 기존선 터널의 단면적이 고속선에 비해 작기 때문에 저속임에도 상당히 큰 압력변동을 보였다.

승객의 안락함을 기준으로 한 압력변동률을 보면, 기밀유지 여부에 따라 기준을 초과하는 경우가 발생하여 승객에 불쾌감을 초래할 수 있을 것으로 예측되며, 이에 대해서는 향후 지속적인 연구가 필요 할 것이다.

참고문헌

1. “G7 고속전철 기반기술개발(00-II-1-1)” (2002) 연차보고서, 한국기계연구원
2. Kanta Nihei Ono, Shigeki Koe and Fumihide Inamura (1998). "Fatigue Strength Assensment Method for Shinkansen Aluminum Car Body Structures" Kawasaki Engineering Review, Vol.138,
3. 이태형, 박춘수, 신중린(2003), “한국형 고속전철 열차성능해석 프로그램”, 한국철도학회논문집, 제6권 제2호.
4. 남성원, (2004), “KTX차량 내외부의 압력변동 특성에 관한 연구” 한국철도학회 논문집 제7권, pp26-31
5. “고속철도시스템 신뢰성 및 운영 효율화 기술개발” 연차보고서(2003), 한국철도기술연구원.