

철도터널내 압력변동 및 터널 미기압파 저감 시험장치개발에 관한 연구

김 동 현*, 오 일 근*

Development of a new test facility for the study of pressure transients in tunnel and micro-pressure waves radiated from the tunnel exit on the railroad

Dong-Hyeon Kim and Il-Geun Oh

Key Words: train-tunnel interface(열차-터널 인터페이스), moving model rig(주행 모형 시험기),
pressure fluctuation(압력변동), micro-pressure wave(미기압파)

Abstract

The test facility of the 1/60-scale models for the train-tunnel interactions was recently developed to investigate the effects of entry portal shapes, hood shapes and air-shafts for reducing the micro-pressure waves radiating to the surroundings of the tunnel exits by KRRI in Korea. The launching system of train model was chosen as air-gun type. In present test rig, after train model is launched, the blast wave by the driver did not enter to inside of the tunnel model. The train model is guided on the one-wire system from air-gun driver to the brake parts of test facility end. Some cases of the experiments were compared with numerical simulations to prove the test facility.

1. 서 론

고속철도는 가능한한 직선궤도로 만들어지며 고속운행을 위해 곡선반경이 매우 크다. 따라서 산악이 많은 지형을 가진 한국, 일본 등에서는 고속철도의 대부분이 터널과 교량으로 이루어지게 된다. 현재 건설되고 있는 경부고속철도만 하더라도 전 노선의 약 46%가 터널로 구성된다. 고속으로 열차가 터널 진입시에 압축파는 터널출구 방향으로 생성되며 이 압축파가 터널출구 끝단에서 다시 반사하여 열차쪽으로 팽창파로 돌아온다. 터널내부는 이러한 압축파와 팽창파의 지속적인 교란으로 심한 압력변동을 겪게 된다. 또한 열차의 터널 진입시 생성된 압축파는 대부분은 팽창파로 터널 입구 쪽으로 되돌아가지만 일부는 터널 출구 바깥의 대기중으로 미기압파(micro-pressure wave)로 방출하여 환경소음(sonic

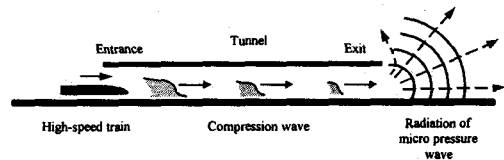


Fig. 1 The generation process of micro pressure wave at tunnel.

boom)과 저주파 진동을 야기한다(Fig.1 참조). 터널내부 공기압 변동의 진폭은 진입하는 열차속도의 제곱에 비례하기 때문에, 터널에서 300 km/h 급의 고속운행에는 많은 제약이 따른다. 첫째 문제가 터널내의 급격한 압력변동에 의해 승객들이 객실에서 느끼는 이명감(耳鳴感)현상이다. 이명감은 여객기 이륙시에 승객이 느끼는 귀의 통증과 같은 현상이다. 둘째는 터널출구 주변 민가의 환경소음과 창문과 문틀을 흔드는 저주파 진동현상이다. 셋째는 열차 주행저항이 1.5배 이상 증가하여 동력계통 사양설계와 동력손실이 크게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 차량측 대책으

* 한국철도기술연구원 차량연구본부

로 차체기밀 향상과 강제여압시스템 적용, 차량 전두부와 차량단면적 최소화 방법이 있다. 시설 쪽 대책으로는 터널 내공단면적을 크게 하거나 통풍공(air-shaft) 또는 완충공(hood)으로 터널내부의 압력변동량이나 시간에 대한 압력구배를 낮추는 대책이 있다. 터널 건설비용은 터널 굴착시에 나오는 암반과 흙의 양과 비례하기 때문에 작은 터널 대단면을 가질수록 건설비용 저감은 대단하다. 따라서 터널 내공단면적을 작게하고 이에 따른 미기압과 영향을 완충공(hood) 또는 통풍공(air-shaft)을 설치하는 저비용 대책이 바람직하다⁽¹⁾. 본 기술개발에서는 터널 내공단면적 최적화, 완충공 또는 통풍공 공력설계/개발, 차량 전두부 및 단면적 최적화 등의 사양설계를 할 수 있는 한국형 중형(1/60축척) 터널주행 열차모형 시험기를 순수 국내기술로 개발하였다. 본 시험기에서 열차속도 257 km/h ~ 363 km/h의 범위로 측정된 터널내부 압력변화량은 특성곡선 방정식해법의 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 매우 잘 일치하였다. 또한 터널출구에서 방사되는 미기압파를 정확히 측정할 수 있었다. 터널내의 공기압 변동 및 터널출구 미기압과 저감의 각종 대책을 개발할 수 있는 본 시험기(moving model rig)의 역량은 일본의 신칸선 개량과 자기부상열차 시험선로인 야마나시 시험선에 설치된 완충공 및 터널에서 현차시험과 93%이상의 정확성을 보여주고 있다⁽²⁾.

2. 터널주행 열차모형 시험기 개발

2.1 시험장치의 구성요건

시험장치에서 파간섭 양상(wave diagram)과 이

Table 1 Main characteristics of moving model rig in KRRI

Method	Axis symmetric, one wire guidance
Scale	1:60
Launching mechanism	Air-gun type
Train speed	~ 600 km/h
Train model	Car body: paper tube, Nose: MC material
Tunnel model	Polyvinyl chloride (PVC)
Total length of test rig	about 30 m

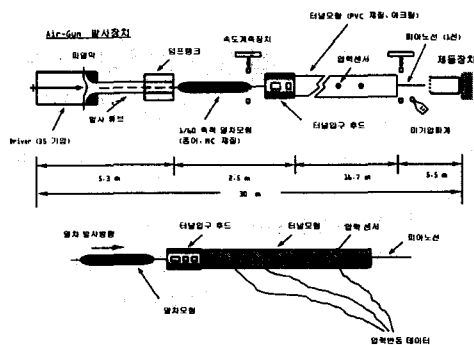


Fig. 2 The schematic of moving model rig.

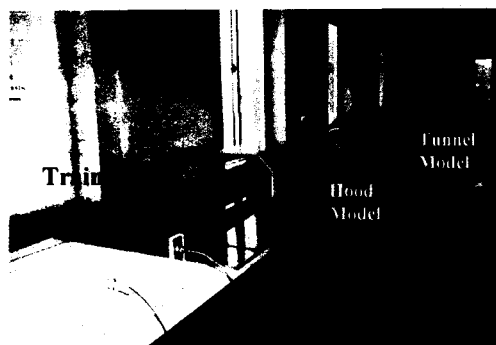


Fig. 3 Train entry in test facility.

패턴을 따라 주행하는 열차의 위치는 실척 상황에서 감소된 시간과 길이축척에 따라 맞추어야 한다. 이것은 다음의 조건이 만족될 때의 경우이다: 첫째, 음속 a 에 열차속도 V 의 비율만족, 즉 Mach 수 $M = Va$ 가 축척실험에서도 실제와 같아야 한다. 둘째, 터널길이 대 열차길이 비율이 같아야 하고, 압력파의 강도를 재현하기 위해서는 3번째 조건이 필요하다 즉, 유효차단율(blockage ratio) $B = A_{train}/A_{tunnel}$ 이 같아야 한다. 여기서 A_{train} 은 열차의 유효단면적이고 A_{tunnel} 은 터널의 내공단면적을 나타낸다. 시험이 Mach 수에 맞추어야 하기 때문에 축척모델의 열차속도가 축척에 지배받지 않고 실척 값으로 취해져야 하는 것이 흥미롭다. 본 연구에서는 열차모델을 1/60축척의 축척에 해당되는 지름 58 mm의 크기로 선택하였다.

다른 한편, 축척이 감소하면 마찰력이 달라지기 때문에 Reynolds 수 영향은 무시할 수 없다. Reynolds 수의 직접적인 영향은 터널에서 전파하는 압력파를 감소시킨다. 이 Reynolds 영향은 실

척터널의 더 높은 표면거칠기와 터널축척모델에 대한 매끄러운 벽면 사용에 의해서 부분적으로 보상된다. 이러한 근거는 Matsuo 등⁽³⁾에 의한 연구로부터 나타난다. Matsuo 등의 연구에 따르면 실척인 경우 마찰력 감쇠가 5 %인 것과 비교하여 모델 축척에서의 감쇠는 10 %보다 적었고, 압력경감 측정에서 실척 예측에 대하여 받아들일 수 있는 것으로 고려되었다.

열차모델은 판토품라프가 없으며 단순한 실린더 형상과 타원형에 가까운 전두부와 후드부를 갖는다.

상기에 기술한 내용을 기본으로 시험기 및 열차모델은 Table 1과 Fig. 2와 같은 제원으로 설계하였다. 성능 요구조건으로 열차모델 속도는 기존철도 차량, 고속전철과 앞으로 초고속 자기부상열차, 탄환열차에 적용이 가능하도록 600 km/h(167 m/s)의 범위까지 시험되도록 설계하였다.

Fig. 3은 시험기의 열차모델, 터널입구 완충공(hood)과 터널의 시험모델을 나타내는 사진으로서, 터널부는 Fig. 4와 같이 아치형으로 경부고속철도 터널 내공단면적 107 m²에 해당된다. 터널에 대한 K-TGV 고속열차의 유효차단비(blockage ratio)는 8.88%이다. 열차모델은 1/60축척에서 본 연구에서 1 m 이내의 크기를 사용하는데 이는 주로 터널 완충공 및 통풍공 후드 개발에 적용할 때 터널입구 진입시의 압력구배로 공력설계 되기 때문이다. 시험장치에서 터널모델 입구와 출구 앞에 1.5 m 길이의 지면판을 두었다. 터널내부의 압력변동은 Fig. 5에서와 같이 Endeveco 압력센서 8510B-1로 7 위치에서 연속적으로 기록하였다. 터널출구 미기압파 측정은 Rion의 철도전용 초저주파 음압레벨계 XN-12A(0.2 ~ 1kHz 초저주파 대역 감도특성 일정)를 사용하였다. 터널 축에 대해 45°. 각도에서 지면판 위에 20 mm 높이와 출구 중심으로부터 333 mm에 위치시켰다. 마이크로폰 헤드는 미기압파의 방사방향과 마주보게 위치시켰다(Fig. 5 참조).

2.2 열차모델의 주행추증성

발사튜브(launch tube) 지름은 60.5 mm이고 열차모델은 약간 더 작은 58 mm로 축대칭 형상을 사용하였다. 열차모델 길이에 변화를 주었을 때 모델질량에 제한을 주기 위해서 고강도 지관

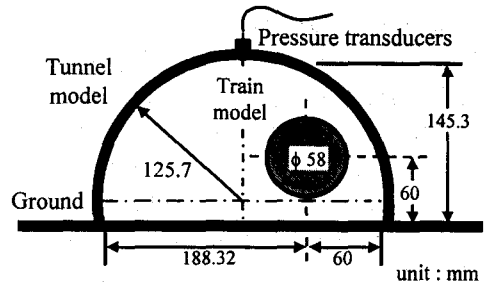


Fig. 4 Train-tunnel configuration for double track.

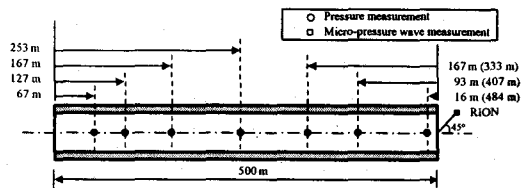


Fig. 5 The measurement positions in experiment.

(paper tube)을 사용하였다. 전두부와 후미부는 MC 재질로 제작하였으며 제동장치의 충격에서 견디면서 두께를 최소화되게 하였다. 열차모델의 전두부는 K-TGV 차량모델의 제원에 맞추어 축대칭 단면으로 전환하였다. 열차모델이 터널벽면에 부딪히거나 다른방향으로 진행하지 못하도록 하기 위해서 1개의 평행한 강선을 발사튜브 시작단에서 제동장치 끝 뒤까지 연장하여 설치하였다. 이 때 강선의 팽창은 강선의 항복점 부근까지 도달되도록 최대로 하였다. 열차모델의 중심에 지름 2.5 mm 구멍을 부싱 처리하여 열차모델이 강선을 따라 낮은 마찰력으로 추종할 수 있게 하였다.

2.3 시험장치의 원리와 주행 추증성

열차모델의 추진시스템은 다양한 방법으로 적용할 수 있다. 문헌으로부터 알려진 방법은 새총(catapult)방식⁽⁴⁾, 건 파우더 방식⁽⁵⁾, 유압발사(공기총)⁽⁶⁾ 방식, 차륜회전력방식⁽⁷⁾ 등이다. 새총방식은 55 m/s 속도까지 얻을 수 있다. 300 km/h이상의 속도는 건 파우더나 유압추진으로 160 m/s 속도로 달성할 수 있다. 본 연구의 설계속도는 적어도 111 m/s이고 새총방식은 적당하지 않았다.

건 파우드 추진은 매우 큰 가속도를 갖고 다양한 시험조건(열차무게와 발사속도)에서 유압추진보다 조정이 매우 어렵다. 또한 부가적인 안전 문제도 고려해야한다. 따라서 본 연구의 시험장치는 유압발사시스템(공기총방식)으로 결정하였으며, Fig. 2와 같이 시험장치 구성은 열차모델, 유압 발사기, 터널모델, 제동장치로 이루어진다. 유압 발사기는 공기총(air-gun)과 같이 작동된다. 공기압 실린더(driver)의 마이러 막(Mylar membrane)이 파열된 후에 가압된 공기는 발사 튜브에 있는 축대칭 열차모델을 가속시킨다.

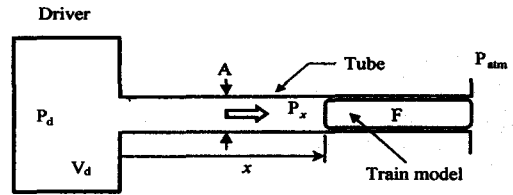


Fig. 6 The Phnumatic launching device

2.4 발사튜브 출구의 공기제트영향

열차모델이 발사튜브 내부에서 가속하는 동안에 열차 앞쪽에 공기가 압축되고 공기제트는 발사튜브의 개구부로부터 분출된다. 이 제트류는 터널모델 내부의 압력에 영향을 미칠 것이다. 열차의 후두부가 발사튜브를 벗어날 때 튜브내의 잔여배압이 대기압보다 더 크면 블라스트 파(blast wave)는 생성된다. 이 블라스트 파는 구형의 충격파로 전파하여 시험터널 입구를 강타할 것이다. 따라서 시험터널 내부압력에 영향을 미칠 것이다. 이 블라스트 파는 고속의 제트류이다. 배압으로 생기는 제트류는 대기압 이하로 잔여배압을 줄임으로서 완전히 제거하였다.

2.5 유압 추진시스템 설계해석

열차시험 요구조건에 따라 적어도 400 km/h의 발사속도가 도달되어야 한다. 앞 절에서 언급하였듯이 발사튜브의 지름은 60.5 mm이고 압력용기(driver)는 1.5 liter, 발사튜브를 4.3 m로 했을 때 열차무게와 길이를 결정하기 위하여 다음의 설계계산을 수행하였다. 발사튜브에서 열차모델의 발사시 잔여배압은 0.8기압 이하이어야 한다. 이 조건을 충족해야 열차 후두부가 발사튜브를 벗어날 때 발사튜브 출구에서 공기제트가 발사되지 않는다. 열차 뒤의 배압은 단열과정으로 변화하고 열차 앞쪽의 압력은 대기압으로 유지된다면 또한 벽면마찰을 무시하면 가속도 a 는 발사튜브에서 열차모델 후두부 끝의 위치 x 에서 다음과 같이 표현된다(Fig. 6 참조).

$$a = v \frac{dv}{dx}$$

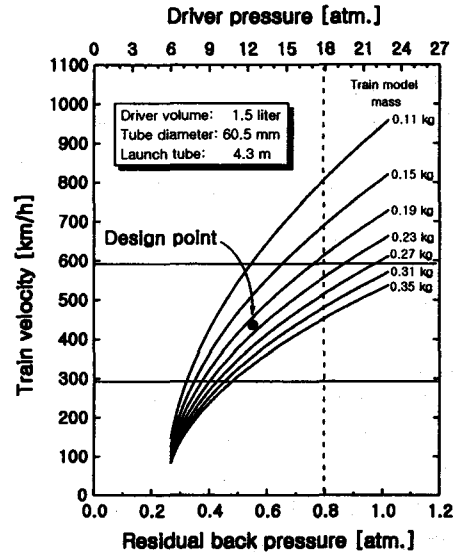


Fig. 7 The performance analysis to design the test rig.

$$= \frac{P_d A}{m} \left[\left(\frac{V_d}{V_d + Ax} \right)^\gamma + \frac{P_{atm}}{P_d} \right] \quad (1)$$

여기서, P_d 는 압력용기(driver)의 압력이고 P_{atm} 는 대기압 [N/m^2], V_d 는 압력용기 부피 [m^3], A 는 발사튜브의 단면적 [m^2], m 은 열차모델의 질량[kg], 상첨자 γ 는 공기의 경우 1.4이다.

$$F = P_d A \left[\left(\frac{V_d}{V_d + Ax} \right)^\gamma + \frac{P_{atm}}{P_d} \right] \quad (2)$$

식 (1)의 수치적분은 튜브의 어느 위치 길이에서

식 (2)의 큰 괄호안의 값이 $(0.8-1)\frac{P_{atm}}{P_d}$ 을 만족하면 수치적분을 종료하도록 하였다. 본 계산에서 수치적분은 Simpson's Rule을 적용하였다.

Fig. 7에서와 같은 성능예측 결과는 열차모델의 무게를 0.19 kg ~ 0.35 kg을 사용하기로 하였으며, 이 때 압력용기의 압력조정에 따라 배압이 0.8 기압 이하에서 70 km/h에서 600 km/h까지 발사속도조정이 가능하였다.

2.6 발사튜브 출구의 공기제트영향

열차모델은 터널을 통과한 후에 스폰지의 두개의 층으로된 제동관에서 마찰력으로 감속된다. 약 2 m의 제동관 길이는 열차모델을 완전히 정지시키는데 충분한 거리이다. 제동관에서 제동시에 필요한 감속도, a_d 는 다음과 같다.

$$v_2 - v_1 = 2 a_d S \quad (3)$$

식 (3)에서 감속거리 2 m로 했을 때 600 km/h의 속도로 발사된다면 711g의 감속도가 필요하다. 여기서 중력가속도 $g = 9.81$ 이다.



Fig. 9 The measurement of micro pressure waves

2.7 시험 데이터 취득시스템 개발

데이터 취득시스템 구성은 Fig. 8에 나타내었다. 터널입구 전방에 있는 포토센서에 열차 전두부의 도달로부터 모든 센서의 측정이 시작되며 또한 동시에 열차속도를 측정한다. 포토센서는 터널 앞과 뒤의 1.2 m에 각각 위치시켰다. 터널 입출구 전후의 대기온도는 K형 열전대로 각각 측정하였고, 터널내부의 압력변동은 Endevco 압력센서 모델 8510B-1로 일곱 위치에서 연속적으로 기록하였다(Fig. 5 참조). 압력센서 8510B-1은 6.9 kPa의 동압력범위와 55 kHz의 공진주파수를

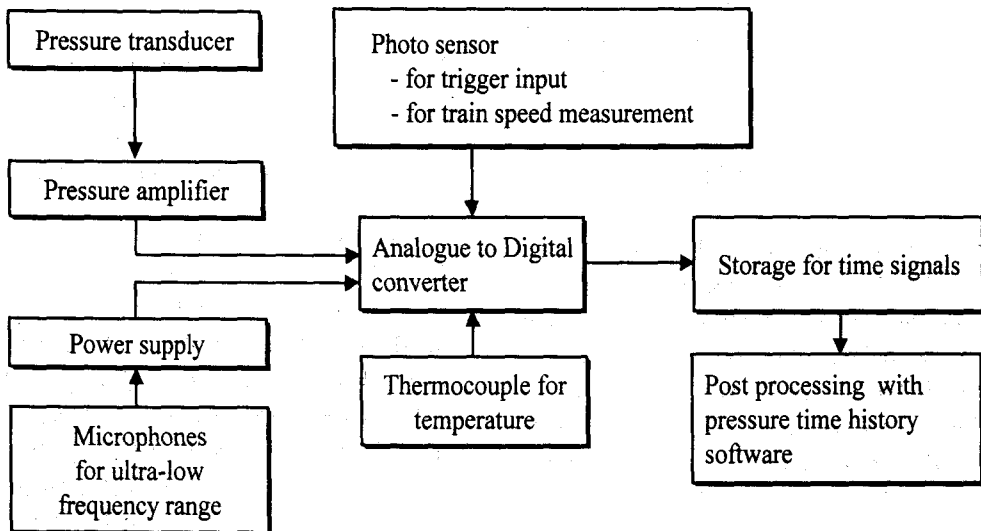


Fig. 8 The data acquisition system of present test rig

값는다. 미기압과 측정을 위하여 Rion의 철도전용 초저주파 음압레벨계 XN-12A를 사용하였다 (Fig. 9 참조). 최대범위는 2 kPa이다. 신호는 200 kHz의 데이터 취득을 갖는 DC Dynamic strain Amplifier(MINEBEA 모델 NMB DAS-406B)에서 증폭한 후 low pass filtering을 하였고, analogue 신호를 digital 신호로 전환하는 NI의 High-speed A/D Converter 모델 PCI-MIO-16E-1와 데이터 취득 소프트웨어 LabVIEW는 HP Vectra VE기종 컴퓨터에 장착하여 데이터를 취득하였다. 모든 시험에 대해서 16개의 측정채널을 사용했다. 16 채널에서 채널당 최대이용 sampling frequency는 100 kHz를 선택했다. 압력센서와 마이크로폰에 대한 low pass (anti-aliasing) filter setting은 최대 주파수 범위의 80 %에서 -3 dB을 취했다.

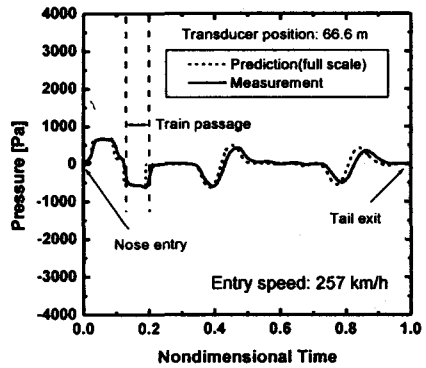
2.8 시험 측정오차의 재연성

압력측정오차는 약 35 Pa이다. 열차속도는 0.1 m/s 이내에서 편차를 갖는다. 8.34 m 길이 터널 모델에서 열차가 터널입구에서 출구까지 도달할 동안 열차속도는 약 2 % 감소된다. 이 속도감소는 주로 강선의 마찰에 기인된다. 터널 제원이 달라질 때나 압력변화 측정과 비교하기 위해서, 측정 데이터는 같은 기준에서 즉, 열차속도로 비교되어야만 한다. 보통 3번 정도의 발사에서 1% 내외의 열차모델 목표속도를 얻는데 충분하다. 이 속도차이는 목표 값으로부터 2 %의 압력 편차를 보인다.

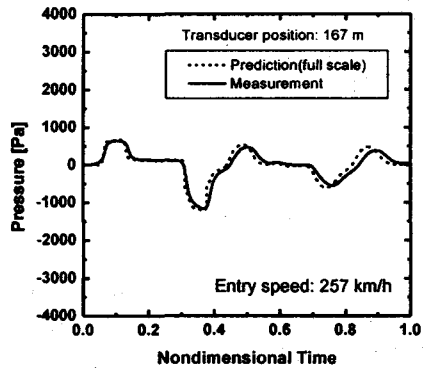
3. 시험 결과

본 연구에서 개발한 한국형 터널주행 열차모형 시험기의 성능을 검증하기 위하여 몇 가지 시험 결과를 도출하였다. 본 시험에서 사용한 유효차단비(blockage ratio)는 8.88 %로서 경부고속철도의 터널과 K-TGV 열차의 비와 같다. 터널출구에서 생성되는 미기압과는 열차가 터널 진입시의 초기 공기압 구배에 비례한다는 것은 잘 알려져 있다. 본 시험장치는 이러한 초기 공기압 구배를 낮출 수 있는 완충공 또는 통풍공 후드 개발, 전두부 형상변화에 대한 터널내 압력구배 변화 등에 사용하며, 따라서 열차길이가 1 m 이내로 충분하다.

Fig. 10 ~ Fig 12는 열차속도 257 km/h, 303



(a) Transducer position: 66.6 m

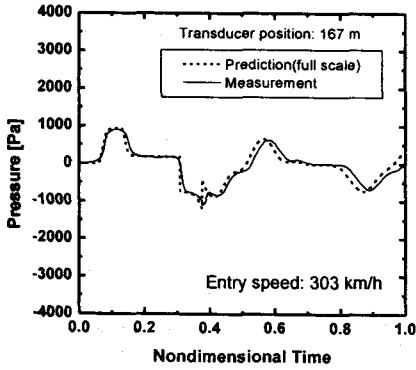


(b) Transducer position: 167 m

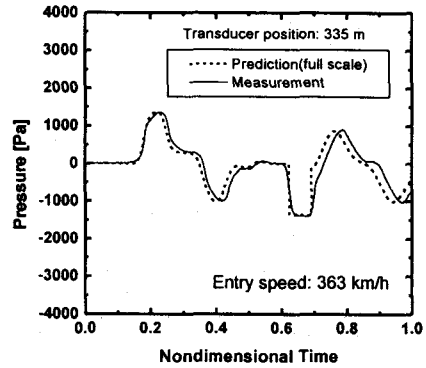
Fig. 10 Comparison of measurement and prediction results for pressure fluctuations in 0.5 km long tunnel of Seoul-Pusan high-speed railway(train entry speed: 257 km/h).

km/h, 363 km/h에 대한 열차모델 길이 0.605 m 인 경우의 시간에 따른 터널내 압력변화 시험결과를 나타내었다(측정점은 실적으로 66.6 m, 167 m, 335 m, 408 m에 해당). 경부고속철도 0.5 km 길이 터널과 K-TGV 열차에 대한 실제 제원을 사용하여 1차원 특성곡선해법으로 수치해석한 결과와 실험결과는 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

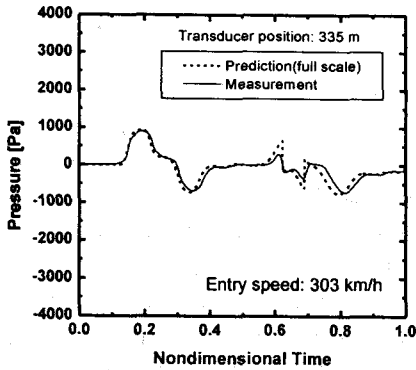
Fig. 13은 터널출구 333 mm(실척 20 m에 해당)에서 측정된 실시간 미기압과 강도이다. 0.5 km 슬라브케도 터널에서 열차진입속도 308 km/h 일 경우로서 터널입구에 열차모델 진입시 형성된 압축파가 음속(실험실 내부온도 24 °C)으로 터널내를 전파하여 터널출구에서 333 mm 거리까지 방산한 시간과 전두부에 의한 피크 값이 나타나는



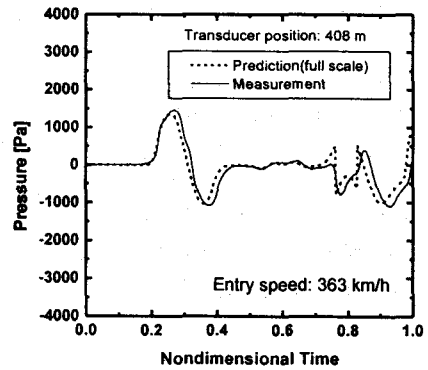
(a) Transducer position: 167 m



(a) Transducer position: 335 m



(b) Transducer position: 335 m



(b) Transducer position: 408 m

Fig. 11 Comparison of measurement and prediction results for pressure fluctuations in 0.5 km long tunnel of Seoul-Pusan high-speed railway (train entry speed: 303 km/h).

Fig. 12 Comparison of measurement and prediction results for pressure fluctuations in 0.5 km long tunnel of Seoul-Pusan high-speed railway (train entry speed: 363 km/h).

시간이 정확히 일치함을 확인하였다. 그리고 전두부 진입 후에 열차진입속도 308 km/h로 후두부의 터널입구 도달시간과 전두부에 의한 미기압과 피크 값과 후두부의 미기압과 피크 값(음의 값)의 시간간격도 정확히 일치하였다.

이와 같은 미기압과 생성은 다른 잡음과 명확히 구분되며, 경부고속철도 터널 단면적이 107 m²으로 대단면적 일지라도 슬라브레도 터널에서는 진입속도 308 km/h에서 약 40 Pa 정도의 미기압파를 발생시킨다. 이 실험실 조건의 미기압파 강도 크기에 대해서 추후 시운전시험을 통하여 상관 매개상수를 구하는 검증절차가 필요하다.

4. 결론

고속철도 터널의 공력설계 및 개발의 목적은 목표 운행속도에 따라 가장 최적화된 터널 내공 단면적을 제시하거나, 이에 따른 공력 문제에 대한 해결책을 제시하여 터널 건설비를 낮추는 것이다. 터널내의 공기압 변동 및 터널출구 미기압과 저감의 각종 대책을 개발할 수 있는 본 시험기는 일본의 신간선 개량과 자기부상열차 시험선로인 야마나시 시험선에 설치된 완충공(hood) 및 터널에서 현차시험과 93%이상의 정확성을 보여주고 있다.

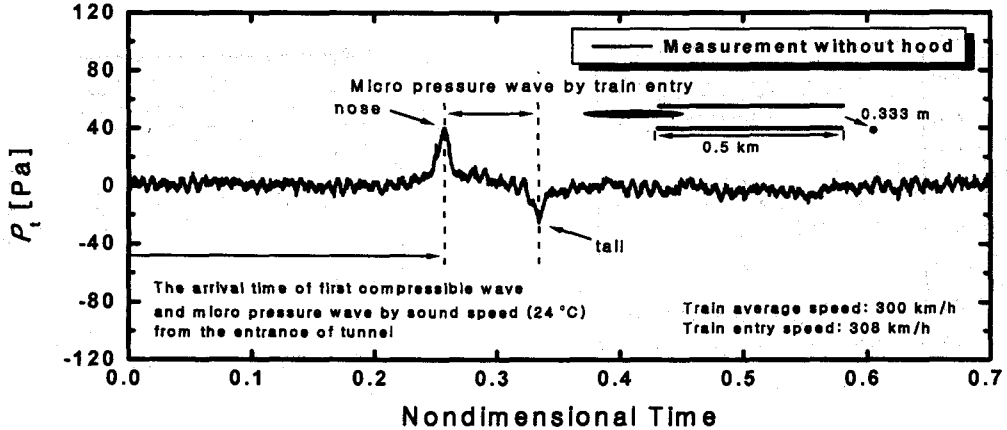


Fig. 13 Micro pressure wave histories for train entry speed of 308 km/h without countermeasures.

한국형으로 순수 국내기술로 개발된 본 시험기는 열차속도 257 km/h, 303 km/h, 363 km/h의 실제속도로 터널 주행 시험한 압력측정 결과와 수치해석 결과의 비교에서 매우 잘 일치함을 성능 검증하였다. 또한 열차 진입시 터널 출구에서의 미기압과 생성은 열차 전두부와 후두부의 돌입에 대해 정확히 측정해 내었다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발의 2차년도 개발결과 중 일부이며 (주) 삼보기술단, (주) 대본 엔지니어링의 지원에 감사드린다.

참고문헌

- (1) Dong-Hyeon Kim, Dong Ho Min and Il-Geun OH, "Experimental study of the aerodynamic countermeasures for reducing the micro-pressure waves and pressure fluctuations in high-speed train-tunnel interfaces" World Congress on Railway Research, Tokyo, Japan, October 19-23, 1999
- (2) T. Maeda and etc, "The Final Report of MicroPressure Wave Study for The Seoul-Pusan High-speed Railroad Project,"

- Japan Railway Technical Services, 1994.
- (3) Matsuo, K.; Aoki, T.; Mashimo, S.; Nakatsu, E.; Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 925-934, Aosta Valley, Italy: 6-8 October 1997.
- (4) Pope, C.W.; The Simulations of Flows in Railway Tunnels Using a 1/25th scale moving facility, Proceedings of the 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Elsevier, pp. 709-737, Brighton 1991.
- (5) Dayman, B. and Vardy, A.E.; "TRUNNEL, A Gun-Fired 0.5% Scale Facility for Pressure Transients of Very High Speed Trains in Tunnels", Proceedings of the 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Elsevier, pp. 757-787, Brighton 1991.
- (6) Takayama, K.; Sasoh, A.; Onodera, O.; Kaneko, R.; Matsui, Y.; Experimental Investigation on Tunnel Sonic Boom, Shock Waves, Springer Verlag, pp. e 127-138, 1995 (5).
- (7) T. Maeda, T. Matsumara, M. Iida, K. Nakatani and K. Uchida, STECH '93, PS3-8, Yokohama, Japan, 22-26 Nov. 1993.