

압축공기 발사기에 단선 와이어 유도방식을 적용한 1/60축척 터널주행 열차모형 시험기 개발에 대한 연구

김 동 현* · 오 일 근*

(2000년 8월 4일 접수, 2001년 3월 16일 심사완료)

Development of 1/60th Scale Moving Model Rig Using the Compressed Air Launcher and One-Wire Guidance System of Train Model

Dong-Hyeon Kim and Il-Geun Oh

Key Words: Moving Model Rig(주행 모형 시험기), One-Wire Guidance System(단선 와이어 유도 방식), Compressed Air Launcher(압축공기 발사기), Pressure Fluctuation(압력변동), Micro Pressure Wave(미기압파)

Abstract

The test facility of a 1/60-scale model for train-tunnel systems has been recently developed to investigate the effects of tunnel portal shapes, hood shapes and air-shafts for reducing the micro-pressure waves radiating towards the surroundings from the tunnel exit. The present test rig has been advanced from a 1/170-scale facility at NLR in Netherlands. The NLR test rig has the two-wire guidance system that needs two ears attached on the external surface of a model train nose. Therefore, their train models have irregular nose shapes. The main characteristics of the present facility are that the train model is guided by only one wire from the compressed air launcher to the absorber parts of test facility and the wire guidance hole is located at the axial center of a train model. In the present test rig, after a train model is launched, the air jet from the launcher does not enter the tunnel model. Experimental results were compared with numerical predictions to prove the performance of the test facility.

1. 서 론

고속철도는 가능한 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 전파하며 이 압축파가 터널출구에서 다시 반사하여 터널 입구쪽으로 팽창파로 돌아온다. 터널내부는 이러한 압축파와 팽창파의 지속적인 교란으로 심한 압력변동을 겪게 된다. 또한 열차의 터널 진입시 터널 입·출구 바깥의 대기중에 미기압파(micro pressure wave)를 방사하여 환경소음과 저주파 진동을 야기한다.^(1,2) Fig. 1은 터널에 열차진입시의 압축파 생성과 미기압파 방사 현상을 나타내는 그림이다. 터널내부 풍압변동의 진폭은 진입하는 열차속도의 제곱에 비례하기 때문에, 터널에서 초고속운행에는 많은 제약이 따른다.⁽³⁾ 첫째 문제가 터널내의 급격한 압력변동에 의해 승객들이 객실에서 느끼는 이명감(耳鳴感)현상이다.⁽⁴⁾ 이명감은 여객기 이륙시에 승객이 느끼는 귀의 통증과 같은 현상이다. 둘째는 터널출구

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원 시설연구본부
E-mail : dhkim@krii.re.kr

TEL : (031)461-8531 ex) 234 FAX : (031)461-8374

* 회원, 한국철도기술연구원 차량연구본부

주변 민가의 환경소음과 창문과 문틀을 흔드는 저주파 진동현상이다.⁽⁵⁾ 이러한 문제를 해결하기 위해서는 차량측 대책으로 차체기밀 향상과 강제여압시스템 적용, 차량 전두부와 차량단면적 최소화 방법이 있다.^(1,4) 시설쪽 대책으로는 터널 단면적을 크게 하거나 터널 단면적을 축소할 수 있는 통풍공(air-shaft)⁽⁵⁾ 또는 완충공(hood)⁽³⁾으로 터널내부의 풍압 변동량이나 시간에 대한 압력구배를 낮추는 대책이 있다. 터널 건설비용은 터널 굴착시에 나오는 암반과 흙의 양과 비례하기 때문에 작은 터널 단면을 가질수록 건설비용 저감은 대단하다. 따라서 터널 내공단면적을 작게하고 이에 따른 미기압과 영향을 감소시키기 위해 완충공을 설치하는 저비용 대책이 바람직하다.^(1,6)

터널 내공단면적 최적화, 완충공 또는 통풍공 공력설계, 차량 전두부 및 단면적 최적화 등의 사양설계를 할 수 있는 터널주행 열차모형 시험기(moving model rig)의 역량은 일본의 신간선 개량과 자기부상열차 시험선로인 야마나시 시험선에 설치된 완충공 및 터널에서 현차시험과 93% 이상의 정확성을 보여주고 있다.⁽¹⁾

본 연구는 네덜란드 항공우주연구소(NLR) Wolf 등⁽⁷⁾의 1/170 축척 터널주행 열차모형시험기(편의

상 이하에서 NLR 시험기라 한다) 방식에서 더 발전시켜 단선 와이어 유도방식을 적용한 한국형 중형(1/60 축척) 터널주행 열차모형 시험기를 Fig. 2, Fig. 3과 같이 국내기술로 개발하였다.

NLR 시험기는 압축공기 발사기에 단선 와이어 유도방식의 적용이 어려워 발사튜브 끝단에 복선 와이어 유도방식을 사용하였다. 따라서 열차모델 전두부 표면 위에 부가적인 와이어 유도 가이드를 만들어야 했으며 축대칭 전두부 형상이 비정상적이 되는 단점이 있다. 또한 복선 와이어 유도방식은 단선 와이어 유도방식보다 열차모델의 마찰력 증가에 의한 감속이 크며, 복선 와이어의 인장력을 동등하게 유지하는데 어려움이 있다.

본 시험기에서 열차속도 257 km/h ~ 363 km/h의 범위로 측정된 터널내부 풍압 변화량은 특성곡선 방정식해법의 수치해석 결과와 매우 잘 일치하였다. 또한 터널출구에서 방사되는 미기압과를 정확히 예측해 낼 수 있었다.

2. 터널주행 열차모형 시험기 개발

2.1 시험기의 발사시스템

열차모델의 발사시스템은 다양한 방법으로 적

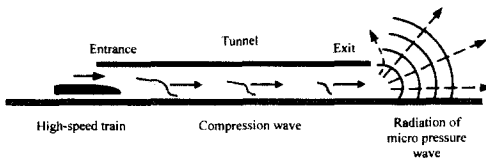


Fig. 1 The generation process of micro pressure wave at tunnel

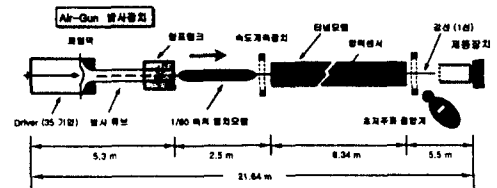


Fig. 2 The schematic of moving model rig

Table 1 Main specifications of moving model rig

Method	Axis symmetric, one wire guidance
Scale	1:60
Launching mechanism	Air-gun type
Train model speed	90 km/h ~ 600 km/h
Train model	Car body: paper tube, Nose: MC nylon material
Tunnel model	Polyvinyl chloride (PVC)
Total length of test rig	about 22 m



Fig. 3 Train entry in test facility

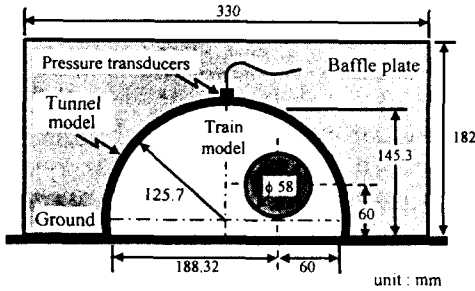


Fig. 4 Train-tunnel configuration for double track

용할 수 있다. 문헌으로부터 알려진 방법은 새총 (catapult) 발사방식,⁽⁸⁾ 건 파우더 발사방식,⁽⁹⁾ 압축 공기발사(공기총)방식,^(7,10) 차륜회전력 발사방식⁽¹⁾ 등이다. 영국철도연구소의 새총 발사방식은 1/25 축척 시험기로 200 km/h 속도까지 얻었으며 가속 거리가 매우 길다.⁽⁸⁾ 건파우더 발사방식은 1/200 축척 시험기로 1127 km/h 속도까지 달성하였으나 안전성과 발사속도의 조정에서 어려움이 있다.⁽⁹⁾ 일본철도총합연구소의 차륜회전력 발사방식⁽¹⁾은 야구 피칭머신에 주로 쓰이는 방식으로 4개의 회전륜(wheel)에 각각 1개씩의 모터가 달려 있으며 인버터 제어로 동시에 회전속도를 조정하는데 발사속도 정밀조정이 어려우며 제작비용에서 문제가 있다. 따라서 본 연구의 시험장치는 발사속도 재현성(정밀조정)이 용이하고, 제작비용이 저렴한 압축공기 발사시스템으로 결정하였다. 압축공기 발사기는 공기총(air-gun)과 비슷한 원리로 작동되는데 압축공기 실린더(driver)의 마이러 막(mylar membrane)을 격침기로 파열하는 순간에 압축공기가 발사튜브 안에 있는 축대칭 열차모형을 가속시킨다.

2.2 시험기의 구성

터널주행 열차모형 시험기는 Table 1과 Fig. 2와 같은 제원으로 1/60 축척으로 설계하였다. 시험기 구성은 Fig. 2와 같이 압축공기에 의한 열차모형 발사기, 단선 와이어 유도시스템, 열차모형, 터널모델, 제동장치로 이루어진다. Fig. 3은 시험기의 열차모형, 터널모델을 보여주는 사진으로서, 터널모델은 Fig. 4와 같이 아치형으로 경부고속철도 터널 내공단면적의 1/60 축척으로 0.0297 m² (실적 107 m²)이고 KTX(Korea TGV) 열차모형의

Table 2 The similarity requirement for surface roughness

	Full scale	1/60 scale
Effective diameter of tunnel, <i>D</i>	11.762 m	1.945x10 ⁻⁴ m
Surface roughness, ϵ	2.5x10 ⁻⁵ m	4.1x10 ⁻⁸ m
Relative roughness, ϵ/D	2.1255x10 ⁻⁴	

유효단면적은 0.00264 m²(실적 9.5 m²)이다. 여기서 터널에 대한 열차의 유효차단비(blockage ratio)는 8.88 %이다. Fig. 4에서 복선터널에 대한 열차모형의 편도 주행시험 위치는 우측에서 60 mm로 정하였고, 터널내 풍압변동량의 실시간 측정위치는 천정면 정중상으로 하였다. 또한, 기류 방지판(baffle plate)은 330 mm x 182 mm로 Fig. 3, Fig. 4와 같이 터널 입·출구에 적용하였다.

열차모형 발사속도는 시험모델 축척에 따르지 않고 실제속도를 사용하였으며, 이 때 생성되는 터널 내부의 압력과 변동량은 실적상황과 같은 크기로 생성되게 하였다(Fig. 8 ~ Fig. 11 참조).

경계층 형성과 관련된 마찰력은 축척 시험모델의 표면을 아주 매끄럽게 하여 어느 정도 보상되도록 하였다.⁽¹¹⁾ 더욱이 터널 내에 전파하는 압력파의 시간에 대한 구배도 터널내부 표면 거칠기(roughness)와 관계된다.⁽³⁾ 본 연구에서 고려하는 슬라브궤도(slab track)와 콘크리트 라이닝으로 이루어진 실제터널의 평균 표면 거칠기 ϵ_p 를 약 2.5 mm로 하였을 때 상대 거칠기 ϵ_p/D_p 는 2.1255x10⁻⁴이다. 완전한 상사의 요구조건은 상대 거칠기(relative roughness) $\epsilon_p/D_p = \epsilon_m/D_m$ 을 만족해야 하므로 축척에서의 표면거칠기 ϵ_m 는 Table 2에서와 같이 4.1x10⁻⁸ m가 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 열차모형 표면은 비닐코팅을 하고, 터널모델을 표면 거칠기가 매우 낮고, 쉽게 구할 수 있는 PVC(Polyvinyl chloride) 파이프와 PVC 평판을 이용하여 제작하였다. 본 시험장치와 같이 열차모형 속도는 실제속도로 하고, 열차 및 터널 등의 시험모델은 축척을 사용한 시험장치로 여러 문헌^(1,7-10)에서 찾을 수 있다.

성능조건으로 열차모형 속도는 기존철도 차량,

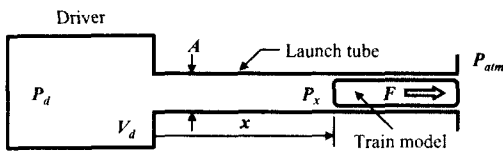


Fig. 5 The Pneumatic launching device

고속전철과 앞으로 초고속 탄환열차에 모두 적용이 가능하도록 90 km/h(25 m/s) ~ 600 km/h(167 m/s)의 범위까지 시험되도록 설계하였다. 본 연구에서는 0.605 m 열차모델 길이를 사용하였는데 이는 주로 터널 완충공 및 경사궤구 등을 개발할 때 터널입구 진입시의 압력과 전파현상으로 공력설계⁽¹⁾ 되기 때문이다. 시험장치에서 터널모델 입구와 출구 앞에 1.5 m 길이의 지면판을 두었다.

2.3 열차모델

발사튜브(launch tube) 지름은 60.5 mm이고 열차모델은 약간 더 작은 58 mm로 축대칭 형상을 사용하였다. 열차모델 길이에 변화를 줄 수 있도록 모델질량을 최소화하기 위해 고강도 지판(paper tube)을 사용하였다. 전두부와 후미부는 MC 나일론(monomer cast nylon) 재질로 제작하였으며, 제동장치의 충격에 견디도록 두께를 최소화했다. 열차모델의 전두부는 KTX 차량모델의 제원에 맞추어 축대칭 단면으로 전환하였다. 열차모델이 터널벽면에 부딪히거나 다른 방향으로 진행하지 못하도록 지름 2 mm 강선(steel wire)을 발사튜브 시작 단에서 제동장치 끝 뒤까지 연장하여 설치하였다. 강선을 항복점 부근까지 당겨도 끊어짐 없이 유지되도록 특수 고안한 강선 인장기와 크램프로 강선을 잡고 팽창시켰다. 즉, 외부력으로 강선에 크랙이 발생되지 않게 하였다. 열차모델의 중심에 지름 2.5 mm 구멍을 부싱 처리하여 열차모델이 강선을 따라 낮은 마찰력과 구멍의 변형 없이 추종할 수 있게 하였다.

2.4 압축공기 발사시스템 설계와 공명형소음기

압축공기 발사시스템은 Fig. 5에 나타난 압력용기(driver)와 발사튜브로 구성하였는데, 작동원리는 압력용기내의 고압공기가 발사튜브 시작 단에 설치된 파열막(일종의 고속 개방밸브 역할)에 의해 방출되면 이 공기압으로 열차모델이 발사되

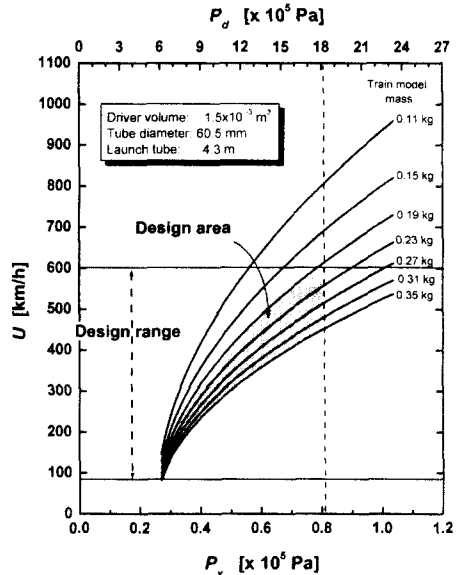


Fig. 6 The performance analysis to design the test rig

록 하였다. Fig. 5의 압력용기 체적은 $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 발사튜브 길이를 4.3 m로 했을 때 열차무게를 결정하기 위하여 다음의 설계계산을 수행하였다. 열차 뒤의 배압은 단열과정으로 변화하고 열차 앞쪽의 압력은 대기압으로 유지되고 또한 벽면마찰을 무시하면 발사튜브에서 열차모델 후두부 끝의 위치 x 에서 받는 힘 F 는 다음과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

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

여기서, P_x 는 잔여 배압이고, P_d 는 압력용기의 압력이고 P_{atm} 는 대기압 $[\text{N/m}^2]$, V_d 는 압력용기 체적 $[\text{m}^3]$, A 는 발사튜브의 단면적 $[\text{m}^2]$, 상첨자 γ 는 공기의 경우 1.4이다. 가속도는 발사튜브에서 열차모델 후두부 끝의 위치 x 에서 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

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

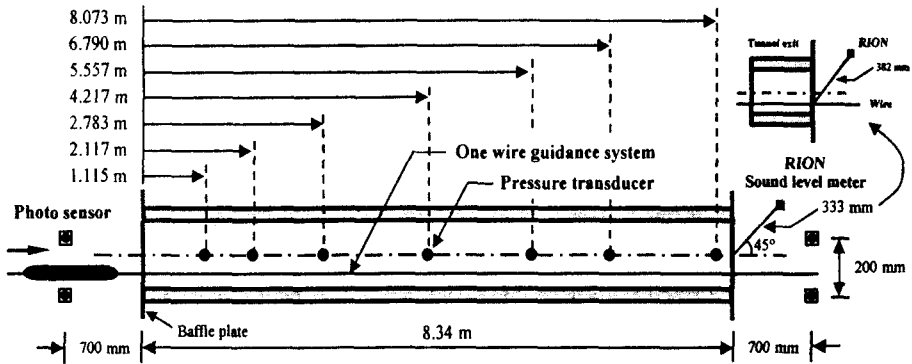


Fig. 7 The measurement positions in experiment

여기서, U 는 열차모델 속도이고 m 은 열차모델의 질량 [kg]이다.

열차모델의 발사시 발사튜브에서 공기제트가 터널모델 입구로 방출되지 않도록 발사튜브 내부의 잔여배압은 0.8기압 이하가 되도록 설계했다. 식 (2)로부터 속도 U 와 거리 x 에 대한 수치적분을 취할 때 튜브길이 4.3 m에서 식 (1)의 큰 괄호 안의 값이 $-0.2 P_{atm} / P_d$ 을 만족하면 수치적분을 종료하도록 하였다. 본 계산에서 수치적분은 Simpson's rule을 적용하였다. 수치적분은 Fig. 6에서와 같이 발사장치 설계를 위한 성능예측 결과를 얻었는데 Fig. 6의 빗금친 영역을 발사장치 동작영역으로 설정하였으며, 압력용기의 압력이 약 18기압이내에서 시속 600 km/h의 열차모델 속도를 확보하도록 하였다. 또한 Fig. 6에서 열차모델의 무게는 0.19 kg ~ 0.35 kg으로 사용할 수 있게 하였으며, 차체는 비중이 매우 낮은 고강도 지관을 사용하기로 결정했다. 공명형 소음기를 발사튜브 끝단에 달았는데 1.5 m 길이에 지름 0.6 m이며 소음기 내부의 발사튜브는 개구율 70 %의 타공판으로 교체하였다. 공명형 소음기는 열차모델 발사시의 저주파 소음을 감소시키는 역할뿐 아니라 발사튜브에 증가된 체적으로 잔여배압 감소에 기여하도록 하였다. 본 시험기는 발사기 압력용기의 압력설정에 따라 90 km/h에서 600 km/h까지 발사속도 조정이 가능하였다.

2.5 열차모델의 마찰제동과 충격흡수

열차모델은 터널을 통과한 후에 스펀지의 두께의 층과 여러 겹의 수직 고무판으로 만든 충격흡

수관에서 마찰력과 충격흡수로 감속된다. Fig. 6의 실제속도 영역에서 충격흡수장치 성능은 반복된 실험으로 약 2 m의 제동관 길이가 열차모델을 완전히 정지시키는데 충분한 거리임을 파악하였다.

2.6 시험 데이터 계측시스템 개발

터널모델에서의 각종 시험량 계측 위치는 Fig. 7에서와 같이 터널 앞뒤에서의 열차모델 주행속도 측정용 포토센서, 터널 내벽에 설치된 터널내부 풍압 측정센서, 터널출구 미기압과 측정용 음압계로 각각 설정하였다. 터널내부의 풍압변동은 Fig. 7에서와 같이 Endevco 압력센서(8510B-1)로 일곱 위치에서 연속적으로 기록하였다. 터널출구 미기압과 측정은 Rion의 충격성 소음측정용 음압 레벨계 (XN-12A, 0.2 ~ 1 kHz 저주파 대역 감도 특성 일정)를 사용하였는데, 터널 출구면 중심으로부터 333 mm 거리이고 터널 축에 대해 45° 각도에서 지면판 위 20 mm 높이에 위치시켰다. 이 위치는 실적으로 환산하면 터널 출구면 중심에서 20 m 떨어진 거리의 궤도면 위 1.2 m에 해당된다. 마이크로폰 헤드는 미기압과의 방사방향과 마주보게 위치시켰다(Fig. 7 참조).

터널입구 전방에 있는 포토센서(응답속도 2×10^{-5} sec)에 열차 전두부가 도달되면 모든 센서의 측정이 시작되며 또한 동시에 열차속도를 측정한다. 포토센서는 터널 앞과 뒤의 700 mm에 각각 위치시켰으며 주행 감속도를 파악하기 위해 속도측정을 개별적으로 하였다. 터널 입출구 전후의 대기온도는 K형 열전대로 각각 측정하였다.

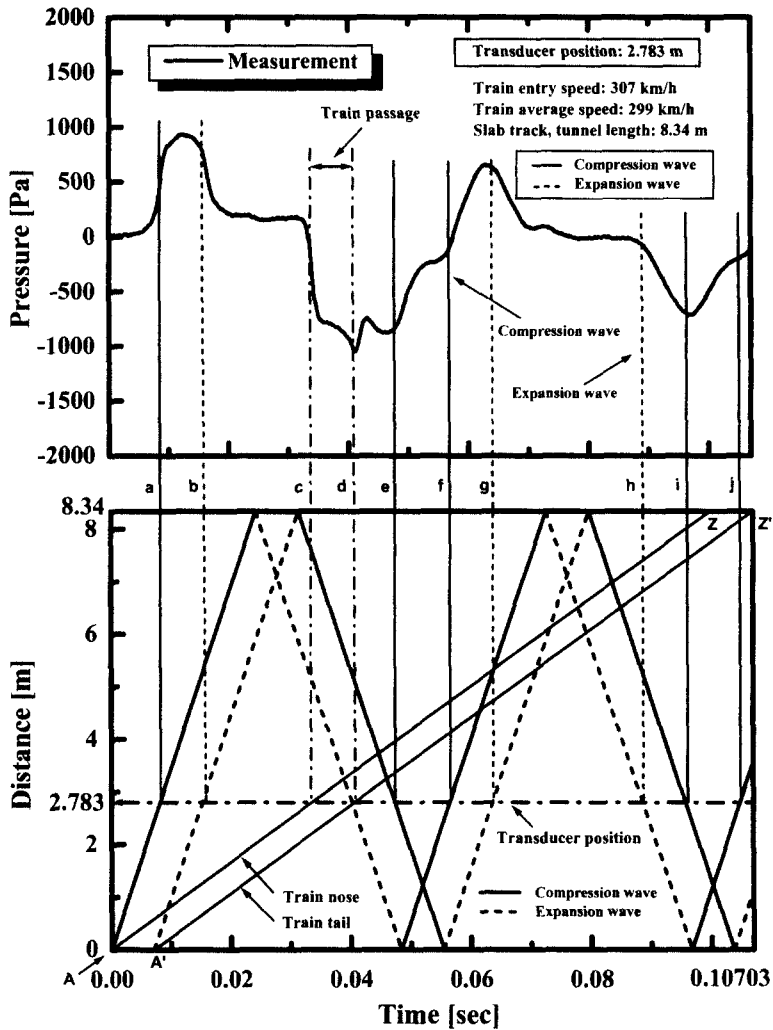


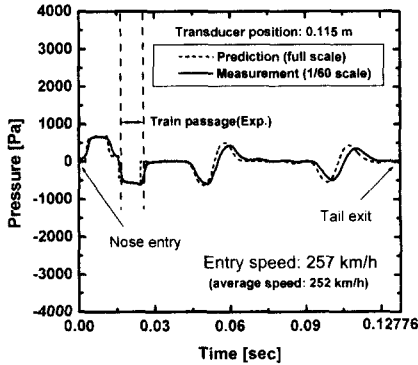
Fig. 8 Comparison of pressure transients and wave diagram in tunnel

압력센서(8510B-1)는 6.9 kPa의 동압력범위와 55 kHz의 공진주파수를 갖는다. 터널내 압력신호는 샘플링 주파수(sampling frequency) 200 kHz의 DC Dynamic Strain Amplifier(MINEBEA 모델 NMB DAS-406B)에서 증폭한 후 1 kHz에서 low-pass filtering을 하였고, 아날로그 신호를 디지털 신호로 전환하는 NI의 High-speed A/D Converter 모델 PCI-MIO-16E-1와 데이터 계측 소프트웨어 LabVIEW는 HP Vectra VE기종 컴퓨터에 장착하여 측정 데이터를 얻었다. 본 시험에서 16개의 측정채널을 사용했다. 채널당 최대이용 샘플링

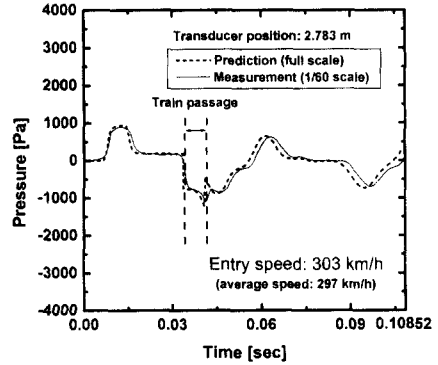
주파수는 100 kHz를 선택했다.

2.7 시험 측정오차 및 재현성

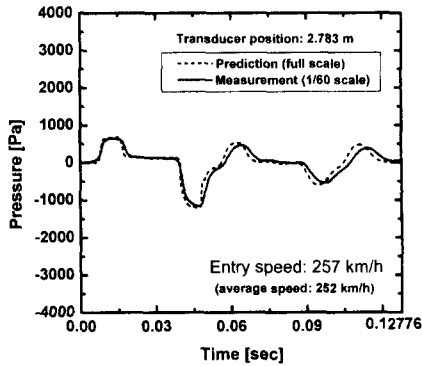
압력센서는 6.9 kPa의 동압력 범위에서 압력측정오차는 약 41 Pa이다. 열차속도 측정은 열차속도 300 km/h에서 0.82 km/h 편차를 갖는다. 8.34 m 길이 터널모델에서 열차가 터널입구에서 출구까지 도달할 동안 열차속도는 약 7% 감소된다(300회 시험 후의 평균값). 이 속도감소는 주로 공기저항과 강선의 마찰에 기인된다. 터널 출입구 미기압과 저감대책 개발이나 터널 단면적이



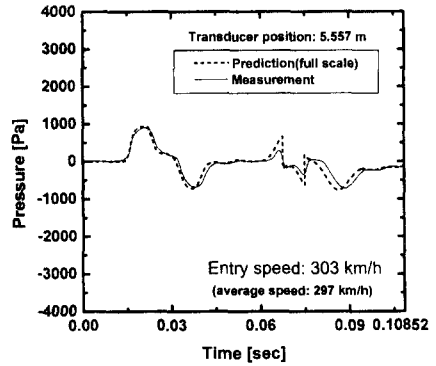
(a) Transducer position: 1.115 m



(a) Transducer position: 2.783 m



(b) Transducer position: 2.783 m



(b) Transducer position: 5.557 m

Fig. 9 Comparison of measurement and prediction results for pressure fluctuations in 8.34 m long tunnel (train entry speed: 257 km/h)

Fig. 10 Comparison of measurement and prediction results for pressure fluctuations in 8.34 m long tunnel (train entry speed: 303 km/h)

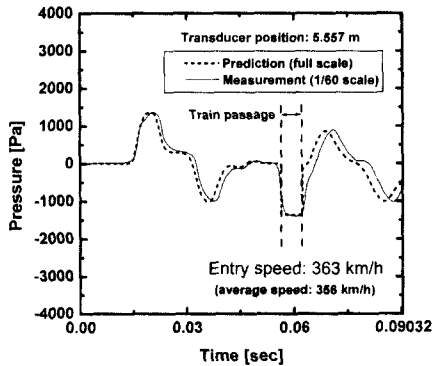
달라질 때 측정 데이터는 같은 열차속도에서 비교해야 한다. 보통 3번 정도의 발사에서 1% 내외의 목표속도를 얻는데 충분하였다.

3. 시험 결과 및 토의

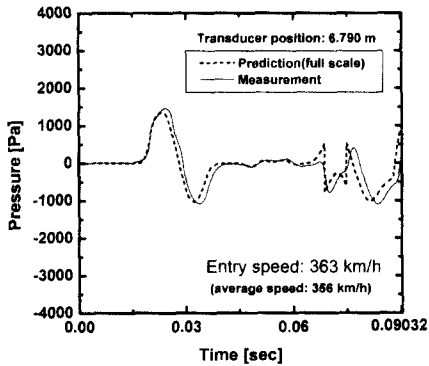
본 연구에서 개발한 1/60 축척 터널주행 열차 모형 시험기의 성능을 검증하기 위하여 몇 가지 시험 결과를 도출하였다. 본 시험에서 사용한 유효차단비는 8.88%로서 경부고속철도 터널과 KTX 열차의 비와 같다. 터널 길이와 궤도종류(슬라브/발라스트)에 따라 압력과 구배의 크기는 터널 길이방향으로 증가 또는 감소할 수 있지만 터널 출구에서 생성되는 미기압파는 첫 번째 압축파의 파면 압력구배에 의존한다는⁽¹²⁾ 것은 잘 알려져

있다. 본 시험장치는 이러한 초기 압력구배를 낮출 수 있는 완충공 또는 경사갠구형 후드 개발, 전두부 형상변화에 대한 터널 미기압파 저감대책 개발 등에 사용하며, 따라서 열차모형 길이가 0.605 m로 충분하다.

Fig. 8은 8.34 m 길이(실척 0.5 km에 해당) 슬라브궤도 터널에서 2.783 m 지점(실척 167 m)에서 측정된 풍압변동과 파동선도(거리와 시간에 대한 x-t 선도)를 나타내었다. 파동선도에서 열차 통과 실선(A-Z, A'-Z')은 열차진입속도 307 km/h와 감속도 31.34 m/s²으로 작성하였다. 터널입구에 열차모형 진입시 전두부에 의해 형성된 압축파가 음속(터널 입출구 외부온도의 평균값 22.5 °C 사용하여 계산함)으로 전파하여 첫 번째 압축파(실선 a 시간)에 의한 압력상승을 볼 수 있으며 바



(a) Transducer position: 5.557 m



(b) Transducer position: 6.790 m

Fig. 11 Comparison of measurement and prediction results for pressure fluctuations in 8.34 m long tunnel (train entry speed: 363 km/h)

로 열차 후미부에 의한 팽창파(점선 b 시간)로 압력하강을 볼 수 있다. 이 후 열차모델 통과를 터널측벽에 유기되는 터널입구방향 흐름을 압력센서가 감지하여 역압력구배(일점쇄선 c)가 발생한다. 열차모델 통과(일점쇄선 d) 후에 터널 양쪽 끝 개구단에서 반사되어오는 압축파들(실선 e, f)에 의한 정압력구배를 발생시키고, 다시 터널 입구쪽에서 반사되어 도달한 팽창파(점선 g)에 의해 압력하강(대기압으로의 회귀)을 볼 수 있다. 터널 진입시 생성된 압축파가 터널 양쪽 끝 개구단을 3번 반사하고 돌아온 팽창파(점선 h)에 의해 압력하강을 대기압 이하로 겪은 후, 두 번에 걸친 반사 압축파(실선 i, j)에 의해 대기압으로 압력은 회귀하고, 이 때 열차모델 후미부(Z)는 터널을 빠져나가게 된다.

Fig. 9 ~ Fig. 11은 터널 진입속도 257 km/h, 303 km/h, 363 km/h에 대한 실시간 터널내 압력 변화 측정결과를 나타내었다. 8.34 m 터널(실척 0.5 km 터널)에서 측정점은 1.115 m, 2.783 m, 5.557 m, 6.790 m(실척 66.6 m, 167 m, 335 m, 408 m에 해당)이다. 본 연구의 압력변동 측정결과를 수치해석과 비교하기 위해 경부고속철도 0.5 km 길이 터널과 KTX 열차에 대한 실제 제원을 사용하여 1차원 특성곡선해법⁽¹³⁾으로 수치해석을 수행하였다. 터널 입구에 진입하는 열차속도를 등속주행 해석조건으로 수치해석 하였다. 반면에 측정결과는 터널 주행중 감속을 겪으며, 이에 각각의 그래프에 열차모델 평균속도를 표시하였다. 본 연구의 열차주행속도별 미기압파와 압력변동 비교분석은 터널입구 통과속도를 기준으로 하였으며, 터널 통과시간에서 수치해석이 등속주행 결과이고, 터널주행 열차모형 실험은 감속과정을 갖는 측정결과이다. 터널 입구에서 출구까지 열차통과 시간에 해당하는 그래프의 횡축은 측정결과와 수치해석 결과를 비교하기 위해 수치해석 결과의 시간 값만을 축척비율 1/60로 곱하여 같은 그래프에 표현하였다. 검토한 257 km/h, 303 km/h, 363 km/h 열차속도에서 터널내 압력변동은 측정결과가 수치해석 결과보다 약간 시간지연 양상을 보이고 있다. 이는 시험측정에서 열차모델의 감속과정으로 설명이 된다. 이러한 양상이 검토속도 전체 영역에서 일관되며, 터널내 압력변동 측정결과와 수치해석 결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

열차 진입시 열차 전두부와 후미부에 의한 압축파 및 팽창파가 터널내를 전파하여 압력파의 일부분이 터널 끝단에서 미기압파로 방사된다.^(1,14) 터널 끝단에 도달한 압력파의 일부분이 미기압파로 방사되는데 김희동⁽¹⁴⁾ 문헌에서 압력파의 수 % 이내로 추론하고 있다.

다른 한편, 본 연구에서 미기압파의 무지향성을 검토하였다. 터널단면 검토 위치점(point)에서 일정거리로 구형을 이루게 음압계의 마이크로폰 헤드를 상하 90° 이내, 좌우 180° 이내의 각도변경으로 측정된 미기압파 결과는 터널 출구단면의 열차모델 유도 강선 위치에서 구형으로 같은 미기압파 피크(peak)값이 나왔다. 즉 Fig. 7에서 보면 마이크로폰에서 333 mm 거리의 터널단면 중심이 아니라 382 mm 거리의 유도 강선 위치가

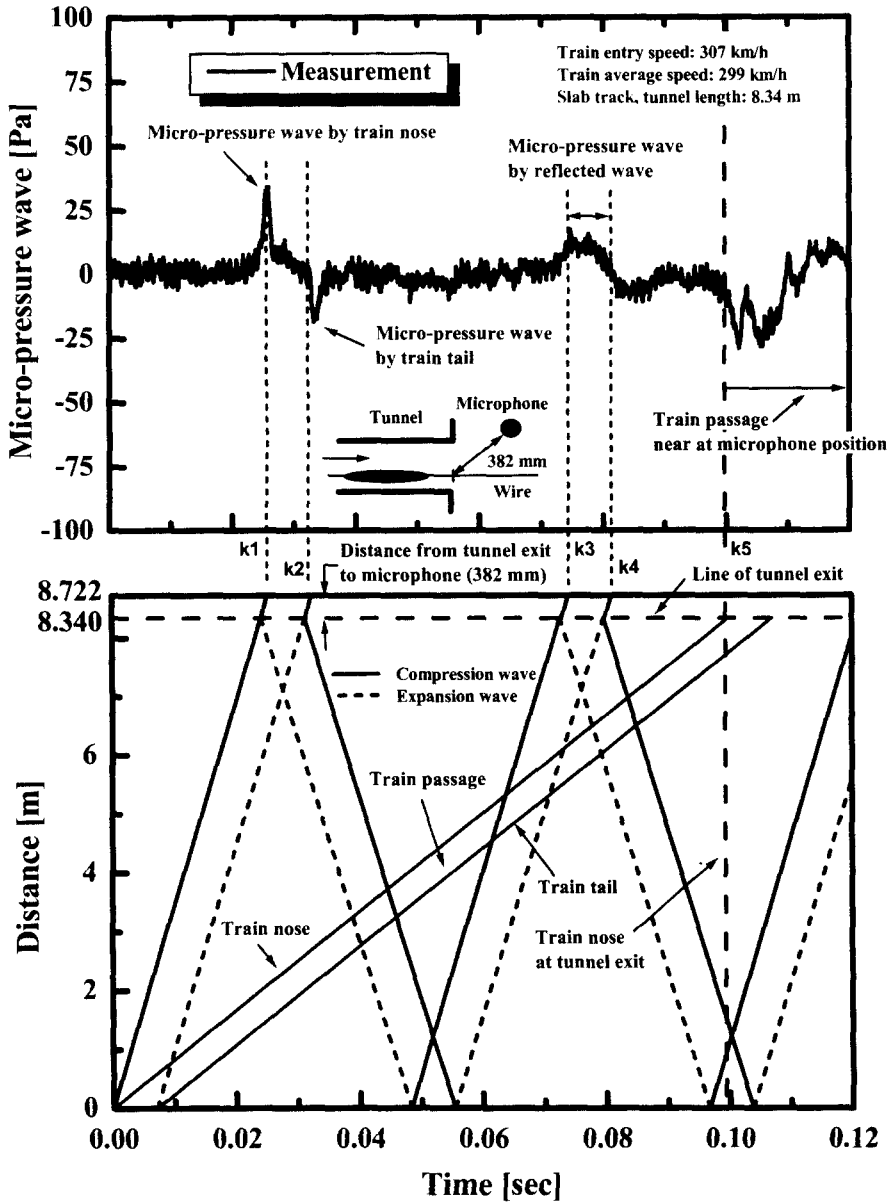


Fig. 12 Micro pressure wave histories for train entry speed of 307 km/h without countermeasures (slab track, 8.34 m long tunnel)

구형방사 미기압과 중심(point source)이었다.

Fig. 12는 터널출구 단면의 열차모델 유도 강선 위치에서 382 mm(실척 23 m에 해당)에서 측정된 실시간 미기압과 변동 값과 파동선도의 비교이

다. 열차진입속도 307 km/h의 경우로서 터널입구에 열차모델 진입시 형성된 압축파 및 팽창파가 음속(터널 입출구 외부온도의 평균값 22.5 °C)으로 터널내를 전파하여 터널출구에서 382 mm 거

리까지 방사한 시간을 나타내었다. 이때 터널 출구단에서 382 mm 거리만큼 음속으로 미기압파가 방사한 것으로 파동선도에 연장하여 나타내었다. 열차 진입시 압축파 및 팽창파의 전파에 의해 첫 번째로 나타나는 전두부 및 후미부에 의한 미기압파 피크 값(점선 k1, k2 시간)이 파동선도에서의 전파시간과 일치하며 이 압축파와 팽창파가 터널 출구단에서 다시 반사하여 터널 입구단에서 두 번째로 반사하여 되돌아오는 미기압파 피크값(점선 k3, k4 시간)이 나타나고 있다. 압축파에 의한 미기압파 피크값(점선 k1)은 양의 값으로 나타나며, 팽창파에 의한 미기압파 피크값(점선 k2)은 음의 값으로 나타나고 있다. 열차모델이 터널을 빠져나가면서 음압계를 통과할 때의 압력변동(점선 k5부터 시작되는 미기압파 변동값)도 나타나고 있다. 본 연구의 이러한 물리적 현상은 신간선 실차시험의 미기압파 측정결과⁽¹⁾와 정성적으로 잘 일치한다. 또한 상기 결과로부터 터널 입구 쪽 외부에도 Fig. 12의 첫 번째 미기압파와 두 번째 미기압파 피크값의 중간 크기로 미기압파가 방사될 수 있음을 추론 할 수 있다.

경부고속철도 운행속도 부근인 진입속도 307 km/h와 슬라브 궤도인 경우에 터널에 대한 열차의 유효차단비가 8.88 %로 매우 큰 터널 단면적이지만 약 40 Pa 정도의 미기압파(점선 k1 참조)를 발생시키는 결과를 얻었다. 이 결과는 터널 출입구에 경사갱구 입구⁽⁶⁾ 등을 적용하지 않은 절편형 터널 출입구에 대한 결과이다. 일본 신간선의 경우 터널 출구단 중심에서 45° 각도로 20 m 떨어진 거리에서 측정된 미기압파 피크값이 20 Pa 이상이 되면 저감대책을 적용하고 있다.

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 미기압파 저감의 각종 대책을 개발할 수 있는 본 시험기는 열차속도 257 km/h, 303 km/h, 363 km/h의 실제속도로 터널 주행 실험한 압력변동 측정결과와 수치해석 결과 및 파동선도와의 비교에서 정량적, 정성적으로 매우 잘 일치함을 성능 검증하

였다.

열차 진입시 터널 출구에서의 미기압파 생성은 열차 전두부와 후미부의 돌입에 대해 터널출구 단면에서 미기압파가 음속으로 전파한다는 설정을 적용한 파동선도와의 비교에서 본 시험기 시스템의 계측성능 및 정확성을 검증해 보였다. 또한 터널 출구에 도달한 압력파가 터널 입구쪽으로 반사하여 다시 터널 출구 쪽으로 되돌아 온 반사 압력파에 의해 생성된 미기압파도 검출해 내었다.

본 연구에서는 터널 입출구에 경사갱구나 완충공 등의 미기압파 저감대책을 적용하지 않은 경우로서 슬라브 궤도이고 터널 단면적에 대한 열차 단면적의 유효차단비가 8.88 %로 큰 터널 단면적을 갖는 경우 진입속도 307 km/h에서 약 40 Pa 정도의 미기압파를 발생시키는 결과를 얻었다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 2차년도 개발결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Maeda, T., 1996, "Review of Micro-pressure Wave Radiating from Tunnel Portal and Pressure Variation Under Train Passage," *RTRI report*, Vol. 10 No. 2, pp. 5~10 (In Japanese).
- (2) Iida, M., Fukuda, T., Kikuchi, K., Murata, K., and Yamauchi, N., 1999, "Infrasound Problems Occurring Near Tunnel Portals of High-speed Railway," *World Congress on Railway Research*, Tokyo, Japan, October 19-23.
- (3) Maeda, T., 1994, "The Final Report of Micro-pressure Wave Study for The Seoul-Pusan High-speed Railroad Project," *Japan Railway Technical Services Report*.
- (4) Kobayashi, M., Suzuki, Y., Akutsu, K., and et al, 1991, "New Ventilation System of SHINKANSEN Cars For Alleviation Aural Discomfort of Passengers," *Proceedings of the 7th International*

- Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Elsevier, Brighton, pp. 205~218.
- (5) Burri, J. and Zumsteg, F., 1997, "Airshafts for the Alleviation of Pressure Waves in Tunnels of the New Swiss Rail 2000," *Proceedings of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy: 6-8 October, pp. 289~290.
- (6) Kim, D. H., Min, D. H., and Oh, I. G., 1999, "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.
- (7) Wolf, W. B. and Demmenie, E., 1997, "A New Test Facility for The Study of Interacting Pressure Waves and Their Reduction in Tunnels for High-speed Trains," *Proceedings of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy: 6-8 October, pp. 301~317.
- (8) Pope, C. W., 1991, "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, Brighton, pp. 709~737.
- (9) Dayman, B. and Vardy, A. E., 1991, "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, Brighton, pp. 757~787.
- (10) Takayama, K., Sasoh, A., Onodera, O., Kaneko, R., and Matsui, Y., 1995, "Experimental Investigation on Tunnel Sonic Boom," *Shock Waves*, Springer Verlag, pp. 127~138.
- (11) Gerhart, P. M. and Gross, R. J., 1985, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Corporation, pp. 383~392.
- (12) Ozawa, S. and Maeda, T., 1988, "Model Experiment on Reduction of Micro-Pressure wave Radiated from Tunnel Exit," *JSME, International Symposium on Scale Modeling*, Tokyo, July 18-22.
- (13) 한국고속철도공단, 1996, 고속철도 차량시스템 엔지니어링, 제2권, 제70장.
- (14) 김희동, 1998, "관단으로부터 미소 압력파의 반사에 관한 기초적 연구," 대한기계학회논문집 B권 제22권 제5호, pp. 618~626.