

# 고속 전철에 의한 터널 출구에서의 충격성 소음(소닉붐)의 예측 및 실험적 연구

Measurement and prediction of sonic boom by high speed train at the tunnel exit

이수갑, 윤태석, 정원태, 이동호(서울대 항공우주공학과),

김동현(철도기술연구원), 강신재(전북대)

## Abstract

When a high-speed train enters a tunnel, a compression wave is generated ahead of the train and propagates along the tunnel. This wave subsequently emerges from the exit portal of the tunnel, which causes an impulsive noise. In the present study, experimental investigation is carried out on the sonic boom noise with parameters of train speed, blockage ratio, nose shape of train and airshaft. These experimental results show that several countermeasures could be used to efficiently reduce the sonic boom. In addition, numerical analysis is performed to predict the sonic boom. The predicted sound waves are in a good agreement with the experimental results.

## 1. 서론

고속전철의 소음은 크게 바퀴회전소음 (rolling noise)과 각종 공력소음 (aerodynamic noise)으로 나눌 수 있으며, 공력소음은 주로 전두부, 연결부위, 열차하부, 창문 등의 홈, 팬트그래프 및 커버 소음 그리고 터널 진, 출입 관련소음으로 나눌 수 있다. 저속 영역에서는 차량 바퀴와 레일에서의 소음이 지배적이지만, 속도가 증가할수록 공력소음이 증가하게 되어 고속 영역에서는 공력소음이 지배적인 요인이 된다. 현재 독자 개발 연구중인 한국형 고속 전철의 최고 속도는 시속 350km/h에 달할 것으로 예상되어 고속 주행에 수반되는 여러 문제점들에 대한 연구의 필요성이 증대하게 되었다. 특히 고속 주행중의 터널 통과는 압력과 팽창파에 의한 승객의 불쾌감 유발, 선로 주변의 충격성 소음 문제(소위 소닉붐)등을 유발하게 되는데 특히 출구에서의 소음에 대한 심각성이 부각되고 있다. 출구에서의 소음문제를 연구하는 궁극적인 목적은 이러한 소음을 저감하는데 있을 것이다. 출구소음의 저감을 위해서는 우선적으로 출구에서의 유동 특성을 정확히 파악하고 특히 소음과 직접적인 관련을 갖는 미기압파(micro-pressure wave)의 크기에 영향을 미치는 요인들로는 어떤 것들이 있으며 또 그 요인들의 영향 정도를 파악할 수 있는 연구가 선행되어야 한다.

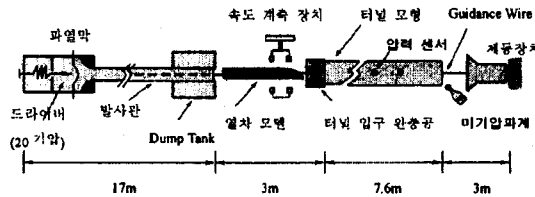
본 연구에서는 네덜란드 항공우주연구소(NLR)의 터널주행 비정상시험기를 이용하여 고속 열차가 터널을 통과하면서 일어나는 공기역학적 현상과 문제를 실험적으로 수행하였다. 또한 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음 예측에 관한 수치해석연구도 수행하여 이를 실험결과와 비교하여 보았다. 이러한 연구는 고속전철의 터널 진·출입 시 발생하는 공기역학적인 문제에 대한 물리적인 현상의 이해뿐만 아니라 터널 출구에서의 미기압파와 객차 내부 승객의 이명(耳鳴)현상 등을 최소화하기 위한 고속전철의 전두부 형상 설계와 터널설계 과정에서 유용한 설계의 도구가 될 수 있다.

## 2. 본론

### 2.1 시험장치 및 측정방법

고속열차가 터널로 진입할 때의 압력 변동을 시험하기 위해 네덜란드 항공우주연구소(NLR)의 터널주행 비정상시험기(T3F : Test Train Tunnel Facility)를 임대하여 시험을 진행하였다. NLR의 터널주행 비정상시험기는 그림 1과 같이 구성되어 있다.

이 시험장치는 공기총과 같은 원리로 작동하는데, 공기를 압축시킨 후 파열막을 터뜨림으로써 압축된 공기가 발사관 내의 열차 모델을 가속하는 원리로 작동된다. 가속된 열차 모델은 발사관을 떠난 후, Guidance ring을 따라 궤도를 이탈하지 않고 터널 모델로 진입하게 된다.

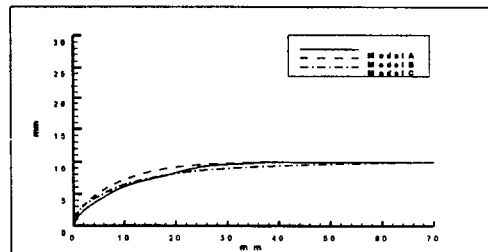


[그림 1] 터널주행 비정상시험기

시험 모델은 전체 길이 2.34m에 단면 지름 20mm의 축대칭 물체이다. 전두부 부분은 알루미늄으로, 몸체 부분은 발사(Balsa wood)를 이용하여 제작하였으며, 전두부 부분은 형상 변화에 따라 탈부착이 가능하게 하였으며, TGV와 KHST (한국형 고속전철)의 후부형상 2개 등 총 3개의 형상에 대하여 전두부의 면적분포가 일치하도록 반지름의 분포를 결정하였다.

터널의 면적은 기존 TGV선로 터널인 85m<sup>2</sup>과 경부고속전철의 터널면적인 107m<sup>2</sup> 두 가지를 축소비에 맞게 계산하여 사용하였다. 이번 시험에 사용된 열차와 터널의 단면적과 단면적비(Blockage ratio)를 아래 표 1에 정리하였으며, 시험모델의 전두부 형상은 그림 2에 나타나 있다.

Test Type	Model Area(m <sup>2</sup> )	Tunnel Area(m <sup>2</sup> )	Blockage Ratio
A-1	9.145	107	0.085
A-2	9.145	85	0.108
B-1	8.637	107	0.081
B-2	8.637	85	0.102
C-1	8.637	107	0.081
C-2	8.637	85	0.102



[표 1] 시험에 사용된 열차와 터널의 단면적

[그림 2] 열차모델(A, B, C)

측정은 발사관에 위치한 accelerometer에 의해 시작되도록 되어있다. 터널에 진입하기 전과 통과한 후의 속도는 터널 앞과 뒤에 각각 300mm 떨어진 light cell array로부터 얻는다. 터널 모델 안에서의 압력 변동은 11개의 지점에서 시간에 따른 압력값을 동시에 기록하도록 했다. 여기에 쓰인 압력 변환기(pressure transducer)는 Endevco사의 type 8510-B2로, 13.8kPa의 동적 범위(dynamic range)를 가지고 공진 주파수(resonance frequency)는

70kHz이다. 미기압파의 측정에는 2개의 B&K 1/4 inch microphone type 4135가 사용되었다. 이 microphone의 최대 측정 범위는 3.2kPa이고, 공진 주파수는 110kHz이다. microphone들은 출구에서 120, 240mm, 바닥에서 20mm 떨어진 위치에 터널 축과 45°의 각을 이루도록 설치했다. 각각의 microphone의 다이어프램 (diaphragm)은 미기압파의 진행 방향에 수직이 되도록 했다. 그리고, 터널 바닥의 재질은 ballasted track과 유사한 마찰계수를 가지고 있다.

## 2.2 수치해석

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음 (소닉붐)을 수치적으로 해석하기 위해서 미기압파 발생과정을 세 단계로 나누어 연구를 수행하였다. 1단계는 고속 전철이 터널로 진입하는 순간에 전철 전두부에 흐르는 유동 단면적의 급격한 변화에 의해 발생하는 압축파의 파형 및 크기를 예측하였다. 2단계로는 이렇게 발생된 압축파가 터널 내를 전파하면서 비선형 과정을 통해 변형되는 과정을 특성 곡선 기법 (method of characteristics)을 이용한 일차원 가정을 통해 상사해 보았다. 마지막 단계로 출구에 도달한 압축파와 미기압파와의 관계를 무한 배플판이 설치된 곳에서 피스톤의 진동에 의한 원음장 (far-field)에서의 압력에 대한 관계식을 이용하여 구현하였다.[1]

### 2.2.1 터널 소음 해석을 위한 가정

본 연구에서는 터널-열차간의 출구소음을 예측하기에 앞서 몇 가지의 가정을 세웠는데 다음과 같다.

- (1) 터널 내 압축파는 선형화된 일차원 평면파이다.
- (2) 터널 내에서 압축파의 진행에 대해서는 점성 열소산과 경계층내의 난류 마찰 손실을 고려한다. 또 밸러스트 트랙 (ballasted track)의 경우에는 이와 더불어서 다공성 (porosity)을 고려한다.
- (3) 출구 소음의 최대치는 출구로 방사되는 최초의 압축파에 의한다.

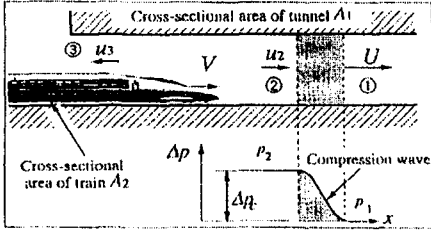
### 2.2.2 열차의 터널 진입에 의해 발생된 압축파의 파형

열차가 터널에 진입하는 순간에는 열차 전면에 흐르는 유동의 단면적이 급격히 변화하게 되어 강한 압축파가 형성되게 되는데, 이는 본질적으로 3차원, 비정상, 압축성 유동의 문제이다. 그러나 유동의 중요한 특징은 1차원 유동 모델을 사용함으로써 모사가 가능하다. 그림 3은 터널입구에서 압축파가 형성되는 과정을 나타낸다. 여기서  $\Delta p_c (= p_2 - p_1)$ 는 압축파를 통한 압력상승 값이며 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$\Delta p_c = \frac{1}{2} \gamma p_1 M_t^2 \times \left[ \frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2)M_t - \gamma M_t^2 (1 - \frac{\phi^2}{2})} \right] \quad \text{식(2.1)}$$

여기서  $\phi$ 는 열차와 터널의 단면적비 ( $A_{train}/A_{tunnel}$ ),  $M_t$ 는 열차의 마하수 그리고  $\gamma$ 은 공기의 비열비를 의미한다.

식(2.1)로부터 압축파의 파형은 식(2.2)와 같이 반경험식으로 표현할 수 있다.



[그림 3] 입사하는 압축파(Entry compression wave)의 형성

바닥의 재질 (슬라브 트랙 혹은 밸러스트 트랙) 그리고 터널 내에 있는 여러 가지 구조물등이 두 가지를 들 수 있다. 본 연구에서는 구조물에 의한 변형은 고려하지 않았으며, 터널 바닥의 재질은 시험장치 조건에 부합하기 위해서 밸러스트 트랙을 고려하였다. 긴 slab track 터널에서는 압축파의 파형의 기울기는 터널 내를 전파하면서 매우 급격해지는데 그 원인으로서는 slab track의 특성상 즉 터널의 면이 부드럽기 때문에 압축파의 에너지 소산(dissipation)이 적고 압축파의 비선형 효과(nonlinear effect)가 지배적으로 나타나기 때문이다. 한편 ballasted track의 경우에는 그 구배가 많이 약해지는데 ballasted track의 경우 터널 벽에서 마찰에 의한 감쇠효과가 밸러스트 레일에서 현저하게 나타나기 때문이다. 터널 내를 전파해가는 압축파의 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left( c_0 + \frac{\gamma+1}{2} u \right) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \left( f + \frac{\dot{m}c_0}{\rho_0 A} \right) \quad \text{식(2.3)}$$

여기서  $u$ 는 압축파( $\approx p/(\rho_0 c_0)$ )에 수반되는 공기의 속도,  $c_0$ 는 음속,  $\rho_0$ 는 대기상태의 밀도,  $A$ 는 터널의 면적,  $f$ 는 터널 벽에서의 마찰력, 그리고  $\dot{m}$ 은 터널의 단위길이당 터널에서 밸러스트 트랙을 통과하는 공기의 질량 유량을 의미한다. 식(2.3)에서 우변의 첫 항은 슬라브 트랙과 밸러스트 트랙, 모든 경우에 고려해야 하는 마찰력을 뜻하고 두 번째 항은 밸러스트 트랙의 효과를 고려한 항이다.

먼저 터널내 벽에서의 마찰력을 고려한다. 압축파가 양(+)의 방향, 즉 열차의 진행방향으로 전파하고 있을 때 마찰력은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$f = - \left( \frac{\lambda}{2d_H} u^2 + \frac{4\tau u}{\rho d_H} \right) \quad \text{식(2.4)}$$

식(2.4)에서 우변의 첫 번째 항은 정상 유동에서 마찰력을 의미하며  $\lambda$ 와  $d_H$ 는 터널의 수력 직경을 의미한다. 두 번째 항은 층류 또는 난류에서 비정상 유동의 마찰력을 의미하는 항이다.

앞서 언급한 바와 같이 식(2.3)의 우변의 두 번째 항은 밸러스트 트랙의 특성, 즉 다공성(porosity)을 모델링한 항을 의미하며 질량유량은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\dot{m} = -\rho_0 v b \quad \text{식(2.5)}$$

여기서  $v$ 는 밸러스트 트랙 표면에 수직인 공기 속도( $v > 0$ 은 터널에서 트랙으로의 공기의 투과를 의미한다)이며  $b$ 는 밸러스트 트랙의 두께를 의미한다. 트랙 면에 수직인 속도  $v$ 는 밸러스트 트랙의 acoustic impedance에 관하여 터널 내의 압력  $p$ 와 관계가 있다.

$$p(t) = \Delta p_c \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{Vt}{cD} \right) \right] \quad \text{식(2.2)}$$

여기서  $V$ 는 열차의 속도를 의미하고  $D$ 는 터널의 등가 직경 (equivalent diameter), 그리고  $c$ 는 실험적으로 결정되는 상수로서 0.3 혹은 0.33의 값을 사용한다.[3]

### 2.2.3 터널 내를 전파하는 압축파의 파형

열차의 터널 진입에 의해서 생긴 압축파가 터널 내를 전파할 때, 그 전면의 변형에 영향을 주는 터널 내의 조건으로서는 터널 벽면 및

벨러스트 트랙은 다공성의 흡음재료로서 모델링할 수 있는데 흡음재가 매우 얇고 수직 입사하는 파의 주파수가 상대적으로 낮다면 벨러스트 트랙 면에서의 압력  $p$ (보통 터널 내의 압력  $p$ 와 같다)와 속도  $v$ 의 관계는 다음과 같다.

$$p = \left( i\omega \frac{1}{3} \frac{\xi \rho_0}{\varepsilon} h + \frac{1}{3} rh + \frac{\rho_0 c_0^2}{i\omega \gamma h \varepsilon} \right) v \quad \text{식(2.6)}$$

여기서  $r$ 은 유동의 저항 (flow resistivity),  $\xi$ 는 질량 계수,  $h$ 는 벨러스트 트랙의 두께,  $\varepsilon$ 은 다공성 (porosity), 그리고  $i$ 는 허수를 의미한다. 식(2.6)을 이용하면 식(2.3)의 우변의 두 번째 항은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{m c_0}{\rho_0 A} \approx \alpha c_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \quad \text{식(2.7)}$$

식(2.7)에서 우변의 첫 번째 항은 압축파의 전파속도 (propagation velocity)를 고려하는 항이며, 두 번째 항과 세 번째 항은 각각 압축파의 소산(dissipation)과 이산 (dispersion)항을 의미한다. 여기에서 소산항이 가장 지배적으로 작용하게 된다. 식(2.8)에서의 계수  $\alpha, \nu, \beta$  등은 벨러스트 트랙의 두께 ( $h$ )와 폭 ( $b_B$ ), 유동의 저항성  $r$ , 다공성  $\varepsilon$ , 질량계수  $\xi$ , 그리고 터널의 단면적등에 의존한다.[4,5] 따라서 식(2.7)을 식(2.5)에 대입하면 다음과 같은 터널 내를 전파하는 압축파의 파면 변형을 고려하는 식이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left( \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) c_0 + \frac{\gamma + 1}{2} u \right) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \left( f + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right) \quad \text{식(2.8)}$$

#### 2.2.4 터널 출구에 도달한 압축파와 미기압파의 관계

터널 출구에서 발생하는 미기압파 현상은 일반적으로 관단으로부터 방출되는 음향이론을 사용하여 해석할 수 있다.  $P$ 와  $p$ 와의 관계, 즉 미기압파와 터널 출구에서의 압력사이의 관계는 무한배플판 (infinite baffle plate)가 설치된 반경  $a$ 의 진동판에 대한 음장의 해석결과를 이용하여 구할 수 있다.[6]

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{4A(\omega)}{R(2ka) + 1 + iX(2ka)} \exp(i\omega t) \times \sin\left(\frac{ka}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 + 1} - \frac{r}{a}\right) \quad \text{식(2.9)}$$

$$\times \exp\left[i\left(\frac{\pi}{2}\right) - \frac{ka}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 + 1} + \frac{r}{a}\right)\right] d\omega$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \exp(i\omega t) dt \quad \text{식(2.10)}$$

여기서  $a$ 는 관의 반경(radius), 그리고  $k$ 와  $\omega$ 는 각각 파수(wave number)와 각주파수 (angular frequency)를 의미한다. 식(2.9)를 이용하면 출구 중심 축상의 임의의 지점에서 미기압파의 파형 및 크기를 예측할 수 있다. 한편 출구 축과 임의의 각도를 가지고 있을 때 미기압파는 식(2.9)에서 음의 지향성(directionality)를 고려하여 예측할 수 있다.[7]

$$P = \frac{\pi a^2}{\pi c r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i\omega A(\omega)}{R(2ka) + 1 + iX(2ka)} \times \exp(i\omega t)\psi(\theta) d\omega \quad \text{식(2.11)}$$

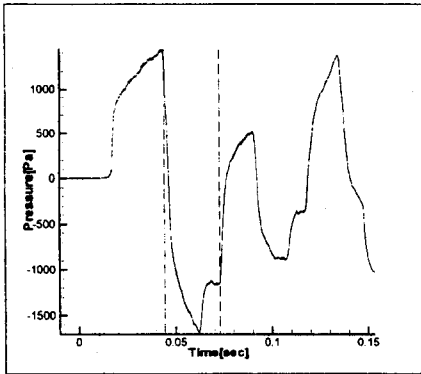
$$\psi(\theta) = 2 \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad \text{식(2.12)}$$

여기서  $J_1$ 은 정수차수를 갖는 first order의 Bessel 함수를 의미하여 각도  $\theta$ 는 터널 면과 미기압과 예측지점이 이루는 각을 의미한다.

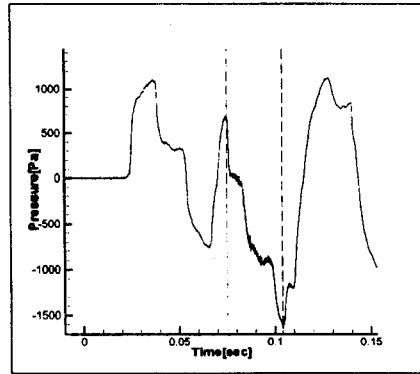
### 3. 시험 결과 및 수치해석 결과

#### 3.1. 압축파의 형성과 변형, 미기압파의 발생

그림 4는 열차의 모델이 C-1 type 이고 속도는 300km/h일 경우에 8번 압력센서(터널 입구로부터 70.7%에 위치)에서의 압력변화를 그린 것이고, 그림 5는 그림 4에서의 같은 운용조건으로서 11번(94.6%에 위치) 압력센서에서의 측정값이다. 그림에서 점선으로 표시된 부분의 안쪽 영역은 열차가 지나가는 영역이다. 그림 1에서는 열차가 터널에 진입함에 따라 압축파가 발생하여 터널과 열차의 마찰효과에 의해 천천히 증가하다가 점선으로 가로지른 열차가 통과하는 영역에서는 압력이 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그림 5에서는 열차가 통과하기 전에 압력이 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이것은 압축파가 터널 끝에 도달해 일부는 미기압파로서 빠져나가고 나머지는 자유단 반사 조건에 의해 팽창파로 반사되어 돌아오기 때문에 일어나는 현상에 의한 결과이다.



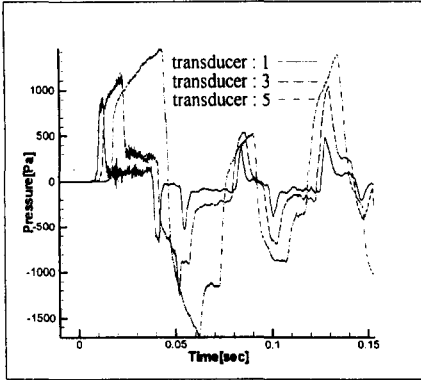
[그림 4] 터널 입구에서부터 터널 길이의 71%에서의 압력값



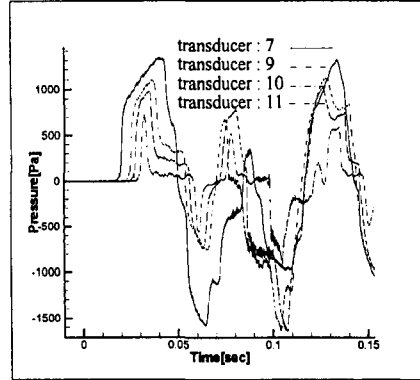
[그림 5] 터널 입구에서부터 터널 길이의 95%에서의 압력값

그림 6과 그림 7을 통해서 여러 위치에 있는 압력 센서에서의 압력변화를 살펴보았다. 압력 센서의 위치는 입구로 4.3%(transducer 1번), 15%(3번), 37.5%(5번), 59.6%(7번), 81.8%(9번), 92.8%(10번), 94.6%(11번)에 위치하였다. 각 압력센서에서의 시간에 따른 압력변화를 통해 압축파가 터널 내를 전파되어 나갈 때의 변화를 알 수 있다. 그림6에서는 압축파가 터널 내를 전파되어 나가면서 점점 더 그 강도를 더해가는 것을 알 수 있다. 이것은 shock tube 내에서 유한파가 전파되어 나가면서 파의 모양이 변형되는 것과 같은 현상이다. 그림 7에서는 점점 압축파의 강도가 약해지는 모습을 볼 수 있는데, 이것은 반사된 팽창파가 압축파에 의한 효과가 나타나기 전에 도달함으로써 생기는 현상이다. 그림 7에서 뒤쪽에 있는 압력센서일

수륙 피크치가 작고 이른 시간에 나타나는 것으로도 그 사실을 알 수 있다.



[그림 6] 1,3,5번 센서에서의 압축파형



[그림 7] 7,9,10,11번 센서의 압축파형

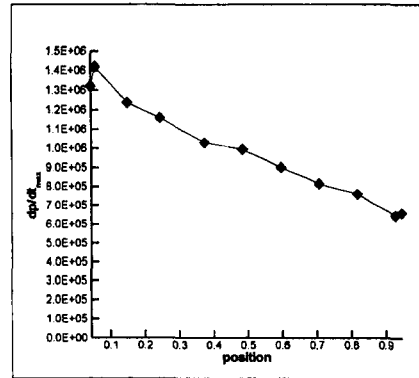
식 (2.13)에서 보는 바와 같이 원음장(far-field), 저주파 (low-frequency)의 경우 터널 출구에서 발생하는 미기압파의 최대값은 압축파의 기울기와 비례한다.[8]

$$P(t) = -\frac{2S}{\Omega rc} \left[ \frac{dp}{dt} \right] \quad \text{식(2.13)}$$

S는 터널의 단면적, c는 소리의 전파속도, r은 터널 출구로부터의 거리,  $\Omega$ 는 solid angle을, [ ]는 지연시간에서의 값을 의미한다.

위의 경우에 대해서 각 압력센서 위치에서의 압축파의 기울기의 최대값을 그림 8에 나타내었다. 실험 터널의 경우 바닥과 표면의 재질이 벨러스트 트랙에 가깝다고 볼 수 있으며 벨러스트 트랙은 저주파범위에서 효과적인 흡음재로 생각할 수 있다. 따라서 터널 내로 돌입하는

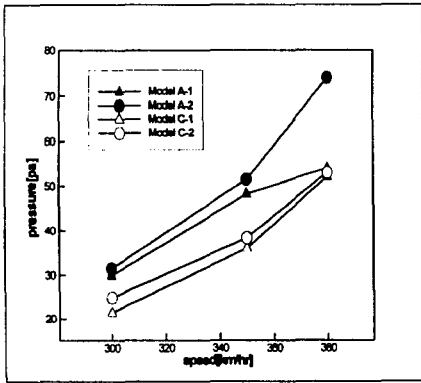
공기가 ballast track의 내부로 스며들어 압축파의 기울기가 급격하게 변하는 것을 막아주는 이산 (dispersion)작용과 소산 (dissipation)작용을 하게 되는데 압축파의 기울기의 최대값이 거리에 따라서 감소하고 있음을 볼 수 있다.



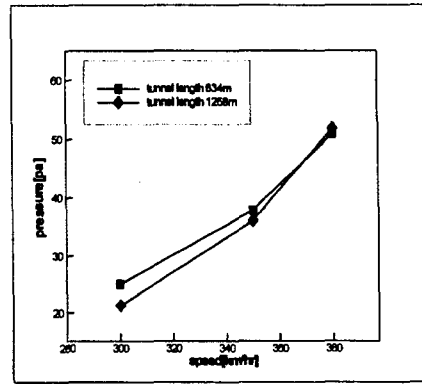
[그림 8] 압축파의 기울기 변화

### 3.2 열차의 전두부 형상과 속도변화, 단면적비에 의한 영향

그림 9에서는 각 모델에 대하여 속도를 변화시켜 가면서 미기압파의 변화를 측정된 그래프이다. 측정 마이크는 열차를 실물 모델로 하였을 때 출구로부터 20m, 중심축상에서 45도에 해당하는 곳에 위치하도록 하였다. 전체적인 경향성을 살펴보면 속도가 증가할수록 미기압파가 커지는 것을 볼 수 있다. A모델의 경우 단면적 비가 큰 A-2 모델이 A-1 모델에 비해 미기압파의 값이 큰 것을 볼 수 있다. 또한, 열차의 전두부의 형상이 긴 C 모델이 전두부의 형상이 뾰족한 A 모델에 비해 작은 미기압파를 발생시키는 것을 알 수 있다. 이것은 전두부에서의 완만한 단면적비 변화의 효과로 인한 것이다. 그리고 열차와 터널의 단면적비 (Blockage Ratio)의 효과가 A 모델에 비해 C 모델이 현저히 적게 나타나는 것을 볼 수 있다.



[그림 9] 열차 속도, 형상에 따른 미기압과



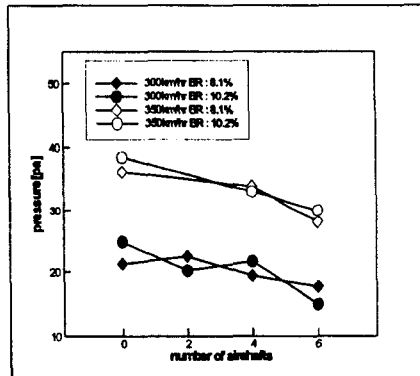
[그림 10] 터널길이에 따른 미기압과

### 3.3 터널 길이에 의한 영향

그림 10은 터널 길이를 변화시켜 가면서 음압의 변화를 측정한 것이다. 터널의 길이는 실제 모델 크기로 보았을 때 634m, 1268m에 해당한다. 터널의 길이가 긴 경우가 터널이 짧은 경우보다 미기압과의 강도가 약한 것을 알 수 있다. 이것은 터널의 재질이 벨러스트 트랙에 가깝기 때문으로 보인다. 바닥 재질의 특성에 의해 압축파의 비선형 효과보다 터널재질의 다공성에 기인한 압축파의 기울기가 감소하는 효과가 지배적으로 나타남에 의한 결과이다.

### 3.4 Air-shaft에 의한 영향

Air-shaft는 압축파의 강도를 줄이기 위해 터널 내부에 일정한 크기와 깊이로 홈을 만든 것이다. 이 실험에서는 터널의 앞부분에서부터 9%, 19%, 28% 위치와 터널의 끝 부분으로부터 같은 위치에 6개의 Air-shaft를 설치하였다. 그림 11에서 볼 수 있는 것과 같이 Air-shaft의 개수를 늘림에 따라 미기압과의 세기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.



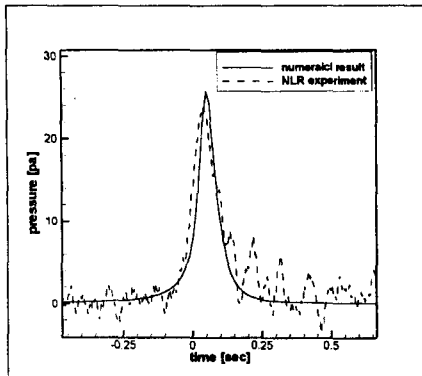
[그림 11] Air-shaft 에 따른 효과

### 3.5 수치해석 결과

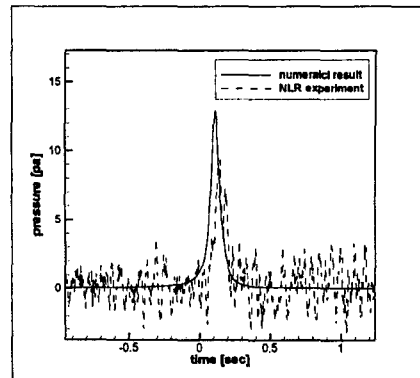
본 연구에서는 네덜란드 항공우주연구소와의 합동연구를 통한 터널 진·출입 소음실험결과와 앞서 언급한 이론을 바탕으로한 수치계산 결과를 비교해 보았다. 계산 조건은 실험조건과 동일하게, 즉 터널의 길이는 1253[m], 단면적비는 8.1%(model C), 열차의 속도는 300[km/h]로 계산하였다. 실험조건을 살펴보면 터널의 길이가 비교적 짧은 터널에 속하지만 압력의 시간 구배가 터널을 전파해가면서 점차적으로 감소하고 있으므로 계산시에는 벨



러스트 트랙 조건을 사용하였다. 그림 12와 13은 터널로부터 각각 20m, 40m 지점에서의 미기압파를 실험결과와 비교한 그림이다. 계산 결과가 실험 결과와 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



[그림 12] 터널로부터 20m 지점에서의 음압 비교



[그림 13] 터널로부터 40m 지점에서의 음압 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 네덜란드 항공우주연구소(NLR)의 터널진입 비정상 시험기를 이용하여 1/170 scale 축소모형시험을 수행하였으며 이와 더불어 일차원 가정을 이용한 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음(소닉붐)의 크기는 열차와 터널의 단면적비, 전두부 형상에 따라 변하게 되는데, 단면적비가 작을수록 또한 전두부 길이에 따른 단면적의 변화율이 적을수록 그 크기는 감소하게 된다.
- (2) 터널 길이에 의한 충격성 소음의 변화를 살펴볼 때, 밸러스트 트랙을 사용한다면 터널의 길이가 길어진다 하더라도 밸러스트 트랙의 소산작용으로 인해서 터널 내부의 압력의 변화율과 미기압파의 크기가 많이 감소함을 알 수 있다.
- (3) 고속전철 터널 진·출입 소음 문제도 적절한 수치해석 방법을 통해 만족할 만한 예측 결과를 얻을 수 있었다.

#### 후기

본 연구결과는 G7 고속전철기술개발사업 중 "II-1-3 공력설계, 해석기술 및 전두부 개발" 과제의 연구결과 중 일부임을 밝히는 바입니다.

#### 참고 문헌

- [1] Allan D. Pierce, ACOUSTICS, Acoustical Society of America, 1989.
- [2] S. Ozawa, "Studies of Micro-pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit", Railway Technical Research Report(Japan), No. 1121, 1979.
- [3] K. Matsuo, T. Aoki, S. Mashimo, and E. Nakatsu, "Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel", International Symposium of Aerodynamics and Ventilation Tunnels, Brighton, UK, Oct. 1997.

- [4] S. Ozawa, T. Maeda, T. Matsumura, K. Nakatani, K. Uchida, "Distortion of Compression Wave during Propagation along Shinkansen Tunnel", the 8th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, No. 12, 1994.
- [5] S. Ozawa, K. Murata, T. Maeda, "Effect of Ballasted Track on Distortion of Pressure Wave in Tunnel and Emission of Micro-pressure Wave", International Symposium of Aerodynamics and Ventilation Tunnels, Brighton, UK, Oct. 1997.
- [6] 吉川, 音響振動論, 1974.
- [7] L. E. Kinsler, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, 1982.
- [8] Yamamoto, A., "Micro-pressure wave Radiated from Tunnel exit", Reprint of Physical Society of Japan, No. 4, Spring, 4p-H-4, 1977.