

홀극음원 모델링을 이용한 고속전철 터널 충격성 소음해석

정원태, 윤태석, 이수갑

서울대학교, 기계항공공학부 공력소음 및 소음제어 실험실

Tunnel Sonic Boom Analysis using monopole source modeling

W.T. Jung, T.S. Yoon, S. Lee

AeroAcoustics & Noise control Laboratory,

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

wontae@plaza1.snu.ac.kr, tsyoon@plaza1.snu.ac.kr, solee@plaza.snu.ac.kr

Abstract

When a high-speed train enters a tunnel, a compression wave is generated. This wave subsequently emerges from the exit portal of the tunnel, which causes an impulsive noise called 'sonic boom' or 'micro-pressure wave'. In the present study, new method is presented for prediction of sonic boom noise, especially focusing on the effect of the nose shape of the train on the resultant noise. Acoustic theory for monopole source is used to represent a nose shape of the train in wave equation. Compression wave propagation in tunnel considering tunnel track condition and emission of sonic boom was calculated. The predicted compression waves and impulsive sound waves are compared with recent measurements, and show reasonable agreements.

1. 서론

고속전철에서 발생하는 공력소음은 주로 전두부, 연결부위, 열차하부, 창문등의 흠, 팬토그래프 및 커버소음 그리고 터널 진, 출입 관련소음으로 나눌 수 있다. 저속 영역에서는 차량 바퀴와 레일에서의 소음이 지배적이지만, 속도가 증가할수록 공력소음이 증가하게 되어 고속영역에서는 공력소음이 지배적인 소음원이 된다. 특히 독자개발 중인 한국형 고속 전철과 같이 최고속도가 350km/h에 달하는 고속 운행중의 터널 통과에 압력과 팽창파에 의한 승객의 불편감 유발, 선로 주변의 충격성 소음 문제 (소위 소닉붐 또는 미기압파)를 유발하게 되는데 특히 출구에서의 소음에 대한 심각성이 부각되고 있다. 출구에서의 소음 문제를 연구하는 궁극적인 목적은 바로 이러한 소음을 저감하는데 있을 것이다.

출구소음의 저감을 위해서는 우선적으로 출구에서의 유동특성을 정확히 파악하고 소음과 직접적인 관련을 갖는 압축파 (compression wave)의 크기에 영향을

미치는 요인들로는 어떤 것들이 있으며 또 그 요인들의 영향정도를 파악할 수 있는 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 터널 출구 충격성 소음에 대한 고속전철 전두부 형상의 영향을 고려할 수 있는 예측방법을 제시하였다. 이 기법은 3 가지 단계로 나누어지는데 첫째 단계는 터널로 진입하는 열차의 움직임을 음향이론의 단극자를 이용해 모델링하여 압축파를 예측하는 것이다. 두번째 단계에서는 터널내를 전파하는 압축파를 터널 벽면의 특성을 감안하여 계산하고 세번째 단계는 키르코프 공식을 이용하여 터널출구 충격성 소음을 예측하는 것이다. 네덜란드 항공우주연구소 (NLR)의 터널주행 비정상 시험기를 이용하여 수행한 소음실험 결과를 본 연구의 해석 방법의 검증에 사용하였다. 그리고 여러가지 파라미터변화에 대한 터널출구 미기압파의 변화를 살펴보았다.

이러한 연구는 고속전철의 터널 진출입시 발생하는 공력소음 문제에 대한 물리적인 현상의 이해뿐만 아니라 객차내부 승객의 이명 현상 및 출구충격성 소음 등을 최소화하기 위한 고속전철의 전두부 형상 설계와 터널 설계과정에서 유용한 도구가 될 수 있을 것이다.

2. 터널출구 충격성 소음 예측기법

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 수치적으로 해석하기 위해서 사용된 기존 연구 결과들을 살펴보면 Ozawa^{1,2} 등은 주로 경험식과 1 차원 가정에 의한 압축파 해석 및 충격성 소음을 예측하는데 중점을 두고 있다. 고속 전철의 터널진입으로 생성되는 압축파를 열차와 터널의 단면적비, 열차의 속도 등을 주된 매개변수로 하여 수치 해석하였는데 이러한 해석 결과들은 고속전철 전두부에 대한 형상 고려를 전혀 하지 않았기 때문에 저소음 고속전철의 전두부 설계기준으로 삼기에는 미흡하다. 한편 Maeda³⁻⁶ 등은 오일러방정식(Euler equation)으로 기본적인 타원형 포물형 원뿔형 면적분포를 갖는 축대칭 전두부 형상에 따른 터널입구에서의 압축파의 강도와 기율기에 대한 연구를 수행한바 있다. Howe⁷는 Maeda 등과 같은

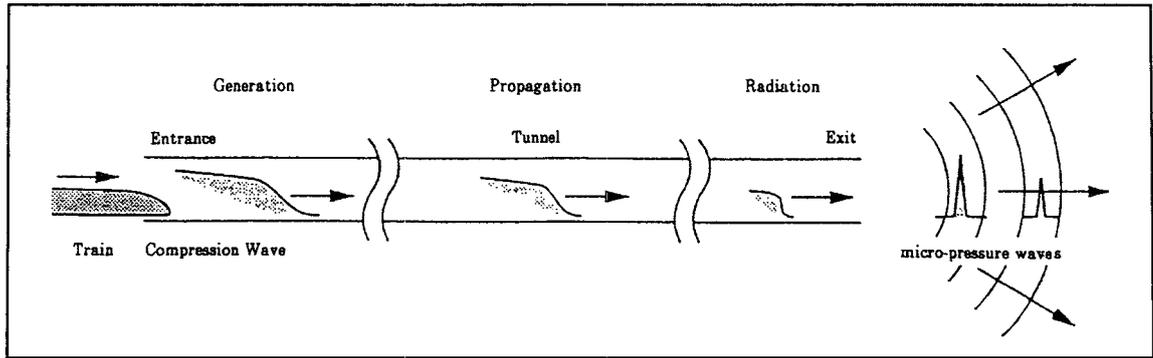


Fig. 1 압축파의 생성, 전파 그리고 방사

형상의 전두부 모델에 대하여 음파방정식(Wave equation)을 이용하여 입구 압축파를 예측하였다. 하지만 두 연구 모두 터널 출구 미기압파에 대한 직접적인 예측을 하지 않았다. 열차와 터널의 단면적비, 열차의 속도 등을 주된 매개변수로 하여 수치 해석하였는데 이러한 해석 결과들은 고속전철 전두부에 대한 형상 고려를 전혀 하지 않았기 때문에 저소음 고속전철의 전두부 설계기준으로 삼기에는 미흡하다. 한편 Maeda³⁻⁶ 등은 오일러방정식(Euler equation)으로 기본적인 타원형 포물형 원뿔형 단면분포를 갖는 축대칭 전두부 형상에 따른 터널입구에서의 압축파의 강도와 기울기에 대한 연구를 수행한바 있다. Howe⁷ 는 Maeda 등과 같은 형상의 전두부 모델에 대하여 음파방정식(Wave equation)을 이용하여 입구 압축파를 예측하였다. 하지만 두 연구 모두 터널 출구 미기압파에 대한 직접적인 예측을 하지 않았다.

본연구에서는 홀극음원 모델링을 이용 전두부 형상에 따른 터널 출구 미기압파에 대한 해석을 하고자 한다. 터널로 진입하는 열차의 전두부 형상을 홀극음원의 분포로 가정하고 음파 방정식을 사용하여 터널입구에서 발생하는 압축파의 파형 및 크기를 예측하였다. 압축파가 터널 내를 전파하면서 비선형 과정을 통해 변형되는 과정은 특성 곡선 기법 (method of characteristics) 을 이용하여 상사해 보았으며 마지막으로 출구에 도달한 압축파를 키르코프 공식(kirchhoff formulation)의 입력값으로 이용하여 터널출구에서의 미기압파를 구하였다.

2.1 홀극음원 모델링

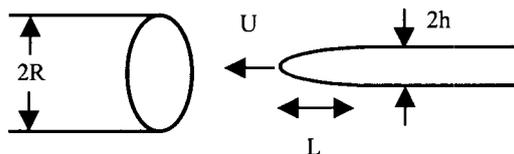


Fig. 2 축대칭 터널-열차 모델

열차의 형상은 세장형의 축대칭 형상으로 모델링하고, 터널은 반지름 R의 얇은 두께의 긴 원통형 실린더로

가정하였다. 터널로 진입하는 열차의 속도를 U 라 하고, 단면적은 앞에서부터 길이 L 인 지점에서 $A_0 \equiv \pi h^2$ 이 되도록 하였으며, 여기서 h 는 최대 반지름을 의미한다. 전두부의 형상은 충분히 유선형이고, 흐름의 박리가 일어나지 않도록 h/L 이 충분히 작다. 이러한 경우, 달리는 열차에 의한 공기의 움직임은 시간에 독립적이고, U 의 속도로 움직이는 홀극음원(monopole source)으로 나타낼 수 있다.

그리고 열차와 터널의 단면적비 A_0/A 가 작은 경우에는 음원을 열차의 중심축에 위치하는 선음원(line source)으로 볼 수 있다.

$$q(\mathbf{x}) = UA_0 Q(x) \delta(y) \delta(z),$$

$$Q(x) = \frac{1}{A_0} \frac{\partial A_T}{\partial x}(x) \quad (1)$$

여기서 $A_T(x)$ 는 위치 x 에서의 열차의 단면적이다. 홀극음원에 의한 공기의 움직임은 다음의 음파 방정식(wave equation)을 만족시키는 속도 포텐셜 $\phi(\mathbf{x}, t)$ 로 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) \phi = -q(\mathbf{x} + U\mathbf{t}, y, z) \quad (2)$$

위 방정식의 해는 다음과 같이 표시된다.

$$\phi(\mathbf{x}, t) = -\iint G(\mathbf{x}, \mathbf{x}'; t - \tau) q(\mathbf{x}', \tau) d^3 \mathbf{x}' d\tau \quad (3)$$

여기서 그린함수 (Green's function) $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}'; t - \tau)$ 은 식(4)의 우변이 $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')\delta(t - \tau)$ 이 되었을때의 해로써 \mathbf{x}, \mathbf{x}' 이 벽면위의 점일때는 다음 조건 $\partial G / \partial x_n = 0$, $\partial G / \partial x'_n = 0$ 을 만족하여야 한다. 터널로 진입하는 열차에 의한 압력파 $p(x, t)$ 와 포텐셜 ϕ 사이에는 $p = -\rho_0 \partial \phi / \partial t$ 의 관계가 성립한다. 위의 식은 터널내에서 진행되는 압축파가 비선형적으로 파면의 경사가 급격해지는 현상을 무시할때만 적용이 가능하다.

하지만 그러한 비선형성은 압축파가 먼 거리를 전파해 나간 다음에야 영향을 미치는 요소이므로 비선형적인 압축파의 변형은 무시가능하다.

2.2 터널내 압축파의 전파

터널내를 진행하는 압축파의 변형에 영향을 주는 변수로는 터널 바닥의 재질, 터널내의 구조물등을 들 수 있다. 터널 바닥의 재질은 크게 슬라브 트랙 (Slab track)과 벨러스트 트랙 (ballast track) 의 두 가지로 나눌 수 있다. 슬라브 트랙의 경우 압축파의 기울기가 비선형 효과에 의해 터널 내를 전파할수록 더욱 더 급격해지는데 반하여 벨러스트 트랙에서는 터널 벽면에서 마찰에 의한 감쇠효과가 현저하게 나타나기 때문에 그 구배가 많이 약해진다. 터널 내를 전파하는 압축파가 비선형 과정을 통해 변형되는 기본 식은 다음과 같다.¹

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(c_0 + \frac{\gamma+1}{2} u \right) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \left(f + \frac{m c_0}{\rho_0 A} \right) \quad (4)$$

여기서 u 는 압축파에 수반되는 공기의 속도, f 는 터널 벽에서의 마찰력, 그리고 m 는 터널의 단위길이당 터널에서 벨러스트 트랙을 통과하는 공기의 질량유량을 의미한다.

터널벽에서의 마찰력 f 는 압축파의 진행방향이 열차의 진행방향일때 다음과 같이 쓸 수 있다.¹

$$f = - \left(\frac{\lambda}{2d_H} u^2 + \frac{4\tau_v}{\rho d_H} \right) \quad (5)$$

우변의 첫번째 항은 정상 유동에서의 마찰력을 의미하며 λ 와 d_H 는 터널의 수력직경을 의미하며 두번째 항은 층류 또는 난류에서 비정상 유동의 마찰력을 의미하는 항으로 Matuso 에 의해서 압축파의 감쇠가 연구되었다.⁸

앞서 언급한 바와 같이 식의 우변의 두번째 항은 벨러스트 트랙의 특성 다공성을 모델링한 항을 의미하며 질량유량은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\dot{m} = -\rho_0 v b \quad (6)$$

여기서 v 는 벨러스트 트랙 표면에 수직인 공기 속도 ($v > 0$ 은 터널에서 트랙으로의 공기의 투과를 의미한다.)이며 트랙면에 수직인 속도 v 는 벨러스트 트랙의 음향임피던스(acoustic impedance)에 관하여 터널내의 압력 p 와 관계와 있다. 벨러스트 트랙은 다공성의 흡음체로서 모델링할 수 있는데 흡음체가 매우 얇고 수직 입사하는 파의 주파수가 상대적으로 낮다면 벨러스트 트랙면에서의 압력 p 와 속도 v 의 관계는 다음과 같다.⁹

$$p = \left(i\omega \frac{1}{3} \frac{\xi \rho_0}{\varepsilon} h + \frac{1}{3} r h + \frac{\rho_0 c_0^2}{i\omega r h \varepsilon} \right) v \quad (7)$$

여기서 r 은 유동의 저항(flow resistivity), ξ 는 질량계수, h 는 벨러스트 트랙의 두께, ε 은 다공성(porosity), 그리고 i 는 복소수를 의미한다. 벨러스트 트랙의 음향학적 모델은 다음 그림과 같이 나타나 있다. 식(6)은 식(7)으로 다시 쓸 수 있다.

$$p = \rho_0 c_0 \left(A_L \frac{\partial v}{\partial t} + A_R v + A_C \int_0^t v d\tau \right) \\ A_L = \frac{1}{3} \left\{ \frac{\xi h}{\alpha_0} \right\}, A_R = \frac{1}{3} \left\{ \frac{r h}{\rho_0 c_0} \right\}, A_C = \left\{ \frac{c_0}{\gamma h \varepsilon} \right\} \quad (8)$$

식(4)의 우변의 두번째 항은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{m c_0}{\rho_0 A} \approx \alpha c_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \quad (9)$$

여기서 계수 α, ν, β 는 벨러스트 트랙의 두께(h)와 폭(b_s), 유동의 저항성 r , 다공성 ε , 질량계수 ξ , 그리고 터널의 단면적등에 의존한다.¹⁰

그리고 식(9)를 식(4)에 대입하면 다음과 같은 터널 내를 전파하는 압축파의 파면 변형을 고려하는 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(\left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) c_0 + \frac{\gamma+1}{2} u \right) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \left(f + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right) \quad (10)$$

2.3 터널출구 충격성 소음

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 예측하는 방법으로서 키르코프 이론을 사용하였다. 정지된 표면에 대한 키르코프 적분 공식은 호이겐스 원리의 해석해와 같다. 본 연구에서는 선형(linear) 키르코프 공식을 사용하였는데 다음과 같다.^{11,12}

$$p'(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi s} \iint \left[\frac{\cos\theta}{r^2} p - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{\cos\theta}{a_n r} \frac{\partial p}{\partial \tau} \right] dS(\vec{y}, \tau) \quad (11)$$

여기서 p' 은 음압(acoustic pressure)이고 (\vec{x}, t) 는 관찰자의 위치와 시간, (\vec{y}, τ) 는 음원의 위치와 지연시간(retarded time) 변수를 의미한다. 식(3)의 중괄호안의 압력과 그의 미분은 지연시간에서 계산된다. 적분은 유동장의 정보를 포함할 수 있는 키르코프면(혹은 제어면) 상에서 행해지는데 본 연구에서는 터널출구를 선택하여 적분을 수행하였다.

또한 터널출구 지면에서의 음파의 반사효과를 고려하기 위하여 터널출구의 이미지를 넣었다. 바닥

에서의 음파의 흡수는 바닥재질의 흡음계수(sound absorption coefficient) 를 이용하여 계산해주었다.

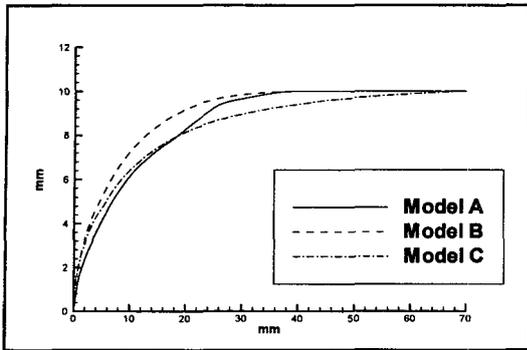


Fig. 3 전두부 형상모델

3. 수치해석 결과 및 검증

3.1 검증모델

네덜란드 항공우주연구소의 터널주행 비정상 시험기를 이용하여 수행한 소음실험 결과를 본 연구의 해석 방법의 검증에 사용하였다. 사용된 실험 모델은 전체 길이 2.34m 에 단면 지름 20mm 의 축대칭 물체이다. 전두부 부분은 TGV 와 KHST (한국형 고속전철) 의 후보형상 2 개등 총 3 개의 형상에 대하여 전두부의 면적분포가 일치하도록 반지름의 분포를 결정하였다. 터널의 면적은 기존 TGV 선로 터널인 85m² 와 경부고속전철의 터널 면적인 107m² 두 가지를 축소비에 맞게 계산하여 사용하였다. 시험 모델의 전두부 형상은 그림 3 에 나타나 있다. 한편, 터널 모델의 단면은 직사각형 형태를 띠고 있다.

3.2 터널출구 충격성 소음의 예측 및 검증

그림 4 는 홀극음원 모델링에 의한 결과를 실험치와 비교한 그림이다. 실험치는 열차와 터널의 단면적비가 0.081 인 실험모델 C 가 300km/hr 의 속도로 터널에 진입시 터널입구로부터 전체 길이의 4.3% 위치에서의 압력측정값이다. 홀극음원 모델은 실험치보다 약간 압력의 구배가 완만하고 그 절대값도 작은 것을 볼 수 있는데 이는 터널로 진입하는 열차의 형상을 축상의 한 점에 집중된 홀극음원 분포로 모델링하는데 있어서의 오차로 볼 수 있다. 출구 미기압파에 결정적인 영향을 미치는 압축파의 기울기는 대체적으로 실험치와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음의 예측에는 앞서 언급한 키르코프 공식을 사용하였고 이를 그림 5 에 실험결과와 비교하였다. 수치해석의 검증 모델은 C 모델이고 열차의 속도가 300km/h, 열차와 터널의 단면적비가 0.081 이다. 그리고 터널의 길이는 실제모델 크기로 보았을 때 1268m 에 해당한다. 충격성 소음 예측 지점은 터널 출구로부터 실제 모델로 보았을 때 20m 자점이고 터널중심축과 이루는 각도는 45 도이다.

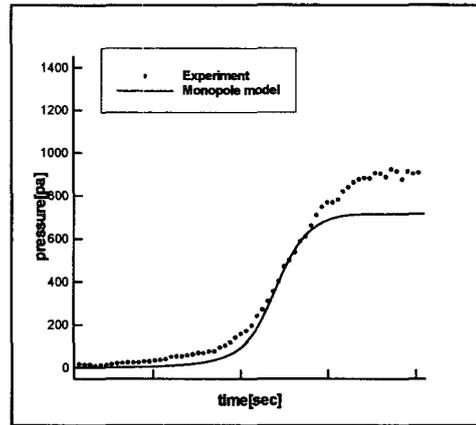


Fig 4. 터널입구 압축파의 비교 (300km/hr, 단면적비 0.081)

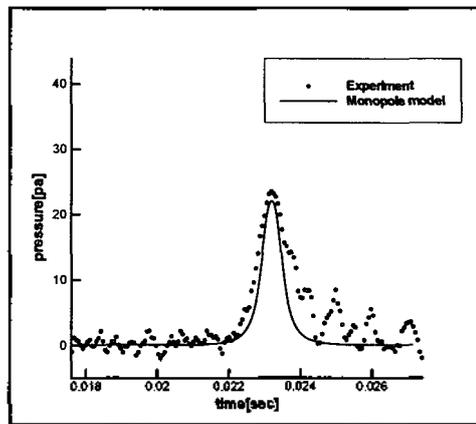


Fig. 5 터널출구 미기압파의 비교 (300km/hr, 단면적비 0.081, 거리 20m)

실험결과와 예측결과를 비교해보면 충격성 소음의 최대값을 거의 일치하게 잘 예측하고 있음을 잘 보여주고 있다.

3.3 터널충격성 소음에 영향을 주는 파라미터

터널 출구 충격성소음의 크기에 영향을 미치는 요인으로는 전두부의 형상, 열차와 터널의 단면적비, 열차의 속도, 터널바닥의 재질등 여러가지를 들 수 있다. 그림 6 은 열차 전두부 형상에 따른 출구 미기압파의 강도를 비교한 그림이다. 비교적 세장비가 길고 앞부분이 뾰족하고 뒷부분에서의 면적변화가 작은 모델 C가 가장 좋은 특성을 보여주는 것을 볼 수 있다.

그림 7 은 열차의 속도에 따른 미기압파의 변화를 나타낸 그림이다. 300 km/hr, 350 km/hr 의 속도로 변화시키면서 살펴보았는데 속도가 증가할수록 미기압파의 강도가 강해지는 것을 확인할 수 있다. 그림 8 은 터널에 대한 열차의 면적비가 터널출구 미기압파에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 면적비가 증가할수록 터널 출구 미기압파의 강도가 강해지는 것을 볼 수 있다.

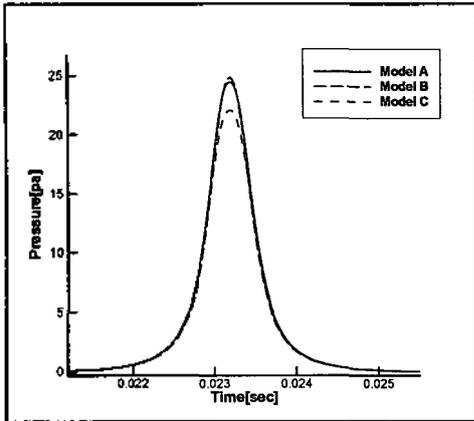


Fig. 6 전두부 형상에 따른 미기압파 (300km/hr, 단면적비 0.081, 거리 20m)

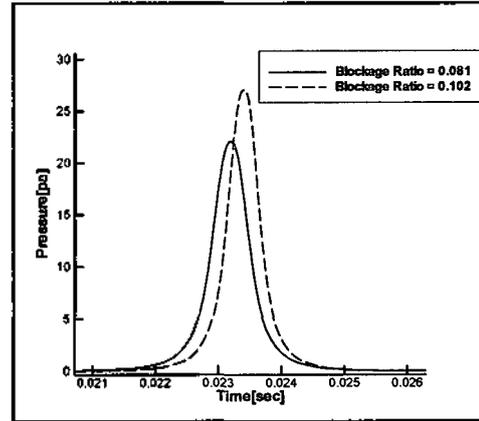


Fig. 8 단면적비변화에 따른 미기압파 (300km/hr, 거리 20m)

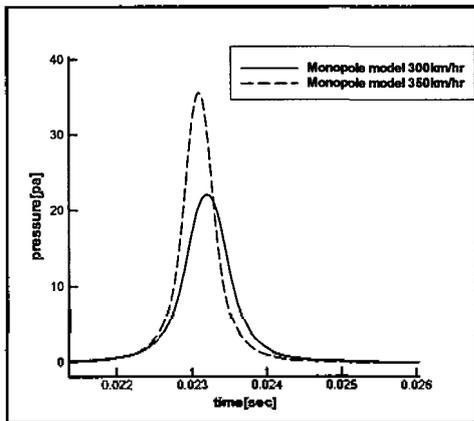


Fig. 7 속도변화에 따른 미기압파 (단면적비 0.081, 거리 20m)

4. 결론

본 연구에서는 음향 이론의 단극자 해석을 통한 방법을 사용하여 전두부 형상 변화를 고려한 고속전철의 터널출구 충격성 소음을 예측하였고 이를 실험결과와 비교하여 이러한 방법들이 압축파의 형성, 전파 및 충격성 소음의 방사등을 효과적으로 예측하는 것을 보여주었다. 차후 이러한 방법을 통하여 고속전철의 터널 진출입시 발생하는 공력소음 문제에 대한 물리적인 현상의 이해뿐만 아니라 객차내부 승객의 이명 현상 및 출구 충격소음 등을 최소화 하기위한 고속전철의 전두부 형상설계 및 터널 설계과정에 효과적으로 사용될 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

1. S. Ozawa, "Studies of Micro-pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit," Railway Technical Research Report(Japan), No. 1121, 1979.
2. 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
3. T. Maeda, T. Matsumura, M. Iida, K. Nakatani, K. Uchida, "Effect of shape of train Nose on Compression Generated by Train Entering Tunnel," The international conference on speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, 1993.
4. M. Iida, T. Matsumura, K. Nakatani, T. Fukuda and T. Maeda, "Effective Nose shape for Reducing Tunnel Sonic Boom," QR of RTRI(Japan), Vol. 38, No. 4, Nov., 1997
5. M. Iida, "Numerical Simulation of Compression Wave Generation in Tunnels during Train Nose Entry," RTRI Report(Japan), Vol. 8, No. 6, pp.25-30, 1994.
6. M. Iida, K. Matsumura, K. Nakatani, K. Fukuda and T. Maeda, "Optimum Nose Shape for Reducing Tunnel Sonic Boom," International Railway Conference on Better Journey Time-Better Business, Stech'96, ImechE, 1996.
7. M.S.Howe, "Mach Number Dependence of the Compression Wave Generated by a High-speed Train Entering a Tunnel," Journal of Sound and Vibration, No. 212, 1998.
8. K. Matsuo, T. Aoki, T. Kashimura, H. Kawaguchi, and M. Takeuti, "Proceeding of The 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp239-252, 1991.

9. 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.
10. 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.
11. B. B. Baker and E. T. Copson, "The Mathematical Theory of Huygen's principle," Oxford, 1953.
12. S. Lee, J. Kim, Y. H. Yu, and M. P. Isom, "Prediction of Rotor High-Speed Impulsive Noise with a Combined CFD-Kirchhoff Method," Journal of Sound and Vibration, Vol. 207(4), pp453-464, 1997.