2686 大韓機械學會論文集 第18卷 第10號, pp. 2686~2697, 1994

〈論 文〉

고속철도 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 충격파관의 연구(1)
—압축파의 특성에 대하여—

김희동* · 松尾一泰**

(1994년 2월 26일 접수)

Study of Shock Tube for Wave Phenomenon in High Speed Railway Tunnel (1)
— On the characteristics of Compression Wave —

Heuy-Dong Kim and Kazuyasu Matsuo

Key Words: Aerodynamic Acoustics(공력음향), Compressible Flow(압축성흐름), Compression Wave(압축파), High Speed Railway(고속철도), Impulsive Noise(충격소음), Shock Tube(충격파관), Unsteady Flow(비정상흐름)

Abstract

When a railway train enters a tunnel at high speed, a compression wave is formed in front of the train and propagates along the tunnel. The compression wave subsequently emerges from the exit of the tunnel, which causes an impulsive noise. In order to estimate the magnitudes of the noises and to effectively minimize them, the characteristics of the compression wave propagating in a tunnel must be understood. In the present paper, the experimental and analytical investigations on the attenuation and distortion of the propagating compression waves were carried out using a model tunnel. This facility is a kind of open-ended shock tube with a fast-opening gate valve instead of a general diaphragm. One-dimensional flow model employed in the present study could appropriately predict the strength of the compression wave, Mach number and flow velocity induced by the compression wave. The experimental results show that the strength of a compression wave decreases with the distance from the tunnel entrance. The decreasing rate of the wave strength and pressure gradient in the wave is strongly dependent on the strength of the initial compression wave at the tunnel entrance.

1. 서 론

열차가 고속으로 터널로 돌입하게 되는 경우, 터널 출구에서 충격음에 가까운 소음이 발생하여, 부근 주택의 창틀, 혹은 다른 구조물을 심하게 진동시켜 주민들의 생활에 큰 불편을 초래하고 있는 사례는 쉽게 체험할 수 있다. 이러한 터널 소음의 특징은 그것이 어떠한 예고도 없이 급작스레 발생하고, 또 그의 음압레벨(sound pressure level ; SPL)이 매우 크다는 점을 들 수 있다. 최근 고속철도 터널의 출구에서 발생하는 충격성 소음(impusive noise)문제[1]에 대해 큰 관심을 모으고 있으며, 소음의 적절한 저감대책을 서두르고 있는 실정이다.

김희동[2]에 의하여 소개된 바와 같이, 열차가 고속으로 터널로 돌입하게 되는 경우, 열차의 전면에 발생하는 압축파(compression wave)가 터널내를 전파하여 출구에 이르게 된다. 이때, 터널 출구로

*정회원, 안동대학교 기계공학과
**九州大學 總合理工學研究科

부터 압축된 공기가 급격하게 방출하게 되므로 충격성 소음이 발생하게 된다. 이것은 고속철도 관계자들 사이에서 미기압파(微氣壓波, impulsive wave)로 불리워지고 있으며, 이 미기압파에 수반된 직접적인 음을 공기압음이라고 부르고 있다.[3] 실제 고속철도 터널에서 발생하는 미기압파에 대한 종래의 연구결과[4]에 의하면, 비교적 긴(5~10 km) 슬라브궤도 터널(Slab track tunnel ; STT)로 열차가 돌입(속도 약 200 km/h)하는 경우에 발생되는 압축파는 터널내를 전파함에 따라 그의 파면(wave front)이 점차로 급격하게 되며, 또 미기압파의 강도는 터널 출구에 도착한 압축파 파면에서의 압력구배(pressure gradient)에 거의 비례한다고 보고하고 있다. 이와 같은 연구결과를 기초로 한 미기압파 저감대책은 가능하면 터널내부를 전파하는 압축파 파면의 압력구배를 완만하게 하는 방향으로 전개되어 다음과 같은 대책이 제안되고 있다.

(1) 터널 입구에 후드 등을 설치하여, 열차가 터널에 돌입하는 것에 의하여 생기게 되는 압축파의 파면의 압력구배를 처음부터 작게 한다.

(2) 터널 내의 압축된 공기를 터널 외부로 축출할 수 있는 구멍 혹은 갱도를 설치한다.

(3) 터널 내에 액적을 분무한다든지, 선로의 밸러스트(ballast)를 적절하게 이용하거나, 터널벽에 흡음재를 적용시키는 등의 방법을 이용하여, 터널내를 전파하는 압축파를 감쇄시킨다.

(4) 터널벽에 반사판을 설치하여 에너지 소산효과(dissipation effect)를 크게 한다.

(5) 발생된 미기압파를 터널 출구 부근에서 적절하게 제어한다.

위에 열거한 미기압파 저감대책들은 경제성이나 작업성 등을 고려할 때, 실제로 불리한 점이 매우 많으며, 열차의 속도가 더욱 빨라지게 되는 경우에도 적용성이 충분히 검토되어야 한다. 이러한 관점으로부터 미기압파의 저감에 대한 보다 더 효과적인 대책을 실시하기 위해서는 터널 내에서 형성되는 압축파의 특성을 충분히 이해할 필요가 있다.

본 논문에서는 고속철도 터널에서 발생하는 미기압파에 대한 기초적 연구의 일환으로써, 실제 터널내에서 형성되는 압축파의 특성에 관한 모형실험 및 이론적 연구결과에 대하여 기술한다. 실험적 연구에서는, 모형실험을 위하여 먼저 실제의 터널과 모형과의 상사조건을 검토하였으며, 등가직경 23.6 mm, 길이 20.4 m의 터널 모형장치를 제작하여, 터널 입구에서 형성되는 압축파가 터널내를 전파할 때, 압축파 강도의 변화와 압축파의 폭 및 파면에서의 압력구배가 거리에 따라 어떻게 변화해 가는가를 실험적으로 조사하였다. 또 이론적 연구에서는 열차의 돌입에 의해 터널 입구에 형성되는 압축파의 강도와 열차의 속도의 관계에 대하여 간단한 일차원 흐름모델을 적용하여 해석하였다.

2. 모형의 상사조건

열차가 터널에 돌입할 때, 터널 내부에서 발생하는 압축파의 거동 및 특성을 모형실험으로 시뮬레이션하기 위하여서는, 먼저 실제흐름과 모형실험에서의 흐름이 역학적으로 상사(similarity)가 되는 것이 필요하다. 본 연구에서 실제흐름은 일본의 산양신간센의 터널을 대상으로 하였으며, 그의 터널 단면적은 63.4 m², 등가직경은 약 9.0 m 이다. 여기에서는 이와 같은 큰 터널을 실험실의 작은 모형장치로 시뮬레이션하기 위한 이론적 상사조건에 대하여 기술하기로 한다.

먼저 간단하게 하기 위하여 유체의 점성과 열전도성을 무시하여, 단면적이 일정한 관내의 일차원 비정상흐름에 대한 지배방정식은 다음과 같은 식(1)~(3)으로 주어진다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(p+\rho u^2)}{\partial x}=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left\{\rho\left(e+\frac{u^2}{2}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho u\left(e+\frac{p}{\rho}+\frac{u^2}{2}\right)\right\}=0 \tag{3}$$

여기에서, p는 압력, ρ는 밀도, u는 속도, e는 유체의 내부에너지이며, 독립변수 x와 t는 각각 거리와 시간을 나타낸다.

거리 x를 터널 혹은 모형장치의 등가직경 D로, 유속을 대기중의 음속 a_1으로, 압력 p를 대기압 p_1으로, 밀도 ρ를 마찬가지로 대기상태의 밀도 ρ_1으로, 또 시간 t를 무차원 시간 D/a_1로써 각각 무차원화하면,

$$p'=\frac{p}{p_1},\quad \rho'=\frac{\rho}{\rho_1},\quad u'=\frac{u}{a_1\sqrt{\gamma}},\quad x'=\frac{x}{D}$$

$$t'=\frac{t}{D/a_1}\left(\frac{1}{\sqrt{\gamma}}\right) \tag{4}$$

위식에서 γ는 공기의 비열비이다. 식(1)~(3)에

위의 무차원값들을 적용시키면 다음과 같은 식(5)~(7)들을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho')}{\partial t'}+\frac{\partial(\rho' u')}{\partial x'}=0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho' u')}{\partial t'}+\frac{\partial(\rho'+\rho' u'^2)}{\partial x'}=0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t'}\left\{\rho'\left(e'+\frac{u'^2}{2}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial x'}\left\{\rho' u'\left(e'+\frac{p'}{\rho'}+\frac{u'^2}{2}\right)\right\}=0 \tag{7}$$

위의 식(5)~(7)들은 모두 무차원수 방정식이므로, 관내에서의 마찰 및 열전도의 효과를 무시한다면, 실제의 터널 내부와 모형장치 내에서의 압축파의 거동 및 특성은 식(4)의 무차원수들을 맞추어 줌으로써 서로 상사가 될 수 있다. 구체적으로 터널의 등가직경은 $D=9$ m이고, 다음 절에서 기술하는 바와 같이 모형장치의 등가직경 $D=23.6$ mm이기 때문에, 이들의 비는 다음과 같이 된다.

$$D_{tunnel}/D_{model}=9000/23.6=381 \tag{8}$$

따라서, 실제로 열차가 터널에 돌입함으로써 발생하는 압축파가 터널 입구로부터 1 km만큼 전파했을 때, 모형장치에서의 압축파는 식(4)에 의하여

$$x_{model}=(x/D)_{tunnel}\times D_{model}$$
$$=(1000/9)\times 0.0236=2.62\text{ m}$$

만큼 전파한 것에 대응한다. 또한 경과시간 t에 대해서도 마찬가지로 식(4)에 의하여

$$\left(\frac{t}{D/a_1}\right)_{model}=\left(\frac{t}{D/a_1}\right)_{tunnel} \tag{9}$$

로 된다. 즉, 실제 터널에서 압축파가 거리 1 km를 전파하는데 약 3 sec정도 소요된다고 하면, 모형에서는 같은 거리를 전파하는데 3×23.6가 요하게 되며, 거리 2.62 m를 전파하는 데에는 약 0.185 sec정도 소요된다는 것을 알 수 있다.

3. 실험장치

3.1 터널 모형

본 연구에서 고속철도 터널의 모형으로 사용된 충격파관(shock tube) 및 측정계의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 충격파관의 고압실(high pressure chamber)은 내경 40 mm, 길이 12 m의 PVC원관으로 되어 있으며, 이 고압실의 내부에는 대기압보다 높은 압력 p_4의 구동기체(driver gas) 공기를 충진한다. 저압실(low pressure chamber)은 단면적 19×31 mm(등가직경 $D=23.6$ mm)의 사각단면의 관으로 되어 있으며, 길이는 20.4 m이다. 저압실의 한쪽 끝은 대기에 개방되어 있으며, 따라서 저압실 내부의 기체는 대기압 상태의 공기이다. 이 저압실은 정압공을 가지는 9개의 관(길이 1.0 m×2개, 길이 1.2 m×2개, 길이 1.6 m×5개로 구성되어 총 길이 12.4 m)과 정압공을 포함하지 않는 2개의 관(길이 4.0 m×2개로 총 길이 8.0 m)이 직렬로 연결되어 있다. 정압공을 가지지 않는 8 m의 관과 고압실 12 m의 길이는 각각 압력측정시 저압실의 개구단(open end)으로부터 반사되는 팽창파가 측정압력에 영향을 끼치지 않도록 하게 하고, 또 고압실의 관단으로부터 반사파의 영향을 없애기 위한 길이로써 선택되었다. 정압공을 가지는 관의 길이 12.4 m는 등가직경(23.6 mm)의 525배 정도이며, 이 길이는 단순하게 실제 터널의 등가직경 9 m를 525배로 하여 약 4.7 km에 상당하게 된다.

저압실의 측벽에는 25개의 정압공이 설치되어 있으며, 각각의 정압공에 대하여 고압실에 가까운 것

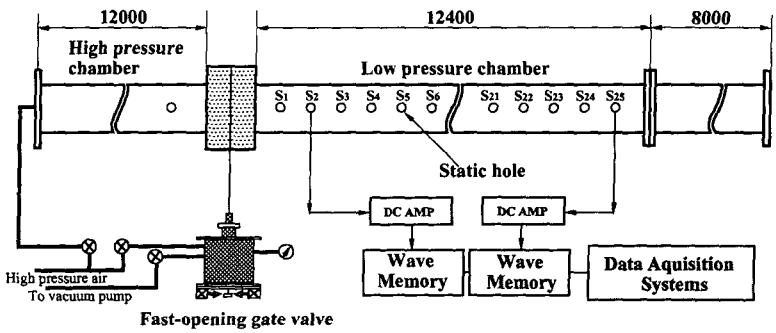


Fig. 1 Schematic diagram of shock tube for wave phenomenon in high speed railway tunnel

부터 차례로 이하 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, ····· S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{25}라 정한다. 정압공 S2에는 반도체형 압력센서(Toyoda PMS-5)가 설치되어 있으며, 이것에 의하여 압축파의 초기파형을 측정한다. 또 S_2로 부터 하류쪽의 정압공에는 압력센서(Kulite XCS-190-5)가 설치되어, 관내를 전파하는 압축파의 파형을 측정할 수 있도록 되어 있다. 실험은 다음절에서 기술하는 바와 같이, 고압실과 저압실 사이의 급속개구 밸브를 열 때 발생하는 압축파를 측정하여, 그의 거동과 특성을 조사하였다.

3.2 급속개구 밸브

본 연구의 모형실험에서는 통상적으로 사용되는 충격파관의 격막(diaphragm) 대신 급속개구 밸브(fast-opening gate valve ; FOGV)를 사용하였다. 이것은 일명 충격밸브(shock valve)라고도 불리워지고 있으며, 격막장치에 비해 비교적 안정한 압축파를 발생시킬 수 있고, 개구시간(opening time)을 어느 정도 조절할 수 있으므로, 다른 형태의 파면을 가진 압축파를 용이하게 얻을 수 있다는 장점을 지니고 있다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용된 FOGV를 나타낸다. 먼저 작동압실(actuating chamber)을 부압으로 하게 되면, 피스톤은 윗쪽으로 움직이게 되어 밸브판이 고압실과 측정부를 차단하는 위치로 이동하며, 피스톤 하단의 후크가 셑트된다. 이때, 작동

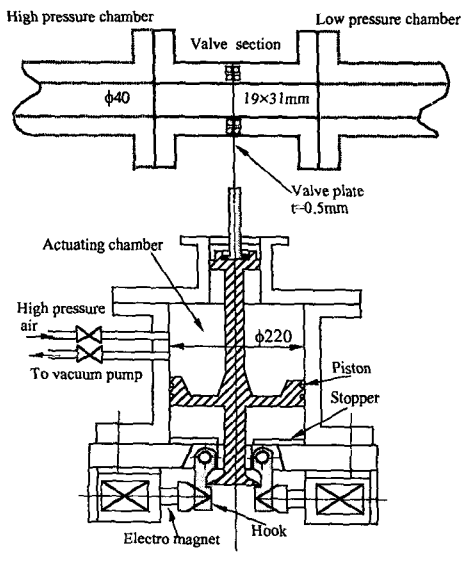


Fig. 2 Schematic diagram of fast-opening gate valve

압실에 소정의 고압공기를 주입한 다음, 전자석에 전류를 통하게 하여 피스톤 하단의 후크를 떼어 내도록 하면, 피스톤과 밸브판 사이의 좁은 간격만큼 피스톤이 아랫쪽으로 움직인 후, 밸브판은 피스톤과 일체로 된 상태에서 급격하게 아랫쪽으로 이동하게 된다. 그 결과, 고압실의 기체가 저압실인 측정부로 방출되어, 그 전방에 측정부를 전파하는 압축파가 형성된다. 즉, 고압실의 공기는 고속철도 터널에 돌입하는 열차의 선두 부분을 시뮬레이션하게 된다. 한편, 밸브판은 피스톤이 하강할 때, 고무재질의 스톱퍼에 충돌하여 멈추도록 되어 있다. 밸브판의 움직임을 측정하기 위하여, 밸브판의 끝단에 일정한 주기로 발광하도록 되어 있는 발광 다이오우드를 고정시켜, 밸브의 이동에 의한 발광 다이오우드(diode)의 위치의 변화를 카메라로 촬영하였다. 이와 같이 측정한 밸브판의 이동거리 x_v의 시간변화의 일례를 Fig. 3에 나타내었다. 그림 중의 실험 데이터는 모두 고압실의 초기 압력 p_4를 대기압(게이지 압력)으로 한 경우이며, 파라메터로써 작동압실의 초기 압력(게이지 압력) p_v을 변화시켰다. 또 이론결과와의 비교를 위하여 수치계산에 의한 결과[5]를 실선으로 나타내었다. 그림으로부터 작동압실의 압력 p_v가 크게 되면, 밸브판의 이동속도는 증가하며, 비록 경향에 있어서는 일치

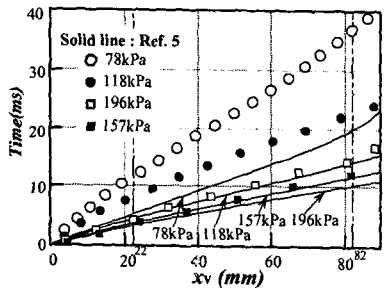


Fig. 3 Time-distance history for valve plate

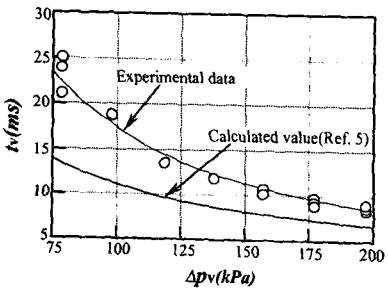


Fig. 4 Opening time of valve plate of FOGV

하고 있지만, 실험값과 이론값[5] 사이에 큰 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 문헌[5]의 계산에서 밸브판 및 피스톤 내벽과의 마찰력을 고려하지 않은 때문이라고 생각된다. 또한 그림중에서 $x=22$ mm 및 $x=82$ mm 위치의 일점쇄선은 각각 밸브판의 개구 개시위치 및 전개위치를 나타내며, 따라서 이들 사이의 밸브판의 이동시간이 FOGV의 개구시간 t_v로 된다.

Fig. 4는 밸브판의 개구시간 t_v의 실험값과 이론값[5]의 비교를 나타낸다. 그림으로부터 개구시간 t_v는 작동압실의 초기압력 p_v가 클수록 감소하여, 어떤 일정치로 점근하는 경향을 알 수 있다. 또 실험값과 이론값 사이의 차이는 p_v가 작은 경우에 크게 나타나며, p_v가 증가할수록 작아지고 있다. 이것은 p_v가 클수록 작동압실의 압력에 의한 피스톤의 구동력이 밸브판 및 피스톤 내벽과의 마찰력에 비해 상대적으로 크게 되기 때문이다.

3.3 압력측정

압력측정을 위하여 사용된 압력센서는 두 종류(Toyoda PMS-5H와 Kulite XCS-190-5)로써, 이들은 각각 공진주파수(natural frequency) 15 kHz와 150 kHz였다. Toyoda센서의 감도는 7.8 mv/(N/m)²였으며, ±1%이하의 최대 비선형성(Non-linearity) 및 히스테리시스(Hysteresis)를 보유했다. 또 Kulite 센서는 ±0.3%이하의 히스테리시스를 가진다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 정압공에 설치한 압력센서로 부터의 전기적인 출력은 전압치로 증폭된 후 wave memory에 저장된다. 디지털화된 전압치를 퍼스널컴퓨터로 입력하여, 이들 값으로 부터 간단한 계산을 수행하여, 각 측정점에서의 압축파의 강도(strength of compression wave), 압축파의 폭(width of compression wave) 및 압축파의 파면에서의 압력구배 등을 얻을 수 있다. 한편, FOGV로부터 바로 하류인 측정점 S_1에서는 밸브의 열림에 의하여 상당한 난도(turbulence)를 가진 흐름이 예상되므로, 이것 보다 하류의 측정점 S_2의 점을 기준점, 즉 원점으로 하여, 흐름방향의 거리를 x로 정하였다.

4. 일차원 흐름모델에 의한 해석

4.1 흐름모델

열차가 터널에 돌입할 때 발생하는 압축파와, 이

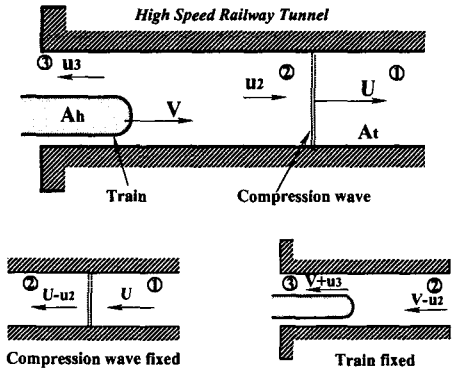


Fig. 5 One-dimensional flow model for wave phenomenon in high speed railway tunnel

압축파에 의하여 유기되는 흐름의 속도 및 압력을 평가하기 위하여 Fig. 5에 나타낸 바와 같은 간단한 일차원 흐름모델을 생각한다. 즉, 단면적 A_t의 터널에 단면적 A_h 열차가 속도 V로서 돌입하게 되는 경우, 열차의 전방에 속도 U로 전파하는 압축파가 발생한다. 이 압축파 배후에는 속도 u_2, 압력 p_2의 흐름이 유기된다. 실제 열차의 돌입에 의하여 형성되는 압축파는 유한의 폭을 가지게 되지만, 본 연구에서는 그림과 같이 압축파를 얇은 일종의 수직충격파(normal shock wave)로 가정하였다. 따라서 충격파 전방을 영역 ①, 바로 후방의 영역을 ②로 하여, 각각의 영역에서 흐름의 제 상태량에 대하여 첨자 1, 2를 붙혀 표시한다. 이때, 충격파의 파면에 고정된 좌표계에 대하여 질량, 운동량 및 에너지의 보존을 나타내는 각 식들은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_1 U=\rho_2(U-u_2) \tag{10}$$

$$p_1\rho_1 U^2=p_2+\rho_2(U-u_2)^2 \tag{11}$$

$$\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{p_1}{\rho_1}+\frac{1}{2}U^2=\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{p_2}{\rho_2}+\frac{1}{2}(U-u_2)^2 \tag{12}$$

또 터널 입구에서의 제 상태량에 첨자 3을 붙혀 표시하는 경우, 열차에 고정된 좌표계에 대하여 영역 ②로부터 ③으로의 흐름은 정상흐름으로 된다. 만일 마찰력이 작용하지 않는다고 가정한다면, 다음 식들이 성립하게 된다.

$$\rho_2(V-u_2)A_t=\rho_3(V-u_3)(A_t-A_h) \tag{13}$$

$$\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{p_2}{\rho_2}+\frac{1}{2}(V-u_2)^2=\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{p_2}{\rho_2}+\frac{1}{2}(V-u_3)^2 \tag{14}$$

$$\frac{p_2}{\rho_2^{\gamma}} = \frac{p_3}{\rho_3^{\gamma}} \tag{15}$$

터널 입구의 압력 p_3는 대기압 p_1과 같다고 가정하면,

$$p_3 = p_1 \tag{16}$$

이상의 7개의 식들에서 p_1, ρ_1, V, A_t, A_h, γ의 량들이 주어진다고 하면, 미지량은

$$\text{Unknowns} = (U,\ p_2,\ p_3,\ u_2,\ u_3,\ \rho_2,\ \rho_3) \tag{17}$$

의 7개로 되므로 위의 식들의 해는 간단하게 얻어진다.

4.2 해석결과

계산에서는 $p_1 = 101.3$ kPa, $\rho_1 = 1.2$ kg/m^3, $\gamma = 1.40$로 하여, 열차와 터널의 단면적비 $R(=A_h/A_t)$과 열차속도 V를 변화시킨 경우의 결과를 Fig. 6 (a~d)에 나타낸다. 이들 그림에서 $R=0.216$은 실제 일본의 산양신간센의 열차 단면적 $A_h=13.7$ m^{2}와 터널 단면적 $A_t=63.4$ m^{2}의 비를 나타내고 있다. 또 $R=1.0$의 곡선은 실린더와 같은 단면적을 가지는 피스톤을 실린더내로 움직이는 경우에 상당한다. Fig. 6(a)는 충격파의 전파속도 U를 충격파 전방의 음속 a_1으로 나눈 값, 즉 충격파 마하수 $M_s(=U/a_1)$에 미치는 R과 U의 영향을 보여준다. R이 증가할수록, 즉 열차단면이 터널내에서 차지하는 비율이 커질수록, 또 열차의 돌입속도 V가 증가할수록, 충격파의 전파속도는 빨라지며, 보다 강한 충격파가 형성된다는 것을 알 수 있다. 예를 들면, $R=0.216$의 경우, 열차의 속도가 200 km/h에서 $M_s=1.0045$로 되지만 열차의 속가 $V=300$ km/h로 증가하면, $M_s=1.0097$로 약 0.5%정도 증가한다. Fig. 6(b)는 터널내에 발생한 충격파에 의해 대기상태로부터 상승한 과잉압(excess pressure) $\Delta p_{21}(=p_2-p_1)$(kPa), Fig. 6(c)는 충격파에 의하여 유기되는 흐름의 속도 u_2(m/s)를 열차의 속도 V에 대해 각각 나타낸다. 이들 그림으로부터 열차속도 $V=200$ km/h에 의한 $\Delta p_{21}=1.05$ kPa, $u_2=2.6$ m/s정도인 것을 알 수 있다. Fig. 6 (d)는 열차속도에 대한 터널 입구에서 유속 u_3의 변화를 나타낸다. 여기에서 u_3는 열차의 돌입방향과 반대방향을 正으로 하고 있다. 따라서, $R=0.216$의 경우에 열차가 속도 $V=200$ km/h으로 터널에 돌입함으로서 속도 $u_3=12.5$ m/s로 공기가 터널

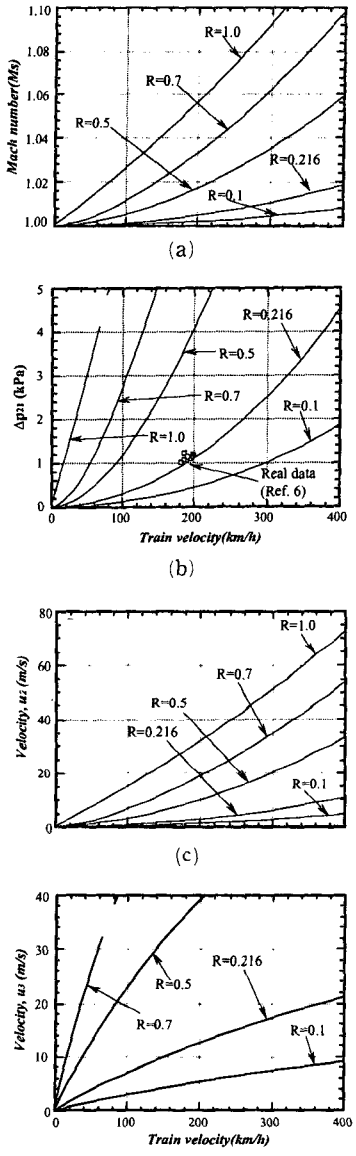


Fig. 6 Results of calculation for one-dimensional flow model

밖으로 유출한다는 것을 알 수 있다.

4.3 해석결과와 실제 터널에서의 측정값과 비교

실제로 열차가 터널에 돌입함에 의해서 터널내에 형성되는 압축파의 과잉압 Δp_{21}의 실험값[3]과 이론해석의 결과비교는 Fig. 6(b)에 나타나 있다. 실험데이터들은 일본의 신간센터널(備後, 第2高山, 大野터널)에서 측정된 것이며, ■표는 터널소음을 저

감시키기 위하여 터널 입구에 후드를 설치한 경우의 결과이다. 그림으로부터 각각 다른 터널에서 측정한 실험값들과 이론해석 결과가 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 사용된 일차원 흐름모델에 의한 해석은, 터널 내에서 형성되는 압축파의 과잉압을 상당히 잘 예측할 수 있다고 판단된다. 만일, 열차의 속도가 220 km/h에서 270 km/h로 증가하게 되면, Δp_{21}는 약 1.3 kPa에서 1.9 kPa로 1.5배 정도 증가하게 되므로, 열차의 속도가 빨라질수록 심각한 소음문제를 창출시키게 된다. 이상의 해석결과로부터, 단면적비 R을 작게 해줌으로써, p_{21}, M_s, u_2, u_3의 값이 작아질 수 있으므로, 이것은 실제 터널 출구에서 발생하는 미기압파에 대한 저감대책의 하나가 될 수 있다.

5. 토론 및 고찰

5.1 거리에 따른 압축파의 파형변화

측정점 S_2(FOGV로부터 하류 450 mm)에서 압축파의 파형의 시간적 변화를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 그림의 횡축은 시간 t이며, 종축은 압축파에 의해 대기압으로부터 상승한 압력상승 $p-p_1$을 나타낸다. 실험에서는 고압실의 압력 p_4와 저압실의 압력 p_1의 비 $PR(=p_4/p_1)$을 변화시켰으며, FOGV의 구동압력은 $p_v=0.4$ atg로 일정하였다. 그림으로부터 적용된 모든 압력비 PR에 대하여, 압력은 대기압으로부터 일정 시간 상승후 거의 일정하게 된다는 것을 알 수 있다. 그의 일정값, 즉 압축파의 과잉압력 Δp_{21}을 본 실험장치의 저압실 입구에서의 값$(\Delta p_{21})_i$로 한다. 이 경우, 그림으로 부터 압력비 PR이 클수록 $(\Delta p_{21})_i$의 값은 커진다는 것을 알 수 있다.

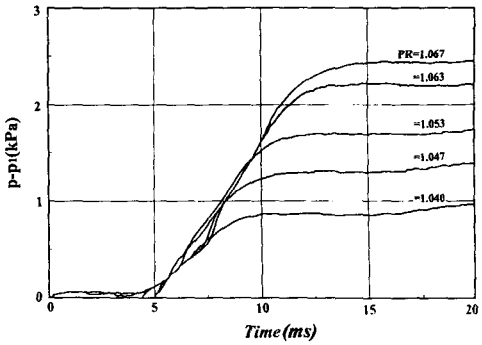
참고문헌[6]에 의하면, 열차가 터널에 돌입함에 의해서 형성되는 압축파의 파형은 다음과 같은 반경험식에 의하여 표현된다.

$$p=p^*\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{\pi}tan^{-1}\frac{Vt}{0.3D}\right) \tag{18}$$

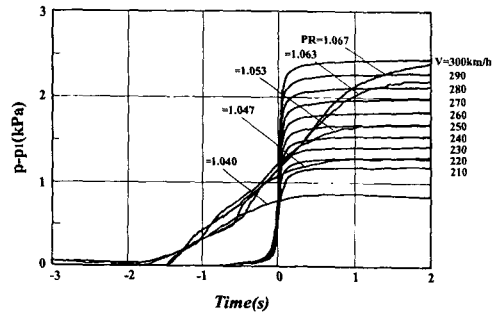
여기에서, V는 열차의 속도, t는 시간, D는 터널의 등가직경이며, p^*는 다음과 같이 주어진다.

$$p^*=\frac{1}{2}\rho_0 V^2\frac{1-(1-R)^2}{(1-M)\{M+(1-R)^2\}} \tag{19}$$

위의 식(18)에서 ρ_0는 기준상태에서 공기의 밀도,



(a) Compression waves at measuring point S_2 ($PR=p_4/p_1$)



(b) Comparison of compression waves in the present experiments and data in real tunnel

Fig. 7 Compression waves at measuring point S_2

R는 열차와 터널의 단면적비이며, M은 마하수 $M=V/a_0$(a_0는 기준상태에서 음속)이다. 열차의 속도 $V=210\sim300$ km/h에 대하여, 위의 식(17)으로 계산한 터널 입구에서의 압력의 시간적 변화를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 또 그림에는 본 실험에서 얻어진 Fig. 7(a)의 횡축의 시간(모형실험에서 시간)을 식(9)에 의하여 실제 시간으로 변환, 즉

$$\text{실시간}=\text{모형에서의 시간}\times(D_{tunnel}/D_{model}) \tag{20}$$

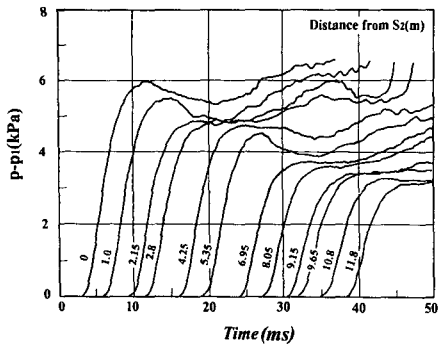
로 환산한 경우의 압력파형도 표시되어 있다. 모형실험에서 발생할 수 있는 압축파의 강도, 즉 $(\Delta p_{21})_i$의 값은 실제의 터널 입구에서 형성되는 압축파와 거의 동일하게 될 수 있지만, 압력의 상승에 필요로 하는 시간은, 식(20)의 우변의 직경비(9000/23.6=381)가 매우 크기 때문에 모형실험에서 매우 길게 나타나고 있다. 본 실험에서 사용된 FOGV의 개구시간을 보다 단축시키는 것은 매우 어려웠고, 이를 위하여 FOGV를 개선시키는 데에 상당한 비

Table 1 Experimental conditions

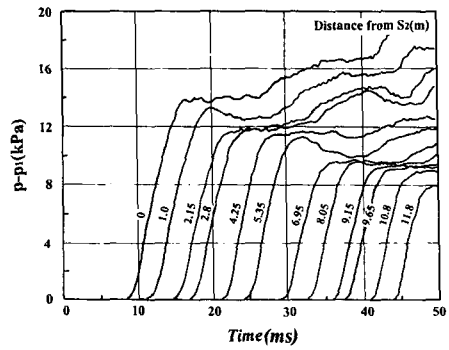
Experiment	$(\Delta p_{21})_i$(kPa)	p_v(atg)	u_i(m/s)
①	6	0.5	14.0
②	9	0.5	20.8
③	14	0.5	31.7
④	23	0.4	50.4
⑤	28	0.5	60.3

용을 요하였기 때문에, 실제 터널에서 형성되는 압축파와 상사한 압축파를 발생시킬 수 없었다. 그러나, 본 실험에서 이용된 FOGV는 실제의 터널 입구에서 형성되는 압축파 보다 강한 압축파에 대해서는 간단하고 훌륭한 재현성으로써 만들 수가 있었다. 따라서, 본 실험에서는 Table 1에 나타낸 바와 같이, 5종류의 압축파를 형성시켜, 그의 전파특성을 조사하였다. Table 1의 p_v는 FOGV의 구동압력, u_i는 형성된 압축파에 의하여 유기되는 흐름의 속도를 나타낸다.

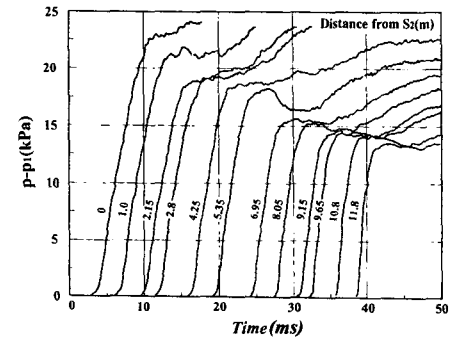
Fig. 8(a~d)는 모형실험에 의하여 얻어진 각 측정점에서 압력의 시간적 변화를 나타내고 있다. (a)는 Table 1의 실험조건 ①에 대한 것으로, 거리 x가 증가함에 따라 압축파에 의한 압력의 시간적 변화율(이하 파면에서 압력의 시간구배 혹은 압력구배라고 한다)은 완만하게 되고, 그의 강도 Δp_{21}은 거리가 증가할수록 감소하고 있다. 반면에, Table 1의 실험조건 ③에 대한 (b)에서는, 거리 x가 증가함에 따라 압축파의 파면의 압력구배는 그다지 변화하지 않는다. 또 실험조건 ④와 ⑤를 나타내는 (c~d)에서는, 압축파의 파면의 압력구배는 거리 x가 증가할수록 점차 급격하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 단면적이 일정한 관내를 전파하는 압축파의 파면이 점차로 완만하게 되는 경우, 거의 변화하지 않는 경우 및 전파함에 따라 점차 급격하게 되는 경우가 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 공력음향(aerodynamic acoustics)의 이론[7]에서 잘 알려진 바와 같이, 압축파의 전파에 대한 점성의 효과(확산작용)와 파의 비선형적 성질(비선형 효과)에 의한 것으로서, 전자가 후자에 비하여 큰 경우, 파면은 완만하게 되며, 반대의 경우는 파면이 급격하게 되는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서 적용된 압력비 PR에 대하여, 압축파의 강도가 강할수록 비선형성이 현저해진다는 것을



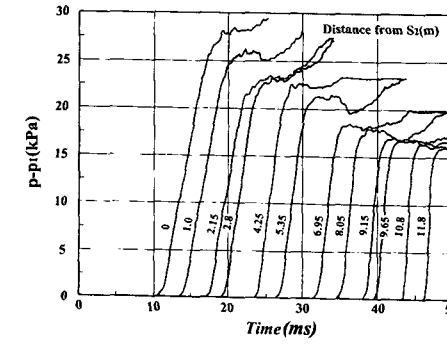
(a) Experiment ① $(\Delta p_{21})_i$=6 kPa



(b) Experiment ③ $(\Delta p_{21})_i$=14 kPa



(c) Experiment ④ $(\Delta p_{21})_i$=23 kPa



(d) Experiment ⑤ $(\Delta p_{21})_i$=28 kPa

Fig. 8 Compression waves measured at each point in streamwise direction

알 수 있다. Fig. 9는 실험조건 ①의 경우, FOGV에 의하여 관내에서 압축파가 형성되는 과정을 보여주고 있다. 그림으로 부터 본 실험장치에서 형성되는 압축파의 폭은 매우 크다는 것을 알 수 있다.

5.2 압축파의 감쇄

Fig. 8(a~d)에서 나타난 바와 같이, 압축파의 강도 Δp_{21}는 거리 x의 증가에 따라 감소한다. Fig. 10는 임의의 점 x에서 압축파의 강도 Δp_{21}를 점 $x=0$에서 강도 $(\Delta p_{21})_i$로 무차원하여, 이 값을 무차원 거리 x/D에 대하여 표시한다. 그림중의 곡선 ⓐ~ⓒ는 참고문헌[3]을 참고하여, 다음과 같이 하여 구한 값이다. 즉, 참고문헌[3]에 의하면,

$$\frac{\Delta p_{21}}{(\Delta p_{21})_i}=\frac{1}{1+f\cdot\frac{u_i}{a_1}\frac{x}{D}} \tag{21}$$

여기에서, f는 압축파에 의하여 유기되는 흐름의 마찰계수(friction coefficient)이며, a_1는 압축파 전방의 음속을 나타낸다. 또 u_i는 관의 입구에서 유속이며, 유한 진폭파(finite amplitude wave)의 이론[8]에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_i=2\gamma-1\cdot a_1\cdot\left\{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}-1\right\} \tag{22}$$

위의 식(22)의 p_2는 측정점 S_2에서 압축파에 의하여 상승된 압력을 나타낸다. 식(21)은 벽면의 마찰만을 고려하여, 2차 이상의 미소항을 무시한 근사식이며, 본 연구에 적용되어야 하는 마찰계수 f의 값으로서 비정상 압축성 흐름에 대한 값을 사용하여야 하지만, 현재로서는 그와 같은 데이터는 없다. 따라서, 본 연구에서는 정상 비압축성 흐름의 경우에 대한 값을 이용하기로 한다. 식(21)과 본 연구의 실험결과들을 비교하기 위하여, 실험적으로 정해지는 계수 k를 도입하여 식(21)을 다음과 같이 바꾸어 쓴다.

$$\frac{\Delta p_{21}}{(\Delta p_{21})_i}=\frac{1}{1+k\cdot f\cdot\frac{u_i}{a_1}\frac{x}{D}} \tag{23}$$

위의 식에서 마찰계수 f는 흐름의 레이놀즈수 $Re=u_iD\rho_i/\mu_i$로부터 Moody선도를 이용하여 구하면, Table 2와 같이 정리된다. Fig. 10의 곡선 ⓐ, ⓑ, ⓒ는 위의 식(23)의 우변에 실험조건 ①, ③, ⑤에 대한 u_i, f, k를 각각 대입하여 얻어진 것이다. 그림으로부터, 본 실험에서 얻어진 데이터들이 곡선 ⓐ와 ⓑ 사이에 있으며, 곡선 ⓑ와 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. k의 값이 3.5가 될 때, 본 실험값이 식(23)와 일치하게 되는 것은, 마찰계수 f의 값이 정확하게 구해질 수 없고, 또 식(23)가 비교적 약한 압축파에 대한 식이기 때문이라고 생각된다.

참고로 실제 터널에서 측정된 압축파의 감쇄에 대한 실험 데이터[6]와 식(23)의 비교를 Fig. 11에

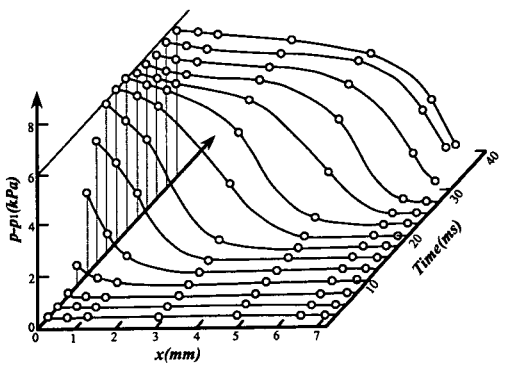


Fig. 9 Three-dimesnsional view of compression waves ($(\Delta p_{21})_i$=6 kPa, p_∞=0.4 atg)

Table 2 Reynolds number and friction factor used in the present esperiments

Experiment	$(\Delta p_{21})_i$(kPa)	u_i(m/s)	Re×10000	f	k
①	6	14.0	2.24	0.006	3.5
②	9	20.8	3.50	0.006	3.5
③	14	31.7	7.48	0.005	3.5
④	23	50.4	9.22	0.005	3.5
⑤	28	60.3	11.4	0.003	3.5

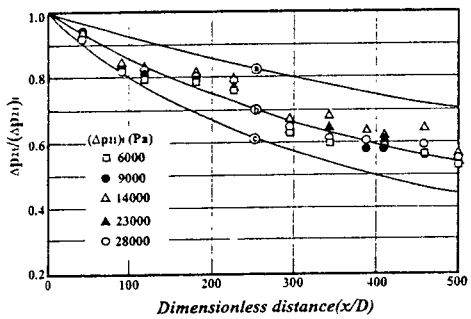


Fig. 10 Variation of strength of compression wave with distance

나타내었다. 그림 중에서 사용된 데이터들은 모두 슬라브궤도 터널에 대한 것이며, 열차의 속도는 $V=192-197$ km/h이다. 또 열차속도 $V=195$ km/h의 경우에 대하여, 터널 입구에서 발생하는 압축파에 의하여 유기되는 유속 $u_i=2.5$ m/s를 대표속도, 터널의 등가직경 $D=9$ m를 대표길이로 하는 레이놀즈수 $Re=1.46\times10^6$에 대한 마찰계수를 $f=0.003$으로 하였으며, 식(23)과 실험값이 거의 일치하도록 $k=13$으로 한 경우의 계산결과를 나타낸다. 그림으로부터 슬라브궤도 터널에서 압축파의 감쇄는 $k=13$을 적용한 식(23)와 매우 잘 일치하고 있다.

Fig. 12는 밸러스트궤도 터널(길이:16250 m, 열차속도: $V=195$ km/h)에서 측정된 압축파의 감쇄를 나타내고 있다. 그림의 실선은 식(22)에서, $(\Delta p_{21})_i=1060$ Pa에 의하여 유기되는 유속 $u_i=2.5$ m/s를 대표속도, 터널의 등가직경 $D=9$ m를 대표길이로 하는 레이놀즈수 $Re=1.46\times10^6$에 대한 마찰계수 $f=0.003$을 이용하여, 식(23)과 실험결과[6]가 거의 일치하도록 $k=78$로 한 경우의 계산값을 나타낸다. 이와 같이 밸러스트궤도 터널(Ballast track tunnel; BTT)에서는 k의 값을 매우 크게 취하면, 실측값과 매우 잘 일치하게 된다.

5.3 압축파의 폭의 변화

Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이, 압축파의 폭 b는 거리 x에 따라 감소한다. 임의의 점 x에서 압축파의 폭 b를 $x=0$에서 폭 b_i로 무차원화한 값 (b/b_i)을 무차원 거리 x/D에 대하여 Fig. 13에 나타낸다. 그림으로 부터 b/b_i의 값은 x/D에 따라 감소하지만, 그의 감소비율은 초기 압축파의 강도가 클수록 현저하다는 것을 알 수 있다. 그림 중에는 슬라브궤도 터널(STT) 및 밸러스트궤도 터널(BTT)에서의 측정값들[3,6]도 표시되어 있다. 본 실험의 데이터들은 슬라브궤도 터널의 측정값들과 잘 일치하고 있지만, 밸러스트궤도 터널에 대한 압축파의 폭의 변화는 거의 없다는 것을 알 수 있다.

5.4 압축파 파면의 압력구배의 변화

참고문헌[6]에 의하면, 터널 출구로부터 방출되는 미기압파의 강도는 터널 출구에서 압축파 파면의 압력구배에 비례한다고 보고하고 있다. 따라서 압축파가 관내를 전파함에 따라, 그의 압력구배가 어떻게 변화하는가를 이해하는 것은 대단히 중요하다. Fig. 8(a~d)에서 나타난 각각의 압력파형들로부터, 압력구배의 최대값을 무차원 거리 x/D에 대하여 표시하면, Fig. 14와 같이 된다. 관 입구에서 형성되는 압축파가 비교적 강한 경우, 즉 $(\Delta p_{21})_i=23$ kPa 혹은 28 kPa의 경우에, 압력구배는 거리

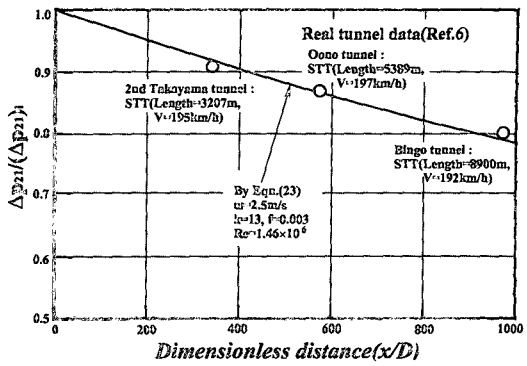


Fig. 11 Attenuation of compression wave against distance

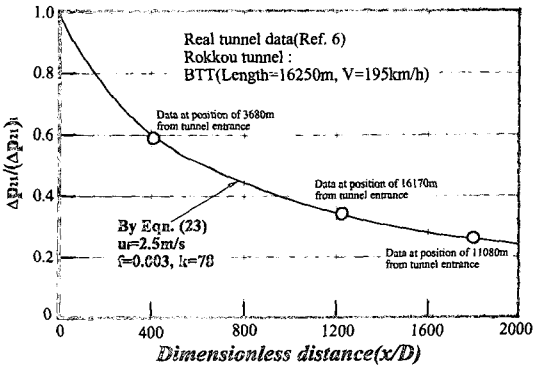


Fig. 12 Attenuation of compression wave against distance in ballast track tunnel

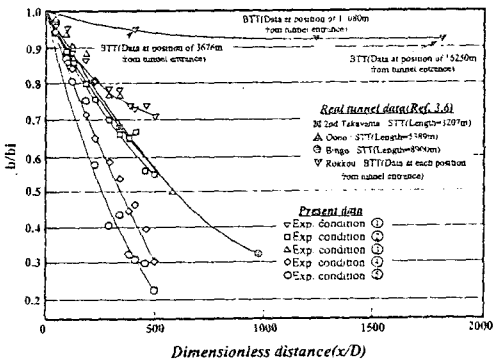


Fig. 13 Variation of width of compression wave with distance. (The filled symbols are data for real tunnels)

에 따라 증가하지만, 압축파가 약한 $(\Delta p_{21})_i$=6 kPa의 경우에는, 압력구배는 거리의 증가에 따라 감소하고 있다. 또 중간정도의 강도를 가진 압축파에 대해서는 거리에 따른 압력구배의 변화는 거의 나타나지 않고 있다. Fig. 15에는 실제의 슬라브궤도 터널(STT)과 밸러스트궤도 터널(BTT)에서 측정된 압축파의 최대 압력구배를 나타낸다.[3,6] 실제의 터널 입구에서 형성되는 압축파의 강도 $(\Delta p_{21})_i$는 약 1 kPa정도로, 본 실험에 적용된 값보다 상당히 작음에도 불구하고 슬라브궤도 터널의 최대 압력구배는 거리에 따라 증가하고 있다. 따라서, 이것은 거리에 따른 최대 압력구배의 변화가 단순히 압축파의 강도만에 의해서 결정되지 않으며, 다른 인자에도 의존할 수 있다는 것을 의미한다. 한편, 그림에서 밸러스트궤도 터널에서의 실측값은 거리에 따라 감소하고 있다. 이것은 밸러스트가 터널 출구에서 발생되는 미기압파를 약하게 하는 효과를 가진다는 것으로 생각할 수 있다.

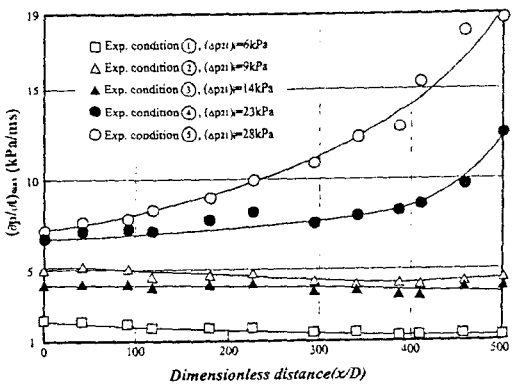


Fig. 14 Variation of maximum pressure gradient in compression wave against distance

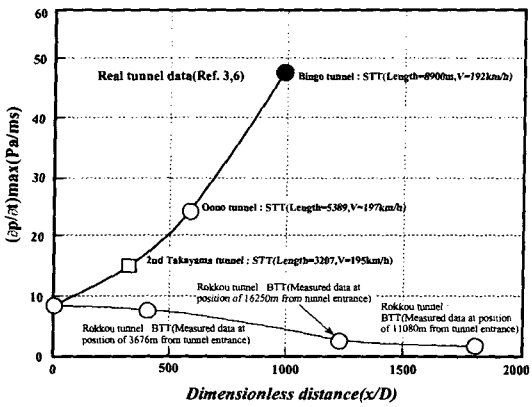


Fig. 15 Variation of omaximum pressure gradient with distance in real tunnels

6. 결 론

본 연구에서는 고속철도 터널에서 발생하는 파동현상을 시뮬레이션하기 위하여 충격파관을 이용하였다. 열차가 터널으로 돌입함으로써 발생하는 압축파는 급속개구밸브를 이용하여 모의실험하였으며, 밸브의 개구속도의 조절에 의해 여러 형태의 압축파를 형성시킬 수 있었다. 또 이론적으로는 일차원 흐름모델을 적용하여 해석함으로써, 고속철도 터널에서 발생하는 파동현상을 이해할 수 있었다. 고속철도 터널에서 발생하는 압축파의 특성을 나타내는 량들로써, 압축파에 의한 압력상승치, 파면에서의 압력구배 및 파면의 폭 등을 정의하여, 이들과 터널 입구에서 형성되는 초기 압축파의 강도와의 관계를 규명하였다. 본 연구에서 얻어진 결과들은 다음과 같이 요약된다.

(1) 충격파관을 사용하여, 실제의 고속철도 터널에서 발생하는 파동현상을 모의실험할 수 있었다. 본 실험에서 사용된 급속개구밸브는 압축파에 의한 압력상승의 시간은 적절하게 모의할 수 없었지만, 압축파의 강도에 대해서는 실제와 같은 매우 흡사한 압축파를 간단하게 얻을 수 있었다.

(2) 본 연구에서 적용된 일차원 흐름모델에 의하여, 압축파에 의한 압력상승, 압축파의 전파마하수, 압축파에 의해 유기되는 흐름의 속도 등을 훌륭하게 예측할 수 있었다.

(3) 충격파관에서 형성되는 압축파는 관내를 전파함에 따라 감쇄하게 되며, 이것은 유한 진폭파의 전파에 대한 이론값과 일치한다.

(4) 압축파의 감쇄는 실제 터널의 조건에 따른 적절한 k의 값을 선택함으로써 식(23)에 의해 예측할 수 있다.

(5) 초기 압축파의 강도가 클수록 전파하는 압축파의 폭은 현저하게 감소한다.

(6) 초기 압축파의 강도가 비교적 큰 경우, 전파하는 압축파는 파의 확산효과보다 비선형효과가 지배적으로 되어, 파면은 점차 급격하게 된다.

참고문헌

(1) Matsuo, K. and Aoki, T., 1991, "Wave Prob-

lems in High-Speed Railway Tunnels," *Proc. 18th International Symposium on Shock Waves*, Ed. Takayama, K., Sendai, Japan, pp. 95~102.

(2) 김희동, 1994, "高速鐵道 터널에서 發生하는 流體力學的 波動現象," 大韓機械學會誌 投稿中.

(3) 小澤 智, 森藤達夫, 前田達夫, 木下眞夫, 1976, "トンネル出口微氣壓波の實態," 鐵道技術研究報告, No. 1023.

(4) 山本彬也, 1975, "列車とトンネルの空氣力學," 第11回 鐵道研究所講演論文集.

(5) 生井武文, 松尾一泰, 山本芳久, 1976, "衝擊波管用急速開口弁の研究," 日本機械學會論文集, 第42卷, 제359號, pp. 2127~2136.

(6) Ozawa, S., 1979, "Studies of Micro-Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit," *Railway Technical Res. Rept. of Japan*, No. 1121(In Japanese).

(7) Lighthill, J., 1978, "Waves in Fluids," Cambridge Univ. Press.

(8) Pai, S-I., 1959, *Introduction to the Theory of Compressible Flow*, D. Van Nostrand Company Inc.