

(논문)

두 연속 터널을 전파하는 압축파의 실험적 연구

김희동* · 허남건** · 瀬戸口俊明***

(1996년 12월 13일 접수)

Experimental Study of Compression Waves Propagating into Two-Continuous Tunnels

Heuy-Dong Kim, Nahmkeon Hur, and Toshiaki setoguchi

Key Words : Compressible Flow(압축성흐름), Compression Wave(압축파), High-Speed Railway(고속철도), Impulsive Noise(충격성소음), Shock Tube(충격파관), Railway Tunnel(철도터널), Shock Wave(충격파)

Abstract

For the purpose of investigating the impulsive noise at the exit of high-speed railway tunnel and the pressure transients inside the tunnel, experiments were carried out using a shock tube with an open end. A great deal of experimental data were obtained and explored to analyze the peak pressures and maximum pressure gradients in the pressure waves. The effects of the distance and cross-sectional area ratio between two-continuous tunnels on the characteristics of the pressure waves were investigated. The peak pressure inside the second tunnel decreases for the distance and cross-sectional area ratio between two tunnels to increase. Also the peak pressure and maximum pressure gradient of the pressure wave inside the second tunnel increase as the maximum pressure gradient of initial compression wave increases.

1. 서론

각종 배관계를 전파하는 압력파 현상^(1,2)은 격심한 압력변동을 수반할뿐만 아니라 비정상 하중(unsteady loads)과 직접적으로 관련되므로, 소음진동의 발생은 물론 나아가 배관의 피로파괴 등을 야기시키는 원인이 된다. 따라서 이러한 압력파들은 각종 배관계의 설계시 고려되어야 할 중요한 공학적 현상이며, 소음진동 등에 대한 대책을 수립하기 위하여 체계적으로 연구될 필요가 있다.

배관계의 압력파와 유사한 현상으로 고속철도 터

널에 열차가 돌입하는 경우 터널내에 발생하는 압력파 현상을 들 수 있다. 열차가 터널을 주행하는 경우에 터널내부에서 매우 복잡한 압력파 현상이 발생하여, 개활지를 주행하는 경우에 비해 큰 압력변동 및 공기저항이 발생하게 된다.^(3,4) 따라서 차체의 설계나 터널, 역사(station) 및 선로 주변의 구조물의 설계를 위해서는 터널주행에서 발생하는 풍압, 풍속 등에 관한 정보가 필요하다. 현재 우리나라 고속철도 건설에는 상당수의 터널과 지하역사 등이 계획되어 있어 터널을 주행하는 고속열차의 공기역학^(5,6)에 대한 관심이 절실한 실정이다.

열차가 고속으로 터널에 돌입하는 경우 열차전방에 압축파가 발생하여 터널내를 전파한다. 이 압축파가 터널출구에 도달하여 외부로 방출될 때 돌연발파음에 가까운 충격성 소음(impulsive noise)이

*회원, 안동대학교 기계공학과

**회원, 서강대학교 기계공학과

***佐賀大學 機械工學科

발생한다.⁽⁷⁾ 이러한 충격성 소음은 종래에 인식되어 온 열차의 전동 및 주행 소음과는 성질이 전혀 다른 것으로, 터널내를 전파하는 압축파와 관련되는 것으로 알려져 있다. 한편 열차의 돌입에 의해 형성된 압축파가 터널내를 전파하여 일부는 터널의 출구면에서 팽창파(expansion wave)로서 터널내로 반사하게 된다. 이 경우 진행되는 열차와 복잡한 간섭을 일으켜 차체에 큰 압력변동이 발생함은 물론 격심한 공기저항의 변동까지 발생하게 된다.^(8,9) 이와 같이 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음이나 터널내의 압력과 현상들은 터널내를 전파하는 비정상 압축파(unsteady compression wave)의 특성에 의존하게 되므로, 이에 관한 연구는 철도의 고속화에 앞서 선행되어야 할 연구과제이다.

종래의 연구^(10,11)에 의하면, 터널입구에서 형성되는 압축파의 강도는 열차속도의 2승에 비례하며, 또 터널출구에서 발생하는 충격성 소음의 크기는 다음 식으로 나타내는 바와 같이 터널내를 전파하여 출구에 도달하는 압축파면의 압력의 시간미분($\partial p/\partial t$) (이하에서는 압력구배라 한다)에 비례한다고 보고하였다.

$$\Delta p_m \propto \frac{1}{r} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_m \quad (1)$$

여기에서 Δp_m 는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 관 출구로부터 방출되는 펄스파의 피크 압력, r 은 관 출구로부터 반경방향의 거리, 그리고 $(\partial p/\partial t)_m$ 는 관 출구면에서 형성되는 압축파면의 압력 시간미분의 최대값을 의미한다.

위의 같은 실험적인 사실은 관단으로부터 임의의 질량유속(mass flux)이 주위 공간으로 방출되는 경우에 발생하는 펄스파에 관한 선형음향이론⁽¹²⁾ (linear acoustic theory)과 잘 일치한다. 그러나 고속철도 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음의

발생 메커니즘이나 비정상 압축파의 전파 특성을 해명하기 위해서는 음향이론 보다는 압축성 유체공학에 관한 전문적인 지식이 필요하다.

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음이 터널 출구면에서 형성되는 압축파면의 압력구배에 의하여 결정된다는 사실로부터, 종래 충격성 소음의 저감 대책은 주로 압축파면의 압력구배를 완화시키는 방법으로 수행되어 왔다. 김희동⁽⁷⁾에 의하여 소개된 바와 같이 터널내를 전파하는 압축파에 대하여 터널 출구, 터널 내부 그리고 터널 입구 부근에 각각 여러 대책을 세울 수 있다. 최근 김희동 등^(13,14)은 충격파관의 출구에 피동적 소음기를 설치하여, 충격성 소음에 미치는 피동제어(passive control)의 효과를 조사하기 위하여 실험과 수치해석을 수행하였다. 또 충격성 소음에 대하여 역위상을 가지는 펄스파를 터널 출구에서 발생시키는 능동적인 방법(active control)을 이용하여, 충격성 소음의 저감을 시도한 바 있다.^(15,16) 그러나 열차가 고속화됨에 따라 이와 같은 터널 출구의 대책만으로는 충격성 소음에 대한 저감효과는 한계가 있다는 것을 알았다. 최근 김희동 등^(17,18)은 터널내부에 지갱(branch tunnel) 및 다공벽(porous wall)을 설치하여, 비정상 압축파의 전파특성을 조사하였다. 그 결과 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음의 저감을 위해서는 매우 큰 지갱이 필요하다고 보고하였으며,⁽¹⁷⁾ 다공벽의 기공율이 30%인 경우에 압축파의 과잉압력 및 파면의 최대압력구배가 가장 작아져,⁽¹⁸⁾ 충격성 소음의 저감뿐만 아니라 터널내의 압력변동도 상당히 완화될 수 있다는 것을 보고하였다.

이상에서 기술한 저감법들은 주로 터널내를 전파하는 압축파의 비선형효과를 작게 하는 것으로, 우리 나라에서와 같이 건설중인 고속철도의 전체 노선 중 터널구간이 차지하는 비율이 매우 높은 경우에는 터널로부터 방출되는 압력파가 다른 터널로 전파하게 된다. 이 경우에 발생하는 파동현상은 유체역학적으로 매우 흥미로운 뿐만 아니라, 터널 입구부분에 설치하는 후드 혹은 출구부분에 설치하는 피동적 저감법을 고려하는 경우에 매우 중요하다. 더욱이 고속철도가 대도시를 지하로 통과하는 경우, 역사건설이나 기타 부대시설이 필요하게 되므로 터널과 터널 사이를 연결하는 공간이 만들어지게 된다. 이러한 공간은 지하역사의 경우, 큰 공동구역(cavity region)이 될 수 있으며, 공동이 대기

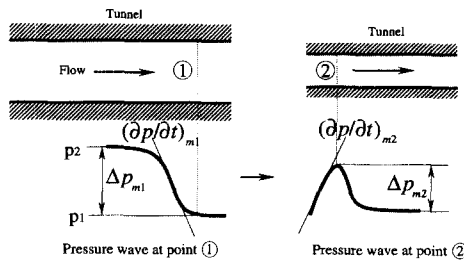


Fig. 1 Pressure wave propagating two-continuous tunnels.

에 개방되어 있는 경우에는 두 연속한 터널의 형태가 될 수 있다. 이와 같이 지하공간에서 발생하는 풍압 및 풍속 등을 산출하는 것은 역사건설뿐만 아니라 터널내 공조시설 및 기타 구조물의 설계에 있어서 매우 중요하다. 그러나 이러한 형태의 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 연구는 현재까지 전무한 실정이다.

본 연구에서는 두 연속 터널을 전파하는 압력과 현상을 조사하기 위하여, 충격파관을 이용하여 모사실험을 수행하였다. 실험에서는 두 터널간의 거리, 두 터널의 단면적비 등이 전파하는 압축파의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 따라서 본 연구의 결과는 두 가지 측면 즉 고속철도 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음에 대한 새로운 저감법으로 활용될 수 있으며, 지하역사와 같은 공동구역을 전파하는 압력파의 파동현상을 이해하는데 유용하다.

2. 실험장치 및 방법

두 연속터널을 전파하는 압축파의 특성을 조사하기 위하여 간단한 터널 모형장치를 제작하였다. 모형터널은 Fig. 2에 개략적으로 나타낸 바와 같이 저압실이 대기에 개방되어 있는 대기 개방형 충격파관을 이용하였다. 충격파관의 고압실과 저압실의 직경(D_1)이 66 mm로 같은 원형관으로 제작되었으며, 고압실과 저압실의 길이는 각각 1630 mm와 2000 mm이다. 그림에 나타낸 바와 같이 두 연속한 터널을 모사하기 위하여 충격파관의 저압실의 출구에서 동일 축선상의 거리 L 만큼 떨어진 위치에 직경 D_2 인 원형관(길이 1000 mm)을 설치하였다.

실험은 충격파관의 고압실에 대기압보다 약간 높은 압력의 건조공기를 충전시켜 고압실과 저압실 사이에 위치하는 격막(두께 0.02 mm의 셀로판막)

을 파괴하게 되면, 고압실의 공기가 저압실로 급속히 유입하여 저압실 입구에서 압축파가 형성된다. 따라서 이 압축파는 고속철도 터널의 입구에서 열차에 의해 형성되는 압축파의 역할을 하게 된다. 충격파관의 저압실을 전파하는 압축파의 일부는 저압실의 관단으로부터 방출되어 직경 D_2 인 관으로 전파하게 되며, 나머지 일부는 저압실의 관단으로부터 팽창파로 반사하여 고압실 쪽으로 향하게 된다. 충격파관의 저압실을 전파하는 압축파를 측정하기 위하여 격막으로부터 1868 mm의 위치(측정점 ①) 및 직경이 D_2 인 관의 입구로부터 132 mm의 위치(측정점 ②)에 고감도 압력센서(PCB 112A21)를 설치하였다. 한편 일반적으로 관단 부근의 측정점에서 압력값은 관단으로부터 반사파의 영향에 의하여, 압축파의 과잉압 및 압력구배의 값을 구하기가 곤란하므로, 본 연구에서는 몇차례 예비실험을 통하여 반사파의 영향이 비교적 적은 적절한 측정 위치를 선정하였다.

본 실험에서는 측정점 ①에서 압축파형을 초기 압축파형(initial compression wave)으로 하였으며(하점자 1), 측정점 ②에서의 압축파(하점자 2)에 미치는 L/D_1 및 D_2/D_1 의 영향을 조사하였다. 또 고압실의 내부에는 압력측정용 정압공을 설치하였으며, 압력센서로부터 전기적인 출력은 직류증폭기를 거쳐 데이터 해석장치(ADX 98H) 및 파형기록 장치에 보존하였다. 본 실험의 압력측정에서 오차는 반복실험 및 압력센서의 검정을 통하여 확인하였으며, 그 결과 고압실에서 측정 압력의 오차는 거의 무시할 수 있었으나, 저압실에서 압축파를 측정하는데에는 약 2%의 오차가 발생하였다. 본 연구에서는 측정점 ①에서 형성된 임의의 압축파와 측정점 ②의 압축파의 상대적인 변화에 주목하였다.

일반적으로 측정점 ①에서 압축파는 압축파의 파

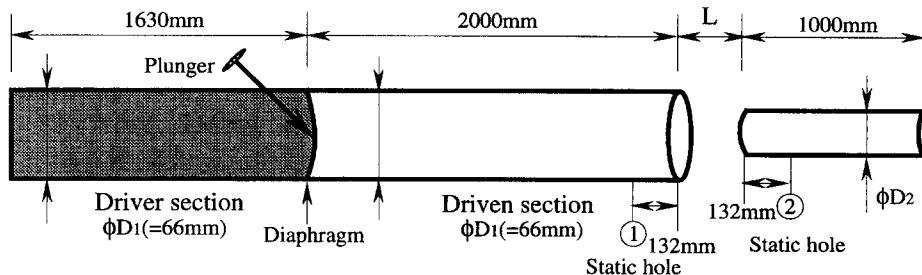


Fig. 2 Shock tube for tunnel simulation

잉압력(over pressure), 파면의 최대압력구배 그리고 파장(wave length) 등으로 특성화 될 수 있지만, 본 실험에서는 이들 특성값을 변화시키기 위하여 고압실의 압력만을 약간 변화시켰다. 일반적으로 충격파관의 파막 장치를 이용하여 얻을 수 있는 압축파의 과잉압력은 고압실의 압력에 의하여 주로 결정되지만, 압축파면의 최대압력구배는 고압실의 압력 이외에도 파막의 상태, 파막의 시간, 격막의 종류, 작동기체의 종류, 관로의 등가직경 등에 의하여 영향을 받게 되므로, 실제적으로 본 실험에서는 파면의 최대압력구배를 임의로 조절하는 것은 매우 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 임의의 고압실 압력에 대하여 약 300 차례 실험을 수행하여, 측정점 ①과 ②에서 얻어지는 압축파의 특성값을 조사하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

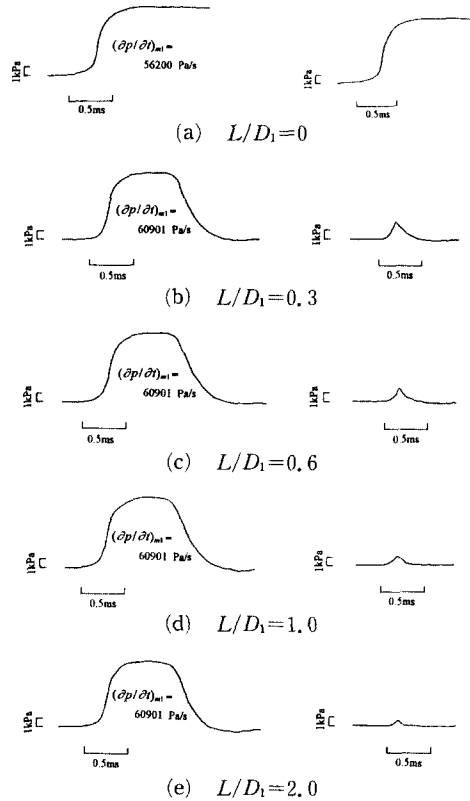
Fig. 1에는 압력측정점 ①과 ②에서 측정된 압력파형을 해석하기 위하여, 각각의 압축파에 대하여 과잉압 Δp_m 와 파면의 최대압력구배 $(\partial p/\partial t)_m$ 를 정의하였다. 여기에서 각 압축파면의 최대압력구배는 먼저 압축파면을 얻기 위하여 1024의 데이터점을 취하여, 각 5점의 압력값을 이용하여 시간미분의 최대값(하첨자 m)을 구하였다. 한편 김희동 등^(14,19)에 의하여 이전에 수행된 연구에 의하면, 압축파가 관단으로부터 방출되어 펄스파로 되는 경우 펄스파의 피이크 압력은 압축파의 과잉압력과 압축파의 압력구배에 의존하는 것으로 보고하였다. 구체적으로 충격파와 같이 압력파의 압력구배가 매우 급격한 경우에는 펄스파의 강도를 나타내는 피이크압력(Δp_{m2})은 압축파의 과잉압력(Δp_{m1})에 의존하게 되지만, 파면의 압력구배가 작아지는 경우에는 펄스파의 피이크 압력은 압축파의 과잉압력(Δp_m)에 의존하지 않는다고 보고하였다. 펄스파의 피이크 압력이 압축파의 압력구배에 의존하는 것은 펄스파의 형성과정과 관련⁽²⁰⁾되기 때문이며, 본 연구에서는 펄스파의 형성과정에 대해서는 구체적으로 언급하지 않는다. 따라서 본 실험에서는 펄스파의 피이크 압력이 압축파의 과잉압력에 의존하지 않는 영역에 대하여 실험을 수행하였다.

Fig. 3과 Fig. 4에는 각각 $D_2/D_1=1.0$ 과 ∞ 인 경우, L/D_1 의 값을 0에서 2.0으로 변화시켜 각 측정점에서 얻어진 압력파형을 나타내었다. Fig. 3에서

$L/D_1=0$ 인 경우에 대한 실험값들은 충격파관의 저압실의 길이가 3000 mm인 단일 터널을 모사하는 것에 상당하며, $D_2/D_1=\infty$ 인 경우의 실험값들은 직경 D_1 인 저압실(길이 2000 mm)의 관단으로부터 압축파가 무한 대기로 방출되는 경우에 상당한다. 또 그림에는 각 압축파형에 대하여 $(\partial p/\partial t)_m$ 의 값을 나타내었다. 그림 (a)의 측정점 ①의 파형으로부터 압력은 압축파가 측정점에 도달하게 되면서부터 급격히 증가하여 거의 일정값(과잉압 $\Delta p_{m1}=p_2-p_1$)을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 압축파형으로부터 압축파의 전방의 압력을 p_1 , 압축파 후방의 압력을 p_2 로 가정하는 경우, 다음의 식을 이용하여 압축파의 전파마하수를 계산할 수 있다.

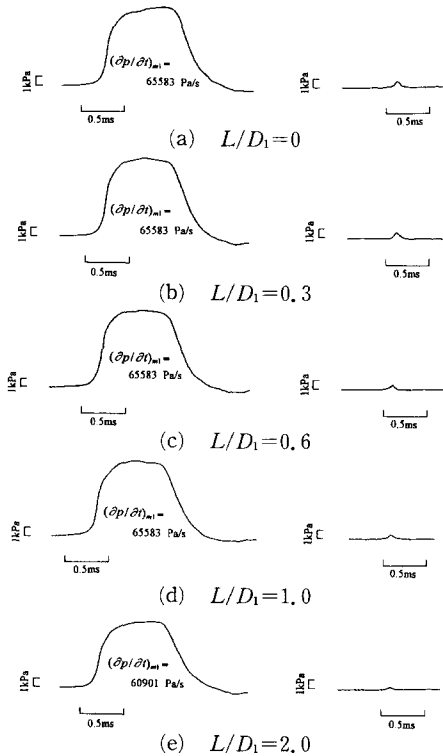
$$M_s^2 = \frac{(\gamma+1) \frac{p_2}{p_1} + (\gamma-1)}{2\gamma} \quad (2)$$

여기에서 γ 는 공기의 비열비(=1.40)이다. 위의 식을 그림에 나타낸 압축파형들에 적용하여 압축파



Pressure wave at point ① Pressure wave at point ②

Fig. 3 Pressure wave forms($D_2/D_1=1.0$)



Pressure wave at point ① Pressure wave at point ②

Fig. 4 Pressure wave forms ($D_2/D_1 = \infty$)

의 전파 마하수 M_s 를 구하면 약 1.004 정도로, 압축파는 거의 음속으로 전파한다고 가정할 수 있다. 또 충격파관의 고압실 압력을 p_4 , 저압실 압력을 p_1 라고 하는 경우, 위의 압축파의 전파 마하수를 이용하여 p_4 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1} \left\{ 1 - \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 + 1} \frac{a_1}{a_4} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right\}^{-\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \quad (3)$$

여기에서 a_1 과 a_4 는 각각 충격파관의 저압실과 고압실 상태에서 기체의 음속을 나타낸다. 본 연구에서 위의 식 (3)으로 구한 p_4 의 값은 충격파관의 고압실에서 측정된 압력값과 매우 잘 일치하였다. 따라서 그림의 압축파형에 대하여 과잉압력의 계산은 충격파관의 단순이론(simple theory of shock tube)을 사용하여 적절히 예측할 수 있었다.

한편 Fig. 3에 나타난 바와 같이 측정점 ①의 압축파형 (a) ($L/D_1=0$)와는 달리 $L/D_1>0$ 에 대한 압축파형 (b~e)는 압축파 후미부에서 압력의 감소를 보이고 있다. 이것은 직경 D_1 인 관을 전파하

는 압축파의 일부가 관단으로부터 팽창파로 반사하기 때문이다. 그림 (a)의 경우 측정점 ②에서 압력파형은 직경 D_2 인 관으로 유입하는 압축파에 의하여 압력은 급격하게 증가한 후, 거의 일정값을 유지하게 된다. 그러나 $L/D_1>0$ 에 대한 압축파형 (b~e)에서는 거의 펄스 형태로 된다는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 펄스형태의 압력파형에 대하여 피이크압력(Δp_{m_2})은 두 관 사이의 공간으로 압축된 공기의 질량이 방출하게 되므로, L/D_1 이 증가할수록 상당히 낮아진다.

Fig. 4는 $D_2/D_1 = \infty$ 인 경우로, 측정점 ②(예를 들면 $L/D_1=0$ 인 경우에는 첫번째 관출구로부터 132 mm의 지점, 그리고 $L/D_1=1.0$ 의 경우에는 첫번째 관출구로부터 132 mm + L/D_1 의 지점이 된다)에서 압력파형은 매우 약한 펄스형태로 된다. 이러한 펄스형태의 압력파에 대하여 피이크압력은 L/D_1 이 증가할수록 작아지며, 과잉압력(Δp_{m_1})은 위의 식 (1)에서 나타낸 바와 같이 압축파가 거의 음속으로 전파한다는 사실로부터 관단으로부터 방출되는 미소진폭파에 대한 선형음향이론을 적용하여 예측할 수 있다. 일반적으로 관단으로부터 무한대기로 음파가 방출하는 경우, 관단을 원점으로 하는 반경방향의 거리를 r 로 하면, $r > D_1$ 의 위치에서는 음의 원거리장으로 될 수 있으므로, 펄스파의 피이크 압력은 r^{-1} 의 법칙을 따르게 된다. 즉 $r=132$ mm ($r=2D_1$)에서 펄스파의 피이크 압력값이 알려지는 경우, $r > 2D_1$ 인 위치에서 피이크 압력값을 예측할 수 있다. 예를 들면 $r=160$ mm에서 피이크 압력은 다음의 식으로 구해진다.

$$\Delta p_{m_2}(\text{at } r=160\text{mm}) = \frac{132}{160} \times \Delta p_{m_1}(\text{at } r=132\text{mm}) \quad (4)$$

본 연구에서는 임의의 과잉압력 및 파면의 최대 압력구배를 가지는 압축파가 터널 출구로부터 방출되어 다른 터널로 진입하는 경우에 압력파의 특성을 조사하는 것이므로, Fig. 2에 나타난 측정점 ①과 ②에서 얻어지는 압력파의 과잉압력의 비 $\Delta p_{m_2}/\Delta p_{m_1}$ 및 최대압력구배의 비 $(\partial p/\partial t)_{m_2}/(\partial p/\partial t)_{m_1}$ 를 고찰하였다.

Fig. 5~8에는 $\Delta p_{m_2}/\Delta p_{m_1}$ 의 값을 측정점 ①에서 얻어지는 압축파의 최대압력구배 $(\partial p/\partial t)_{m_1}$ 에 대하여 나타내었다. Fig. 5는 $D_2/D_1=0.5$ 인 경우 파라미터로 L/D_1 을 변화시켰으며, 그림의 실선은 실험

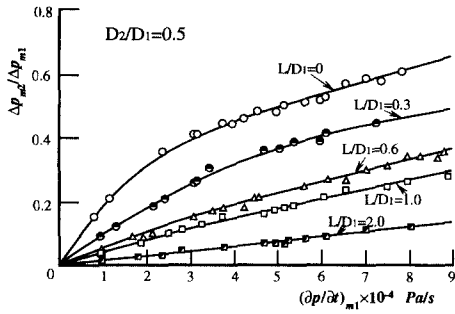


Fig. 5 Relation between $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ and $(\partial p/\partial t)_{m1}$ ($D_2/D_1=0.5$)

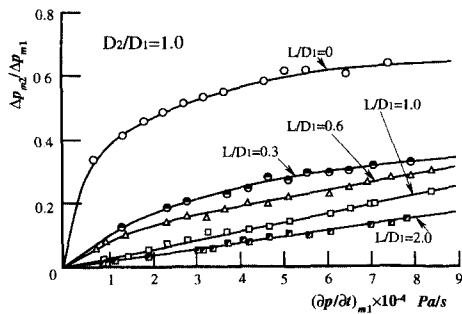


Fig. 6 Relation between $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ and $(\partial p/\partial t)_{m1}$ ($D_2/D_1=1.0$)

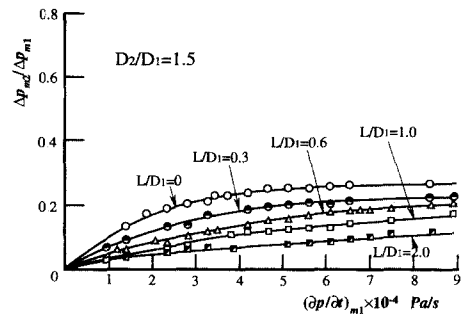


Fig. 7 Relation between $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ and $(\partial p/\partial t)_{m1}$ ($D_2/D_1=1.5$)

점을 다항식 근사화한 것이다. 그림으로부터 $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ 의 값은 초기압축파의 최대압력구배가 증가할수록, L/D_1 가 감소할수록 커지게 된다는 것을 알 수 있다. 더욱이 $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ 의 값은 $L/D_1 < 1.0$ 인 경우에는 초기압력구배의 증가에 따라 급격하게 증가하여, 그 후에는 그 증가율이 둔화되지만, $L/D_1 > 1.0$ 인 경우에는 거의 선형적인 증가를 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 6($D_2/D_1=1.0$)과 Fig. 7($D_2/D_1=1.5$)에서도 관찰된다. 그러나 Fig. 8에서

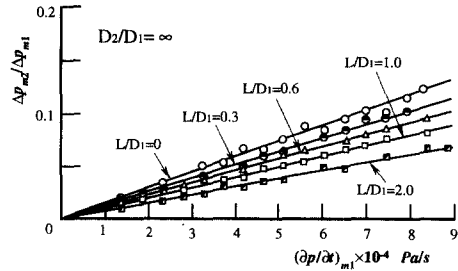


Fig. 8 Relation between $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ and $(\partial p/\partial t)_{m1}$ ($D_2/D_1=\infty$)

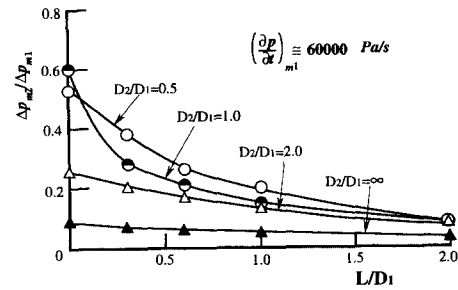


Fig. 9 Relation of $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ and L/D_1

와 같이 $D_2/D_1=\infty$ 의 경우에 $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ 의 값은 L/D_1 의 값에 거의 관계없이 초기압축파의 최대압력구배의 증가에 따라 선형적으로 증가하고 있다. 이들 측정값은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 모두 판단으로부터 132 mm의 위치($r/D_1=2$)에서 측정값이므로, 음의 원거리장의 이론에 적용될 수 있다.

Fig. 9에는 초기압축파의 최대압력구배 $(\partial p/\partial t)_{m1}$ 를 60000 Pa/s로 거의 일정하게 한 경우 L/D_1 에 따른 $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ 의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 $D_2/D_1=\infty$ 의 경우 즉 압축파가 무한대기로 전파하는 경우에는 $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ 의 값은 L/D_1 가 증가할수록 약간 감소하는 것으로 나타나지만, 그러나 그 감소는 크지 않다. 이러한 감소는 압축파가 대기중을 전파하는 경우에 발생하는 기체점성과 열전달 등에 의한 소산효과⁽²¹⁾와 위의 식 (4)에서 기술한 바와 같이 원거리음장 이론에 의한 감쇠라고 할 수 있다. 한편 D_2/D_1 의 값이 0.5로 비교적 작은 경우, L/D_1 가 증가할수록 $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ 의 값은 상당히 감소하며, L/D_1 의 증가에 대한 $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ 의 감소율은 D_2/D_1 가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 구체적으로 D_2/D_1 의 값이 1.0인 경우, 두 터널 사이의 거리를 $L/D_1=1.0$ 으로 하게 되면 $\Delta p_{m2}/\Delta p_{m1}$ 의 값은 70% 정도 감소하게 된다는 것

을 알 수 있다. 이것은 압축파의 과잉압의 관점으로 부터 고찰하는 경우, 한 터널에서 형성된 압축파는 다른 터널을 진입함으로써 상당히 감쇠하게 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 압축파의 감쇠는 김희동 등⁽²²⁾에 의하여 보고된 공기의 점성과 열전달에 의한 것 보다는, 판단으로부터 방출된 질량유량의 일부가 주위로 방출되는 것에 기인한다.

한편 L/D_1 가 0인 경우 즉 두 관이 연결된 경우에 $D_2/D_1=1.0$ 인 실험값을 제외하면, $\Delta p_{m_2}/\Delta p_{m_1}$ 의 값은 D_2/D_1 가 증가할수록 작아진다. 이것은 압축파가 급확대관을 전파함에 따라 유로의 단면적이 확대되는 것에 기인한다. 그러나 $D_2/D_1=1.0$ 과 0.5인 두 실험값을 비교하면, $D_2/D_1=1.0$ 인 경우에 대한 $\Delta p_{m_2}/\Delta p_{m_1}$ 의 값이 $D_2/D_1=0.5$ 의 경우에 비해 크다. 이것은 관내를 전파하는 압축파가 유로 단면적의 급축소 부분에서 일부는 통과하고 일부는 반사하기 때문인 것으로 생각된다.^(8,9) 따라서 본 실험값으로부터 유로 단면적의 급변화는 $\Delta p_{m_2}/\Delta p_{m_1}$ 의 값을 감소시킨다는 것을 알 수 있으며, 고속철도의 지하역 공간에서 형성되는 바와 같이, 유로 단면적의 급변화는 압축파의 과잉압력을 약화시키게 된다는 것을 알 수 있다.

한편 D_2/D_1 의 값을 1.0으로 고정하고, L/D_1 를 변화시킨 경우 압축파의 최대압력구배의 변화를 초기압축파의 최대압력구배에 대하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 실험값의 분산은 상당히 크지만, 대체로 압축파의 최대압력구배는 초기압축파의 압력구배가 클수록 커지며, 또 L/D_1 의 값이 작을수록 커진다. 이것은 두 터널 사이의 거리가 클수록 압축파의 최대압력구배는 작아지게 되며, 실제 고

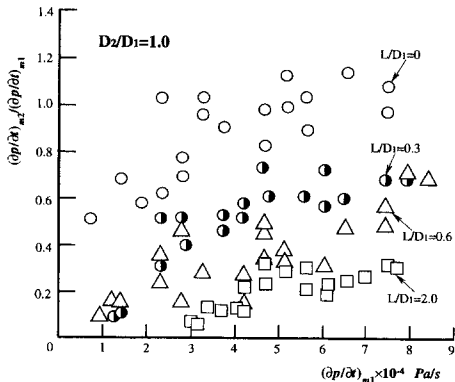


Fig. 10 Relation of $(\partial p/\partial t)_{m_2}/(\partial p/\partial t)_{m_1}$ and $(\partial p/\partial t)_{m_1}$ ($D_2/D_1=1.0$)

속철도 터널의 출구가 생활거주 지역이나 기타 산업시설에 노출이 되는 환경인 경우에는 터널내에 큰 공간을 설치하거나, 압축된 공기를 터널의부로 축출할 수 있는 배기 시스템을 채택함으로써 충격성 소음은 상당히 완화될 수 있다는 것을 의미한다. 더욱이 터널 출구에서 발생하는 충격성 소음뿐만 아니라 터널내부에서 압력파의 전파로 인한 압력변동 등도 상당히 완화될 수 있다. 따라서 이러한 연속 터널 시스템을 채택하는 경우에는 터널을 주행하는 열차의 주행 안정성을 향상 시킬 수 있으며, 공력소음, 터널내의 환기 등에 대한 문제의 해결에도 매우 유용하리라 판단된다. 한편 그림의 $L/D_1=0$ 에 대한 실험값으로부터 초기압축파의 최대압력구배가 증가하는 경우, $(\partial p/\partial t)_{m_2}/(\partial p/\partial t)_{m_1}$ 의 값은 1.0보다 커지게 된다. 이것은 압축파의 전파에 따른 비선형효과⁽²¹⁾에 기인한다.

Fig. 11에는 D_2/D_1 의 값을 ∞ 로 한 경우, L/D_1 를 변화시켜 압축파의 최대압력구배의 변화를 초기압축파의 최대압력구배에 대하여 나타내었다. 그림의 실험값으로부터 압축파의 압력구배는 초기압축파의 압력구배가 클수록 증가하며, 또 같은 초기압축파의 압력구배에 대해서는 L/D_1 의 값이 증가할수록 작아진다. 이러한 경향은 Fig. 10과 유사하지만, D_2/D_1 의 값이 큰 경우에는 압축파에 최대압력구배에 미치는 L/D_1 의 영향은 상대적으로 작아진다는 것을 알 수 있다. 구체적으로 L/D_1 의 값이 작은 경우에는 초기압축파의 압력구배가 증가할수록 $(\partial p/\partial t)_{m_2}/(\partial p/\partial t)_{m_1}$ 는 약간 증가하지만, L/D_1 의 값이 1.0 이상으로 되면 $(\partial p/\partial t)_{m_2}/(\partial p/\partial t)_{m_1}$ 는 초기압축파의 압력구배에 대해 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 또 Fig. 10과 비교로부터 같은 초기압축파의 압력구배 및 L/D_1 인 경우, D_2/D_1 의

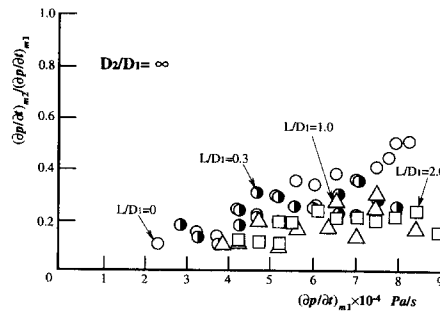


Fig. 11 Relation of $(\partial p/\partial t)_{m_2}/(\partial p/\partial t)_{m_1}$ and $(\partial p/\partial t)_{m_1}$ ($D_2/D_1=\infty$)

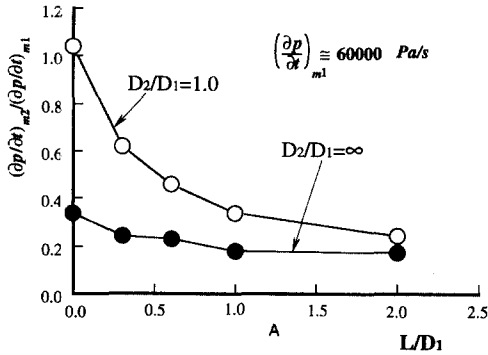


Fig. 12 Relation of $(\partial p/\partial t)_{m2}/(\partial p/\partial t)_{m1}$ and L/D_1

값이 증가할수록 $(\partial p/\partial t)_{m2}/(\partial p/\partial t)_{m1}$ 는 작아진다. 한편 Fig. 12에는 초기압축파의 압력구배가 60000 Pa/s로 거의 일정한 경우, L/D_1 의 값에 따른 $(\partial p/\partial t)_{m2}/(\partial p/\partial t)_{m1}$ 의 변화를 나타내었다. 그림의 실험값으로부터 D_2/D_1 의 값이 1.0인 경우 $(\partial p/\partial t)_{m2}/(\partial p/\partial t)_{m1}$ 는 L/D_1 가 증가할수록 단조롭게 감소한다. 그러나 D_2/D_1 의 값이 매우 큰 경우에는 $(\partial p/\partial t)_{m2}/(\partial p/\partial t)_{m1}$ 의 감소는 크지 않다. 이들 두 실험값의 비교로부터 $(\partial p/\partial t)_{m2}/(\partial p/\partial t)_{m1}$ 의 값은 L/D_1 가 2.0 이상으로 증가하는 경우에는 D_2/D_1 의 값에 관계 없이 거의 일정값을 갖게 된다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 열차가 터널에 돌입할 때 발생하는 압축파가 두 연속한 터널을 전파하는 경우에 압축파의 특성을 실험적으로 조사하였다. 고속열차가 두번째 터널에 진입할 경우에 터널의 입구에서 형성되는 압축파의 특성은 정성적으로 단일 터널의 파동현상과 유사하리라 판단된다. 그러나 선행압축파에 의하여 두번째 터널내에는 유동이 발생하게 되므로, 압축파와 터널내의 유동이 간섭하게 된다. 저자들은 이와 같은 터널제에 대한 파동현상을 구체적으로 조사하기 위하여 실험 및 수치계산을 수행하고 있다.

4. 결 론

고속철도 터널출구에서 발생하는 충격성 소음과 터널내부를 전파하는 압력파 현상을 조사하기 위하여, 연구에서는 두 연속한 터널을 전파하는 압축파의 특성을 조사하였다. 실험에서는 충격파관을 개조하여 두 연속터널을 모사하였으며, 압축파의 특성에 미치는 두 터널 사이의 거리, 터널의 단면적

등의 영향을 상세하게 조사하였다. 그 결과 두번째 터널에서 형성되는 압력파의 피크압력은 두 터널 사이의 거리가 클수록, 두 터널의 단면적비가 클수록 낮아졌다. 또 초기압축파면의 압력구배가 클수록 두번째 터널에서 형성되는 압력파의 피크 압력 및 파면의 압력구배는 증가하였다.

참고문헌

- (1) Wood, D. J., Funk, J. E. and Boulos, P. F., 1990, "Pipe Network Transients-Distributed and Lumped Parameter Modeling," *Proc. 6th Intl. Conf. on Pressure Surges*, Cambridge, England, pp. 131~142.
- (2) Moody, F. J., 1990, "Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics," John Wiley & Sons, New York.
- (3) 김희동, 1996, "터널내를 單獨走行하는 列車의 空氣力學的 解析," 大韓機械學會, 春季學術大會 論文集
- (4) 김희동, 1996, "터널내를 郊行하는 列車의 空氣力學的 解析," 大韓機械學會, 秋季學術大會 論文集.
- (5) 김희동, 1996, "고속鐵道の 空氣力學III," 大韓機械學會誌 第36卷, 第5號.
- (6) 김희동, 1996, "고속鐵道の 空氣力學IV," 大韓機械學會誌 第36卷, 第11號.
- (7) 김희동, 1994, "고속鐵道 터널에서 發生하는 流體力學的 波動現象," 大韓機械學會誌 第34卷, 第10號.
- (8) 김희동, 1996, "急縮小管을 傳播하는 壓縮波에 대한 理論的 研究," 大韓機械學會論文集, 第20卷, 第12號.
- (9) 김희동, 1996, "急縮小管을 傳播하는 壓縮波에 대한 實驗的 研究," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第9號.
- (10) Ozawa, S., Maeda, T., Matsumura, T., Uchida, K., Kajiyama, H. and Tanemoto, K., 1991, "Countermeasures to Reduce Micro-Pressure Waves Radiating from Exits of Shinkansen Tunnels," *Proc. of 7th Intl. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Nov. 1991, Brighton, UK.
- (11) Ozawa, S., 1979, "Studies of Micro-Pressure

- Wave Radiated from a Tunnel Exit," *Railway Technical Res. Rept. of Japan*, No. 1121.
- (12) 小橋豊, 1968, "音と音波," 裳華房.
- (13) Kim, H. -D. and Setoguchi, T., 1996, "Experiment on Passive Control of Impulsive Noise Generating at Exit of High-Speed Railway Tunnel," *Trans. KSME*, Vol. 20, No. 7.
- (14) Kim, H. -D. and Setoguchi, T., 1996, "Passive Control of Impulsive Noise Caused by Unsteady Compression Wave," *ASME Trans. Journal Fluid Engineering* (to be published).
- (15) Kim, H. -D. and Setoguchi, T., 1996, "Interaction of Unsteady Expansion Wave with Cross-Sectional Area Change in Tube," *KSME Journal*, Vol. 10, No. 4.
- (16) Kim, H. -D. and Setoguchi, T., 1996, "Model Test on Negative Impulsive Wave Generator for Noise Reduction," *ASME Journal Vib. and Acoustics* (submitted).
- (17) 金義東, 瀬戸口俊明, 1996, "垂直坑을 이용한 터널내 非定常 壓縮波의 被動制御," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第9號.
- (18) 金義東, 瀬戸口俊明, 1996, "多孔壁을 傳播하는 壓縮波의 實驗的 研究," 大韓機械學會論文集, 第20卷, 第12號.
- (19) Kim, H. -D. and Setoguchi, T., 1997, "Reduction of Impulsive Noise Caused by Unsteady Compression Wave," *JSME International Journal*, Series B, Vol. 40, No. 7.
- (20) 松尾一泰, 外3人, 1992, "管内を傳ばする 壓縮波の開口端からの放射," 日本機械學會論文集, 第58卷, 第546號, pp. 331~337.
- (21) 金義東, 1995, "高速鐵道 터널에서 發生하는 波動現象에 關한 衝擊波管의 研究2(壓縮波의 非線形效果와 減衰)," 大韓機械學會論文集, 第19卷, 第8號.
- (22) 金義東, 1996, "直管内를 傳播하는 壓縮波의 減衰와 變形에 關한 數值解析的 研究," 大韓機械學會論文集, 第20卷, 第7號.