

<논 문>

## 급축소관을 전파하는 압축파에 관한 실험적 연구

김희동\* · 松尾一泰\*\*

(1996년 8월 16일 접수)

### Experimental Study on Compression Wave Propagating in a Sudden Reduction Duct

Heuy-Dong Kim and Kazuyasu Matsuo

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

#### Abstract

Compression waves propagating in a high-speed railway tunnel develops large pressure fluctuations on the train body or tunnel structures. The pressure fluctuations would cause an ear discomfort for the passengers and increase the aerodynamic resistance of trains. As a fundamental research to resolve the pressure wave phenomenon in the tunnel, experiments were carried out by using a shock tube with an open end. A blockage to model trains inside the tunnel was installed on the lower wall of shock tube, thus forming a sudden cross-sectional area reduction. The compression waves were obtained by the fast opening gate valve instead of a conventional diaphragm of shock tube and measured by the flush mounted pressure transducers with a high sensitivity. The experimental results were compared with the previous theoretical analyses. The results show that the ratio of the reflected to the incident compression wave at the sudden cross-sectional area reduction increases but the ratio of the passing to the incident compression wave decreases, as the incident compression wave becomes stronger. This experimental results are in good agreements with the previous theoretical ones. The maximum pressure gradient of the compression wave abruptly increases but the width of the wave front does not vary, as it passes over the sudden cross-sectional area reduction.

#### 1. 서 론

최근 세계 각국에서는 철도의 고속화를 위한 기술 및 연구개발을 서두르고 있다. 현재 프랑스의 TGV, 독일의 ICE, 일본의 Sinkansen 등에서는 시속 300 km/h를 상회하는 차량이 개발되었으며, 시

험주행에서는 프랑스의 TGV-A가 시속 515 km/h를 기록하였다. 그러나 이와 같은 고속열차의 개발에는 지금까지 상당한 기술적 시행착오와 관련연구가 진행되어 왔다. 우리나라에서 현재 계획하고 있는 고속철도는 외국의 상황과는 달리, 고속열차가 인가 밀집지역을 자주 통과하게 될뿐만 아니라 지형적인 관계로 다수의 터널이 필요한 실정이다. 이 경우 환경소음 문제는 물론 터널내의 공기역학적 제문제들은 우리나라에서 해결되어야 할 고속철도

\*회원, 안동대학교 기계공학과

\*\*九州大學 總合理工學研究科

설계 문제라고 할 수 있다.

터널내에 고속열차가 돌입하게 되면, 터널입구 부근의 공기가 압축되어 압축파가 형성된다. 이러한 압축파는 터널내를 전파하여 터널의 출구에 달하게 되면, 팽창파로서 반사하게 된다. 이 경우에 압축파는 완전반사하지 않고 그의 일부는 미기압파(impulsive wave)로 불리는 펄스형태의 압력파로 되어 터널의 외부로 전파하게 된다.<sup>(1)</sup> 이때 발생하는 충격성 소음(impulsive noise)은 선로주변에 대한 소음공해로 작용하게 된다. 한편 터널내를 전파하는 압축파가 터널내를 주행하는 열차와 간섭(interference)하게 되면, 열차주변에는 큰 압력변동이 발생하여 주행저항으로 될 수 있으며,<sup>(1,2)</sup> 이러한 압력변동이 객실내에 침투하게 되면 열차내 승객의 심각한 청각장애를 유발하게 된다. 종래의 연구<sup>(3,4)</sup>에 의하면, 터널입구에 형성되는 압축파의 강도는 열차의 돌입속도의 2승에 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 압축파가 열차/터널에 미치는 영향의 해명은 매우 중요한 공학적인 과제임에 틀림없다.

터널내를 주행하는 열차의 공기역학적 문제들은 열차의 고속화와 관련되어 상당히 많은 기술적 문제들을 내포하고 있다. 이러한 기술적 문제들을 극복하기 위하여 이론해석, 수치시뮬레이션, 모형실험 및 현차실험 등, 열차/터널의 공기역학적 문제에 관한 많은 연구개발이 진행되어 왔다. 예를 들면 문헌<sup>(5,6)</sup>에서는 압축파가 터널 출구로부터 방출되는 경우에 발생하는 미기압파를 TVD 수치계산법으로 시뮬레이션 하였으며, 문헌<sup>(7,8)</sup>에서는 현차실험 및 풍동실험을 수행하였다. 그 결과 미기압파에 의한 충격성 소음의 강도는 터널 출구에서 형성되는 압축파의 압력구배에 비례한다고 보고하였다. 따라서 이러한 압축파의 압력구배를 완화시키기 위하여 선로에 자갈(ballast)을 적용하거나,<sup>(9)</sup> 입구후드(entrance hood)를 설치하는 방법,<sup>(10)</sup> 열차의 선두부와 후미부의 형상을 최적화하는 방법,<sup>(11)</sup> 터널내에 다공벽(porous wall)이나 지갱(branch tunnel)을 설치하는 방법<sup>(12,13)</sup> 등 지금까지 상당한 많은 저감법들이 연구되어 왔다.

그러나 터널내에서 발생하는 압력파를 경감하기 위한 연구는 지금까지 거의 이루어지지 않고 있으며, 이것은 터널내를 전파하는 압력파의 특성이 충분히 알려지지 않은 이유라고 할 수 있다. 예를 들면 압축파가 관의 끝에서 반사/방출되는 경우에 대

한 정상적인 데이터는 아직까지 없으며, 최근까지 이에 관한 연구는 수행되지 않았다. 또 터널내를 전파하는 압축파가 열차 및 기타 구조물과 간섭하는 경우에 대한 연구결과는 거의 없으며, 이는 실제 터널에서 발생하는 파동현상에 대한 이해를 어렵게 하고 있다. 최근 문헌<sup>(14)</sup>에서는 객실내에 승객의 청각장애에 관한 연구가 수행되었다. 문헌<sup>(15)</sup>에서는 이러한 청각장애를 경감하기 위하여 차량에 특별한 환기 시스템을 적용하였다.

터널내를 전파하는 압력파 현상들과 유사한 연구로 종래 관내를 전파하는 충격파에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. 단면적이 변화하는 관내에 충격파가 전파하는 유동에 관한 연구는 과거 Chester,<sup>(16)</sup> Chisnell,<sup>(17)</sup> Whitham<sup>(18)</sup> 등에 의하여 상당히 많은 연구가 수행되었다. 그러나 이와 같은 관내를 전파하는 충격파에 관한 연구와는 달리 압축파에 관한 연구는 지금까지 거의 행하여지지 않았다.<sup>(19)</sup>

본 연구에서는 터널내를 전파하는 압축파가 단독 열차와 간섭하는 경우에 대하여, 충격파관을 이용하여 모사실험을 수행하였다. 실험은 일반적인 단순형 충격파관(simple shock tube)을 이용하였으나, 종래 일반적으로 사용되어 왔던 격막(diaphragm) 대신에 급속개구밸브(fast opening gate valve)를 적용하여 압축파를 형성시켰다. 또 실제 터널에서 발생하는 파동현상에 관련되는 복잡한 요소들을 생략하고, 충격파관내에 직사각형 단면의 모델을 적용하여 압축파의 특성 즉 단면축소가 압축파면의 압력구배 및 시간폭 등에 미치는 영향을 조사하였으며, 단면축소부에서 압축파의 반사(reflection)와 통과과정(passing process)에 대하여 이전에 수행된 이론해석의 결과<sup>(20)</sup>와 비교하였다. 따라서 본 연구의 결과는 터널내에서 발생하는 압력파와 열차의 간섭현상을 이해하는데 많은 도움을 줄 수 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 충격파관

본 연구에서 사용된 압축파 발생장치 및 압력측정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 압축파 발생장치는 단순형 충격파관으로, 격막 대신에 급속개구 밸브(fast opening gate valve)를 적용<sup>(21)</sup>하였다. 충격파관의 고압실은 내경 76 mm, 길이 약 4 m 정도인 PVC관으로 되어 있으

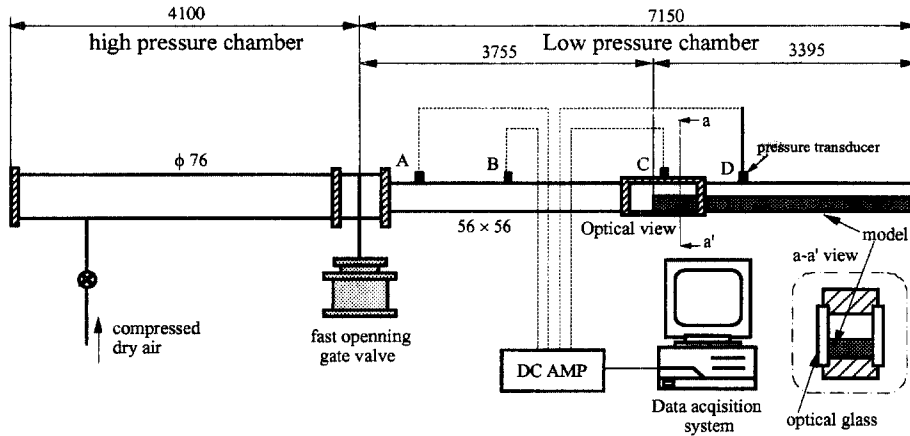


Fig. 1 Experimental facility and measuring system

며, 구동기체(driver gas)인 고압의 건조공기를 주입하기 위하여 고압실의 관의 끝은 밀폐되었다. 또 저압실은 정사각형 단면(56 mm×56 mm)의 길이 7 m인 스테인리스 덕트로 제작되었으며, 저압실의 관끝은 대기에 개방되어 있다. 저압실내에는 유로의 단면적을 감소시키기 위하여 급속개구밸브의 위치로부터 약 3.7 m의 위치에서부터 저압실의 관단까지에 걸쳐 직사각형 단면의 모델을 설치하였다. 이 모델은 터널내를 주행하는 열차의 역할을 한다.

한편 그림에 나타낸 바와 같이 저압실의 관벽에는 급속개구밸브로부터 750 mm, 1900 mm, 3900 mm, 4900 mm의 위치에 압축파의 압력을 측정하기 위하여 고감도 압력센서(Kulite XCS-190)를 설치하였다. 본 연구에서 저압실에 설치한 모델은 단면적이 각각 56 mm×12 mm, 56 mm×21 mm, 56 mm×35 mm인 세 종류를 적용하였으며, 저압실의 유로단면적을 A, 모델의 단면적을 Am으로 하는 경우  $R(=Am/A$ : 이하에서 blockage 비로 정의한다)의 값은 각각 0.2, 0.4 및 0.6로 되었다. 실험은 급속개구밸브를 닫은 상태에서 고압실에 대기압보다 약간 높은 압력의 건조 공기를 충전시켜, 순간적으로 밸브를 열어 저압실에 압축파를 발생시켰다. 압축파의 측정에는 고압실과 저압실의 관끝으로부터 반사하는 압력파의 영향을 없애기 위하여, 정압공의 위치선정에 특별한 주의가 필요하였다. 더욱이 두 개의 압력파가 중첩되는 위치에서 압력 측정을 수행하면, 정확한 압력값을 얻을 수 없으므로, 충격파관의 단순이론<sup>(22)</sup>을 이용하여 간단한 계산을 수행한 후에, 각 정압공의 위치는 관내에서

파동이 중첩되지 않도록 적절한 위치를 선정하였다.

본 연구에서와 같은 압축파의 실험을 수행하는 경우 임의의 파면형상을 가지는 압축파에 대한 높은 재현성이 요구된다. 본 연구에서 적용한 급속개구밸브<sup>(21)</sup>는 종래의 격막장치에 비하여 비교적 개구시간이 길며 재현성도 매우 높았다. 또 밸브의 구동압력을 조절하여 임의의 폭과 압력구배를 가지는 압축파를 발생시킬 수 있었다. 또 압축파의 강도는 충격파관의 고압실 압력으로 조절이 가능하였다.

## 2.2 실험방법

Fig. 2에는 본 실험장치에서 발생하는 파동선도 및 압력분포를 도식적으로 나타내었다. 실험은 급속개구밸브를 열면( $t=0$ ), 고압실의 공기가 저압실 내로 유입하게 되므로 저압실에는 입사압축파(incident compression wave) C1이 형성되며, 그 배후에는 고압실의 기체와 저압실의 기체를 구분하는 접촉면(contact surface) CS1이 형성된다. 한편 Fig. 3의 파형선도에 도식적으로 나타낸 바와 같이 고압실의 공기는 후퇴팽창파(backward-facing expansion wave) E1에 의하여 팽창하게 된다. 입사압축파 C1은 저압실을 오른쪽으로 전파하여 단면축소부( $x=0$ )에 달하게 되면 일부는 통과압축파 C2로 단면축소부를 통과하며, C2의 배후에는 접촉면 CS2가 형성된다. 한편 나머지 일부는 단면축소부에서 반사하여 반사압축파(reflected compression wave) C3를 형성하게 된다. 한편 고압실의

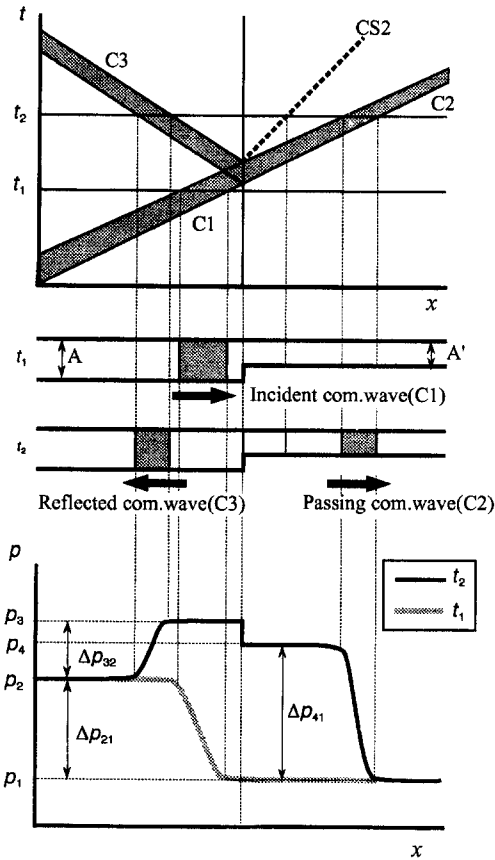


Fig. 2 Wave diagram and pressure distributions

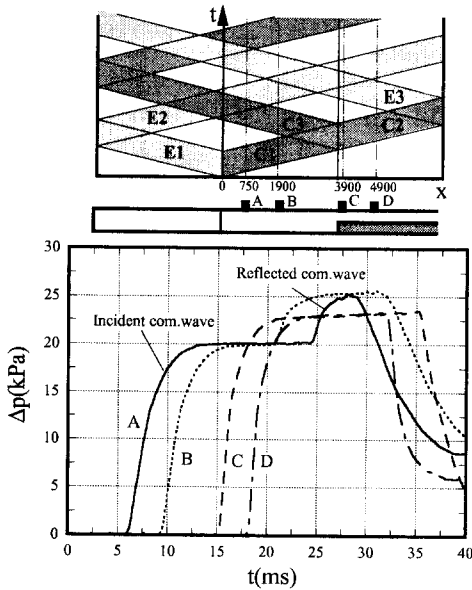


Fig. 3 Experimental pressure wave forms

관단은 밀폐되어 있으므로, 후퇴팽창파 E1은 관끝에서 팽창파 E2로 반사하며, 또 저압실의 관끝은 대기에 개방되어 있으므로 통과압축파 (passing compression wave) C2는 개방단 (open end)에서 팽창파 E3로 반사하게 된다. 본 충격파관의 고압실과 저압실의 길이는 이러한 반사파가 측정점에 도달하기까지 충분히 긴 시간이 걸리도록 설계되었다. 따라서 Fig. 1에 나타난 4개의 압력센서(편의상 센서 A, B, C, D로 정한다)에 의하여 측정된 압력값에 이들 반사파의 영향이 미치지 않도록, 즉 다른 두 파동이 중첩되지 않도록 측정위치를 적절하게 선정하였다. 또 Fig. 2에는 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에서 충격파관 내에서 발생하는 압력분포를 각각 그늘선 (shadow line)과 실선으로 나타내었다. 본 연구에서는 실험값을 정리하기 위하여 입사압축파의 강도를  $\Delta p_{21}$ , 반사압축파의 강도를  $\Delta p_{32}$ , 통과압축파의 강도를  $\Delta p_{41}$ 로 하였으며, 충격파관의 고압실의 구동압력<sup>(20)</sup>을  $\Delta p_h$ 로 정하였다.

한편 압력센서로부터 전기적인 출력은 직류증폭기 (TEAC SA-59)로 증폭되어 A/D 변환기 및 파형기록장치 (Canopus, ADX-98H)를 거친 후, 전압값으로 퍼스널 컴퓨터에 입력된다. 압력측정의 샘플링 주파수는 33.33 kHz로 0.03 ms 간격으로 2 keywords를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 각 압력센서로부터 측정된 압력파형을 나타내었다. 그림의 파형으로부터 센서 A와 B로 측정된 파형은 압력상승이 2단계로 구성되어 있다. 이것은 입사압축파에 의한 압력상승과 단면축소부로부터 반사압축파에 의한 압력상승이다. 또 두 파형에서 압력상승 후의 압력감소는 고압실의 관끝으로부터 반사팽창파의 영향 때문이다. 한편 센서 C와 D로 측정된 파형에서 압력상승은 통과압축파에 의한 것으로, 반사팽창파의 영향으로 인하여 압축파 후미에서 압력이 감소한다. Fig. 4에는 구동압력  $\Delta p_h$ 에 대한 입사압축파의 강도  $\Delta p_{21}$ 의 변화를 나타내었다. 그림에는 비교를 위하여 정상 이론에 의한 이론해석값<sup>(20)</sup>을 함께 나타내었으며, ○는 여러 실험조건에서 얻어진 실험값이다. 그림에서 구동압력이 클수록 입사압축파는 강해진다. 이러한 경향에 대하여 실험값과 이론값은 매우 잘 일치하지만,  $\Delta p_h$ 가 커질수록 이론값과 실험값의

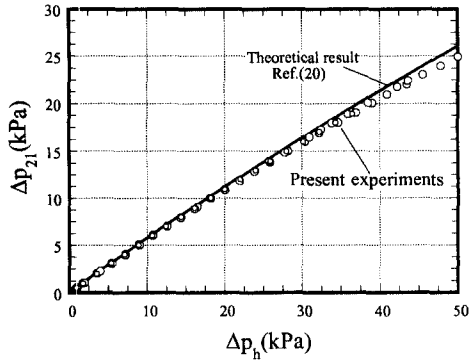


Fig. 4 Driver pressure vs incident compression wave strength

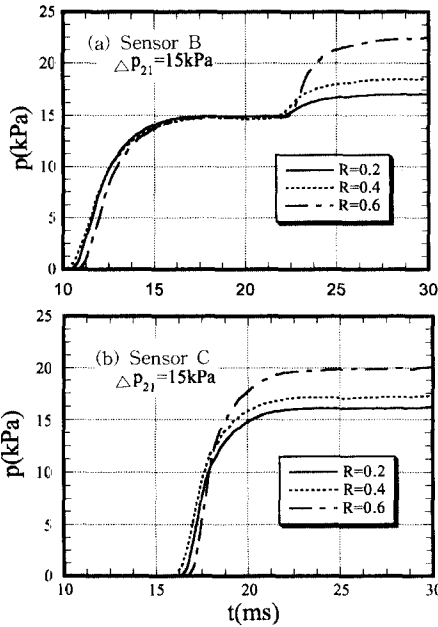


Fig. 5 Comparisons of compression wave forms

차이가 발생하게 되며, 이론값에 비해 실험값은 약 3~4% 정도 낮게 나타난다. 이것은 단면축소부에서 발생하는 vortex 및 축류효과 등으로 인하여 압력손실이 발생하기 때문이다.

Fig. 5(a)와 (b)에는 입사압축파의 강도를 15 kPa로 일정하게 하여 blockage 비 R의 값을 0.2, 0.4, 0.6으로 변화시킨 경우, 각각 센서 B와 C로 측정된 압력파형들을 나타내었다. 그림(a)에서 압력은 2단계로 상승한다. 최초의 압력상승은 입사압축파에 의한 것으로 R의 값에 영향을 받지 않는다. 그러나 반사압축파로 인한 두 번째의 압력상승은 R의 값이 클수록 높게 나타난다. 한편 그림(b)

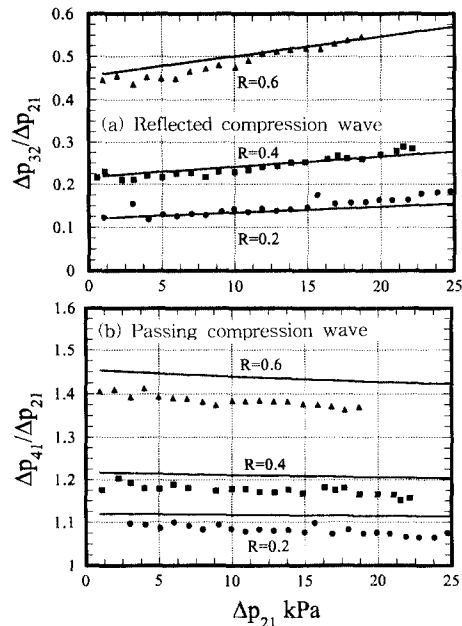


Fig. 6 Variation of reflected and passing compression wave with incident compression wave

의 파형에서 압력상승은 통과압축파에 의한 것으로 R의 값이 클수록 통과압축파에 의한 압력상승이 커지게 된다는 것을 나타낸다.

Fig. 6(a)와 (b)에는 R의 값을 변수로 하여 입사압축파의 강도가 변화하는 경우 각각 반사압축파와 통과압축파의 강도를 입사압축파의 강도로 무차원하여 나타내었다. 그림에는 본 실험결과와 이전에 수행된 이론해석의 결과<sup>(20)</sup>를 비교하기 위하여 실선으로 이론값을 나타내었다. 먼저 그림(a)로부터 일정 R값에 대하여 입사압축파의 반사비율은 입사압축파가 강할수록 강하게 나타나며, 또 입사압축파의 강도가 같은 경우에는 R의 값이 클수록 반사파의 강도가 커지게 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 이론해석결과와 매우 잘 일치한다. 그림(b)에서 일정 R(구체적으로 0.6인 경우)에 대하여 입사압축파가 강할수록 입사압축파의 통과비율은 작아지며, 또 입사압축파의 강도가 같은 경우에는 R의 값이 클수록 통과비율은 커지게 된다. 그러나 R의 값이 0.4 및 0.2의 경우에는 입사압축파의 통과비율은 입사압축파의 강도가 증가할수록 약간 감소하는 경향을 나타내고 있지만, 입사압축파의 강도에 강하게 의존하지 않는다. 위의 두 그림의 비교로부터 R의 값이 같은 경우 입사압축파

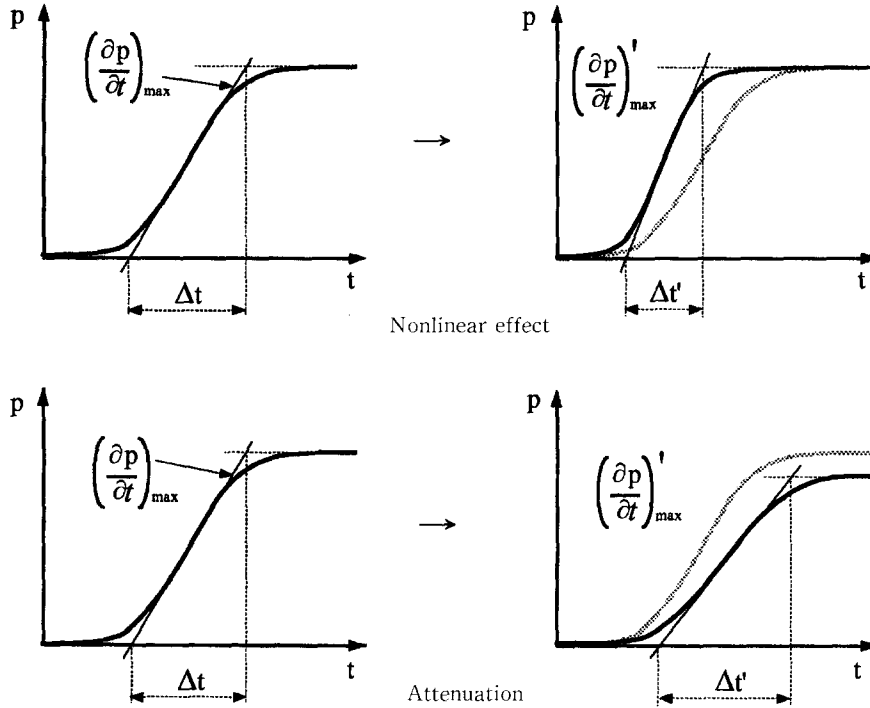


Fig. 7 Distortion of propagating compression wave

가 강할수록 단면축소부에서 반사하는 비율이 증가하게 되며, 통과하는 비율은 상대적으로 감소한다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 압축파의 전파속도는 압축파 전방의 음속을  $a_0$ , 압력을  $p_0$ 라고 하는 경우 다음 식<sup>(22)</sup>으로 주어진다.

$$u = a_0 \left\{ \frac{r+1}{r-1} \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{r-1}{2r}} - \frac{2}{r-1} \right\} \quad (1)$$

여기에서 압축파의 전파속도  $u$ 는 압력  $p$ 에 따라서 변화하며, 따라서 본 연구에서 측정된 압축파의 경우 압축파 파두(head of wave)와 파미(tail of wave)에서 전파속도는 달라지게 된다. 이 때문에 압축파는 전파에 수반하여 파형이 급격하게 변화하게 되는 비선형효과(nonlinear effect)와 기체의 점성과 열전도성 등의 소산효과로 인한 압축파의 감쇠(attenuation)가 발생하게 된다.<sup>(23)</sup> 따라서 관례를 전파하는 압축파는 비선형효과와 감쇠라는 서로 상반된 작용을 수반하게 되므로 이들의 작용의 대소에 의하여 파형이 결정된다고 할 수 있다.

Fig. 7에는 압축파의 비선형효과와 감쇠가 파면에 미치는 영향을 도식적으로 나타내었다. 본 연구

에서는 압축파면의 형상을 최대압력구배  $\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max}$ 와 시간폭  $\Delta t$ 로 정의하였다. 본 실험에서는 입사 압축파, 반사압축파 및 통과압축파에 대하여 각각 두 위치에서 파형을 측정하였으므로, 이들 실험값으로부터 직관내를 전파하는 압축파면의 최대압력구배 및 시간폭의 변화를 비교할 수 있다.

Fig. 8에는  $R=0.4$ 로 고정된 경우 입사압축파, 반사압축파 및 통과압축파의 최대압력구배에 미치는 각 압축파의 강도의 영향을 나타내었다. 그림의 실험점 중 ●는 최초의 압력센서로부터 측정된 압력파형으로부터 얻어진 값이며, ○는 두 번째 센서에 의한 값이다(Fig. 1 참조). 따라서 두 실험값의 비교로부터 각 압축파의 전파에 따라 최대압력구배의 변화를 관찰할 수 있다. 그림(a), (b) 및 (c)로부터 입사압축파가 강할수록 최대압력구배는 단조롭게 증가한다. 이것은 본 실험에서 적용된 압축파의 강도 및 압력구배의 범위에 대하여, 압축파가 직관을 전파하는 경우에 감쇠보다도 비선형효과가 현저하게 나타난다는 것을 의미한다. 한편 그림(a)의 두 실험값(●와 ○)으로부터 입사압축파의 강도가 5 kPa보다 작은 경우에는 비선형효과는 무

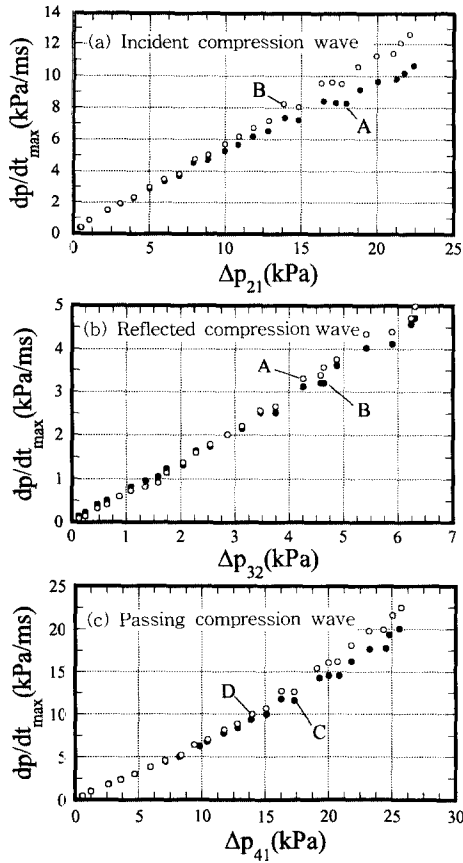


Fig. 8 Relation of compression wave strength with maximum pressure gradient ( $R=0.4$ )

렷하게 나타나지 않지만, 5 kPa에서는 비선형효과가 나타나며, 입사압축파가 강할수록 비선형효과는 커진다는 것을 알 수 있다. 또 그림 (b)에서 반사압축파의 강도가 약 2.5 kPa를 기준으로 하여 두 실험값이 달라진다. 즉 반사압축파의 강도가 약 2.5 kPa 이하에서는 ●는 ○보다 크며, 2.5 kPa 이상에 대해서는 그 반대이다. 즉 반사압축파의 강도가 약 2.5 kPa 이하에서는 반사압축파가 전파해 감에 따라 그의 최대압력구배는 작아지며, 2.5 kPa 이상의 범위에 대해서는 최대압력구배는 커진다. 이것은 반사압축파가 약한 경우에는 비선형효과보다는 감쇠의 영향이 크기 때문이며, 반대로 반사압축파가 상대적으로 강한 경우에는 비선형효과가 커지게 되기 때문이다. 그림 (c)에서 통과압축파의 강도가 6 kPa 이하의 범위에서는 전파에 따른 최대압력구배의 변화는 거의 관찰되지 않으며, 6 kPa 이상의 범위에 대해서는 비선형효과가 나타나게 된

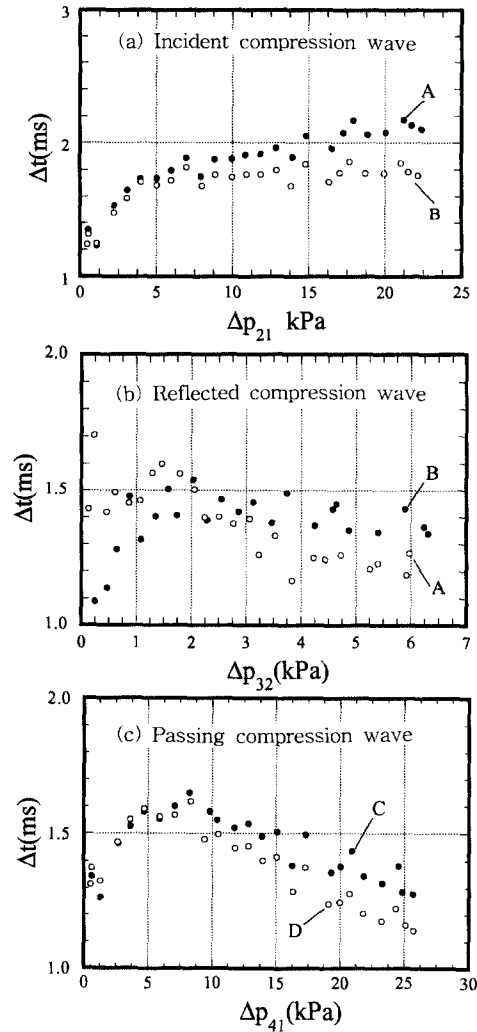


Fig. 9 Relation of compression wave strength with time width ( $R=0.4$ )

다. 따라서 통과압축파가 약한 경우에는 비선형효과와 감쇠가 서로 균형을 취한다고 생각할 수 있다.

Fig. 9에는  $R=0.4$ 로 고정한 경우 입사압축파, 반사압축파 및 통과압축파의 시간폭  $\Delta t$ 에 미치는 각 압축파의 강도의 영향을 나타내었다. 각 실험점들은 그림중에 기술한 각 센서에 의해 얻어진 값이다. 그림 (a)로부터 입사압축파의 강도가 5 kPa까지 증가함에 따라 입사압축파의 시간폭은 급격하게 커지게 되지만, 5 kPa를 넘어 증가함에 따라 시간폭의 증가비율은 작아진다. 그리고 실험값 ●와 ○의 비교로부터 입사압축파가 전파함에 따라 압축파

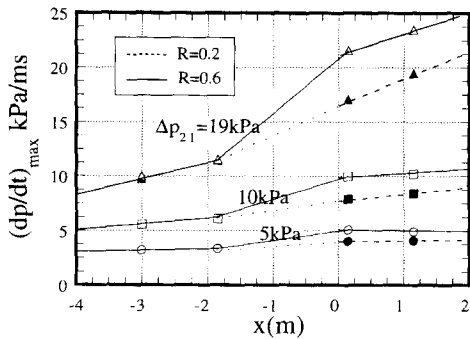


Fig. 10 Change of maximum pressure gradient

의 시간폭은 작아진다. 이것은 감쇠의 영향보다도 비선형효과가 크다는 것을 의미한다. 또 그림(b)에서는 반사압축파의 시간폭은 반사압축파의 강도 약 2.5 kPa를 전후로 하여 다른 경향을 나타내고 있다. 즉 반사압축파의 강도가 2.5 kPa 이하의 범위에서는 반사압축파의 강도가 증가할수록 시간폭은 증가하게 되지만, 그 이상으로 강도가 증가하는 경우 반사압축파의 시간폭은 점차 감소한다. 더욱이 반사압축파의 전파에 대한 실험값 ●와 ○의 비교로부터 반사압축파의 강도에 따라 시간폭의 변화는 다르게 나타난다. 즉 반사압축파가 약 2.5 kPa보다 약한 경우에는 전파에 따라 시간폭은 증가하며, 그 이상으로 강한 경우에는 반사압축파의 시간폭은 감소한다. 이것은 반사압축파가 상대적으로 약한 경우에는 비선형효과보다도 감쇠의 영향이 크고, 반사압축파가 강한 경우에는 비선형효과의 영향이 크게 된다는 것을 의미한다. 한편 그림(c)에서 통과압축파의 강도에 따른 시간폭의 변화는 그림(b)와 유사한 경향을 나타내지만, 통과압축파의 전파에 따른 시간폭의 변화는 통과압축파의 강도가 약 6 kPa 이하에서는 관찰되지 않는다. 그러나 통과압축파의 강도가 6 kPa이상의 범위에 대해서는 전파에 따라 시간폭은 감소한다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 입사압축파, 반사압축파 및 통과압축파의 특성은 압축파의 강도에 매우 강하게 의존한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에는 단면축소부를 전파하는 압축파의 최대압력구배의 변화를 거리  $x$ 에 대하여 나타내었다. 그림의 실험값은 입사압축파의 강도와  $R$ 의 값을 변화시켰다. 그림으로부터 유로의 단면적이 변화하는  $x=0$ 에서 최대압력구배가 급격하게 변화하며, 그 변화의 정도는  $R$ 의 값이 클수록 크게 나타

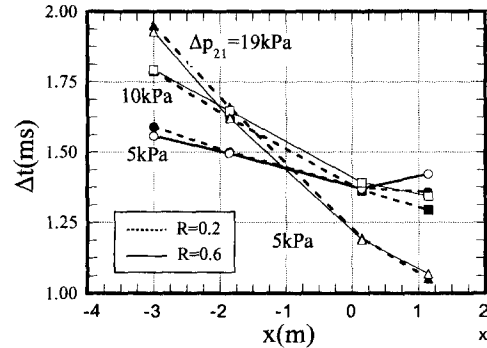


Fig. 11 Change of time width of compression wave front

난다는 것을 알 수 있다. 더욱이 입사압축파가 강할수록 유로의 단면적 변화의 영향이 크며, 단면적의 변화가 없는 부분에서 최대압력구배의 변화는 파의 비선형효과 때문이다.

Fig. 11에는 압축파가 단면축소부를 통과하는 경우 파면의 시간폭  $\Delta t$ 의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 유로의 단면적이 변화하는  $x=0$ 의 위치에서 급격한 불연속은 뚜렷하게 나타나지 않으며, 파면의 시간폭에 미치는  $R$ 의 영향은 크지 않다. 또 입사압축파가 강해진다고 하더라도  $x=0$ 에서 파면의 시간폭에 미치는 유로 단면적 변화의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그림에서 유로의 단면적 변화가 없는 곳에서 시간폭의 변화는 압축파의 비선형효과에 의한 것이다. 이상으로부터 유로의 파장을 가지는 압축파가 단면축소부를 통과하는 경우에 압축파의 최대압력구배는 불연속적으로 증가하지만, 파면의 시간폭은 거의 변하지 않는다는 것을 알았다.

#### 4. 결론

고속철도 터널내에서 발생한 압축파가 열차 혹은 터널내 기타 구조물 등과 간섭하는 유동장을 해명하기 위한 기초적 연구의 일환으로, 본 연구에서는 충격파관을 이용한 모사실험을 수행하여 이전의 이론해석 결과와 비교하였다. 그 결과 blockage비가 갈수록, 또 입사압축파가 강할수록 반사압축파 및 통과압축파는 강하게 된다는 것을 알았다. 또 단면축소부에서 입사압축파의 반사비율은 입사압축파가 강할수록 증가하게 되며, 반대로 통과비율은 감소하였다. 한편 압축파가 유로 단면이 일정한 관내를 전파하는 경우에 파면의 압력구배와 시간폭은 연속



적으로 변화하며, 압축파가 약할수록 감쇠의 영향이 상대적으로 크게 되기 때문에 파형은 완만하게 되었다. 그러나 압축파가 강할수록 비선형효과가 크게 되므로 파형은 급격한 형태로 변화하였다. 그리고 압축파가 단면축소부를 통과하는 경우에는 파면의 최대압력구배는 크게 증가하지만, 파면의 시간폭은 거의 변화하지 않았다.

### 참고문헌

- (1) 김호동, 1996, "고속鐵道の 空氣力學 I ~IV," 大韓機械學會誌 第36卷1號, 第36卷3號, 第36卷5號, 第36卷10號.
- (2) 김호동, 1996, "터널내를 주행하는 1열차의 공기역학적 해석," 大韓機械學會論文集 第21卷 第8號.
- (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) 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.
- (5) Sekine, N., et. al., 1988, "Initiation and Propagation of Shock Waves in the Exhaust Pipe of an Internal Combustion Engine," *Transactions of JSME*, Vol. 54, No. 498 (In Japanese).
- (6) 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.
- (7) 井門郭志, 飯田雅宣, 前田達夫, 1993, "列車先頭部・後尾部形狀最適化のための風通試驗," 日本鐵道總研報告, 第7卷, 第7號.
- (8) 前田達夫, 木下眞夫, 梶山博司, 種本勝二, 1987, "新幹線電車(0系, 100系, 200系)の空氣抵抗," 日本鐵道技術研究所報告, 第1371號.
- (9) Ozawa, S., Maeda, T., Matsumura, T. and Uchida, K., 1993, "Effect of Ballast on Pressure Wave Propagating through Tunnel," *The International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan.
- (10) 小澤智, 内田俊孝, 前田達夫, 1977, "入口緩衝工による備後トンネル微氣壓波の低減," 日本鐵道技術研究所報告書, No. 1054.
- (11) 前田達夫, 木下眞夫, 種本勝二, 本間亨男, 1984, "新幹線電車先頭部形狀モデルチェンジのための風通試驗," 日本鐵道技術研究所速報, 第A-84-20號.
- (12) 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).
- (13) Kim, H. D. and Setoguchi, T., 1996, "Passive Control of Unsteady Compression Wave Using Porous Walls," *ASME Trans. Journal Fluid Engineering* (submitted).
- (14) 佐藤清, 池田守利, 中川正祥, 1989, "人の耳つん感覚と氣壓變化," 日本鐵道總研報告, 第3卷, 第4號.
- (15) 善田康雄, 1988, "シミュレーションによる新幹線車輻換氣システムの檢討," 日本鐵道總研報告, 第2卷, 第12號.
- (16) Chester, W., 1954, "The Quasi-Cylindrical Shock Tube," *Philosophical Magazine*, Vol. 45, No. 2, pp. 1293~1301.
- (17) Chisnell, R. F., 1957, "The Motion of a Shock Wave in a Channel, With Applications to Cylindrical and Spherical Shock Waves," *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 2, No. 3, pp. 286~298.
- (18) Whitham, G. B., 1958, "On the Propagation of Shock Waves Through Regions of Non-Uniform Area or Flow," *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 4, pp. 337~360.
- (19) Ottisch, F., Shockel, H. and Peiffer, A., 1994, "The Influence of Abrupt Changes in the Cross-Sectional Area of a Railway Tunnel on the Propagation of Pressure Waves Caused by Passing Trains," *Proc. 8th Intl. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Liverpool, U. K. pp. 151~173.
- (20) 金義東, 金太昊, 1997, "急縮小管을 傳播하는 壓縮波에 理論的 研究," 大韓機械學會論文集, 第21卷, 第1號.
- (21) 金義東, 松尾一泰, 1994, "고속鐵道 터널에서

- 發生하는 波動現象에 關한 衝擊波管의 研究 1(壓縮波의 特性에 對하여),” 大韓機械學會論文集, 第18卷, 第10號.
- (22) 生井武文, 松尾一泰, 1983, “衝擊波の力學, “コロナ社.
- (23) 金義東, 1996, “直管内를 傳播하는 壓縮波의 減衰와 變形에 關한 數値解析的 研究,” 大韓機械學會論文集, 第20卷, 第7號.