

〈論 文〉

고속철도 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 충격파관의 연구(2) — 압축파의 감쇠와 비선형효과 —

김희동* · 松尾一泰**

(1994년 9월 7일 접수)

Study of Shock Tube for Wave Phenomenon in High Speed Railway Tunnel(II) —Attenuation and Nonlinear Effect of Compression Waves—

Heuy-Dong Kim and Kazuyasu Matsuo

Key Words : Compressible Flow(압축성흐름), Compression Wave(압축파), Impulsive Noise(충격소음), Nonlinear Effect(비선형효과), Shock Tube(충격파관), Shock Wave(충격파)

Abstract

As 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. The impulsive noise is closely related to the pressure gradient of the compression wave propagating the tunnel. In order to investigate the characteristics of the compression waves, in the present study an experiment was made using a shock tube. The results show that the strength of a compression wave decreases with the distance from the tunnel entrance and the nonlinear effect of compression wave appears to be significant if strength of the initial compression wave is greater than 7 kPa. Furthermore if the wave pattern is known, attenuation of the compression wave propagating in a tunnel can be reasonably predicted by a theoretical equation considering viscous action and heat transfer in boundary layer.

기 호 설 명

a_1 : 음속

b : 압축파의 폭

D : 관의 등가직경

f : 관마찰계수

k : 감쇠계수

M : 마하수

p : 압력

Re : 레이놀즈수

t : 시간

u : 속도

x : 측정점 S_2 를 원점으로 하는 거리

ζ : 압축파의 무차원 강도

ξ : 압축파의 무차원 최대압력구배

δ : 경계층두께

첨자

1 : 저압실의 상태

*정회원, 안동대학교 기계공학과

**九州大學 總合理工學研究科

- 4 : 고압실의 상태
i : 초기값
 max : 최대값
 * : 특정값

1. 서 론

열차가 고속으로 터널에 돌입하게 되는 경우, 반대편 터널출구에서 충격음에 가까운 소음이 발생하여 열차내 승객은 물론 부근의 환경에까지 심각한 공해를 야기시킨다. 최근 고속열차에 대한 관심이 고조되면서 터널소음의 저감대책이 공학적인 문제로 부상하고 있으며, 더욱이 우리나라에서 현재 건설중인 고속철도 터널의 설계에 고려되어야 할 중요한 문제이므로, 이에 관한 체계적인 연구가 시급한 실정이다.

터널출구에서 발생하는 충격성 소음에 대한 저감대책⁽¹⁾을 확립하기 위해서는, 먼저 열차가 터널에 돌입할 때 발생하는 압축파의 특성과 터널입구의 압축파가 터널내를 전파하는 과정 및 터널출구로부터 방출되는 충격소음 등에 대한 유체역학적 메카니즘⁽²⁾을 이해할 필요가 있다. 열차가 터널에 돌입할 때 발생하는 압축파 및 터널출구로부터 방출되는 충격소음에 관한 종래의 연구결과⁽³⁾에 따르면, 터널입구에 형성되는 압축파의 강도는 열차속도의 2승에 비례하며, 압축파가 터널내를 전파하는 과정에서 파면이 급격하게 변화하는 비선형효과 등이 보고되어 있다. 또 이 연구에서는 터널출구에서 발생하는 충격소음은 터널내를 전파하는 압축파 파면의 압력구배에 비례한다고 보고하였다.

한편 터널내를 전파하는 압축파와 유사하게, 직관관을 전파하는 압축파나 충격파에 대하여 파면 배후의 흐름에서 발생하는 벽면마찰이나 열전달이 전파하는 압축파 파면과 흐름장에 미치는 영향^(4,5) 등이 연구되어, 전파충격과 배후의 흐름에서 발생하는 경계층의 천이 레이놀즈수(transition Reynolds number)가 단위 레이놀즈수(unit Reynolds number)에 강하게 의존한다는 것을 보고하였다. 그러나 직관관을 전파하는 압축파 파면이 급격하게 변화해가는 비선형효과가 나타나는 조건이나, 압축파의 감쇠(attenuation)에 미치는 파면의 최대압력구배의 영향 등에 관해서는 조사되지 않았다.

김희동 등^(2,6)은 충격파관을 개조한 터널모형장치를 이용하여, 터널입구에 형성된 압축파가 터널내를 전파하는 경우의 거동을 실험적으로 조사하여, 터널의 적절한 조건이 알려지는 경우 압축파의 감쇠를 정성적으로 예측할 수 있다고 보고하였으나, 감쇠계수의 결정에 대하여서는 언급하지 않았다. 더욱이 그들이 충격파관의 격막대신에 사용한 급속개구밸브는 약한 압축파를 형성시키는데 다소 문제점을 가지고 있었으며, 격막부에서 발생하는 교란 때문에 압축파 배후에서 상당한 압력변동이 발생하여 충분한 실험데이터를 얻지 못하였다.

본 연구에서는 이상에서 기술한 문제점들을 개선하여 약한 압축파로부터 충분히 강한 압축파까지 넓은 범위에 대하여 실험을 수행하였다. 실험은 압축파가 직관관에서 전파할때 파면의 비선형효과가 나타나게 되는 조건, 압축파의 감쇠에 미칠 수 있는 초기압축파의 강도 및 초기압축파 파면의 압력구배의 영향 그리고 관내를 전파하는 압축파 파면의 최대압력구배의 변화에 미치는 초기압축파의 강도 등의 영향을 규명하고, 이들 결과를 이용하여 직관관을 전파하는 압축파의 감쇠계수 k 의 값을 도출하였다. 따라서 대부분의 실험데이터는 터널입구에 형성된 약한 압축파가 터널내를 전파하는 경우, 압축파의 감쇠특성과, 전파거리에 따른 압축파의 폭, 파면에서 압력구배의 변화 및 압축파 파면의 비선형효과가 나타나는 조건을 정량화하는데 이용되었다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 고속철도 터널의 모형으로 사용된 충격파관(shock tube) 및 측정계의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 실험장치의 작동원리 및 실험방법에 대하여서는 참고문헌(2), (6)에 상세히 기술되어 있다. 본 연구에서는 급속개구밸브(FOGV)의 성능을 개선하기 위하여, 고압실과 저압실을 구분하는 밸브판에 대하여 여러차례 반복실험을 수행하였다. 밸브판의 선단에 발광다이오드를 설치하여, 밸브판의 움직임을 고속도 사진촬영 및 수치계산을 통하여 매우 약한 압축파로부터 강한 압축파까지 만들어낼 수 있는 조건을 구하였다. 그 결과 두께 2 mm인 스테인레스 밸브판과 FOGV의 구동공기압으로 $p_0=0.8 \text{ atg}$ 로 하여, 약 30여 종류의 압축파를 형성시킬 수 있었다. 또 밸브를 열때, 고압실과

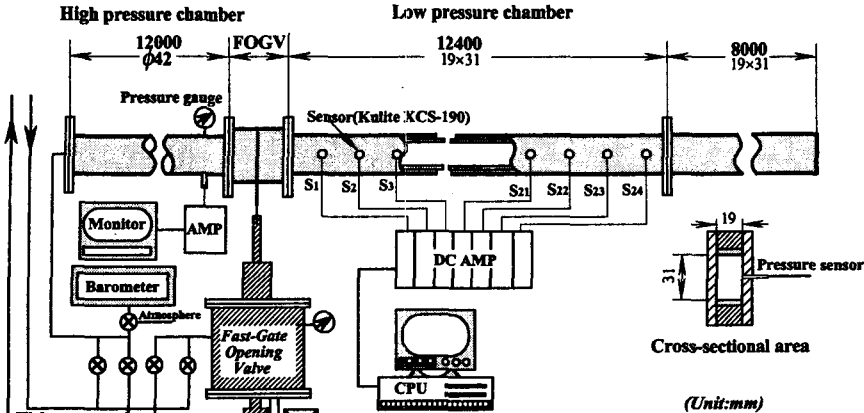


Fig. 1 Experimental facility and measuring systems

저압실 사이에서 생기게 되는 틈을 최소한으로 줄이고, 연결부를 가능한 평활하게 함으로써 격막부에서 발생하는 교란을 줄일 수 있었다. 더욱이 밸브판이 급속히 하강할때, 고무로 되어있는 스톱퍼(stopper)로부터 진동의 영향을 줄이기 위하여, 밸브판의 행정을 길게 하였다. 따라서 압축과 배후에서 발생하는 흐름 교란이 전파하는 압축파에 미치게 되는 영향을 무시할 수 있었으며, 압축파의 강도 등의 특성값의 결정에서 생기는 오차를 줄여, 압축파의 재현성 및 실험의 정도를 높였다. 밸브의 구동은 공기압을 이용한 피스톤으로 행하였으며, 공기 가압실의 압력 및 고압실의 압력은 압력변환기 Toyoda PMS-5H로 측정하였다. 또 저압실의 각 측정점에서 압력측정을 위하여 사용된 압력센서는 고감도 극소형 반도체 압력변환기 Kulite XCS-190-5로 공진주파수(natural frequency)는 150 kHz이며, 감도는 $200 \text{ mV/G} \pm 0.1\%$ 이다. 압력변환기로부터 전기적인 출력신호는 직류증폭기로 증폭한 후, A/D변환기를 거쳐 데이터 기록장치에 기록하였다. 본 실험에서 압력데이터들은 $40 \mu\text{s}$ 의 샘플링속도로 약 2 kwords를 취하여, 압축파형을 해석하는데 이용하였다.

한편 그림의 FOGV로부터 가까운 하류의 측정점 S_1 에서 흐름은 밸브의 영향을 상당히 받을 수 있으므로, 측정점 S_1 보다 하류의 측정점 S_2 를(FOGV로부터 하류 450 mm의 위치) 기준으로 하여, 흐름방향의 거리를 x 로 정하였다. 따라서 S_2 에서 측정된 압력파형을 초기값으로 하여, 이 점에서 초기압축

파의 강도(Δp_{21})_i, 초기압축파의 폭 b_i 및 파면의 최대압력구배 등을 측정하였다. 본 연구에서 압축파의 폭 b 는, 시간에 대한 압력파형에 대하여 파면의 최대압력구배의 접선과 압축파 전후의 거의 일정값과의 교점간의 시간을 거리로 변환한 것으로 정의하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전파거리에 따른 압축파의 감쇠

측정점 S_2 를 원점으로 하는 각 측정점에서 압축파 파형의 시간적 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림의 횡축은 시간 $t(\text{ms})$ 이며, 종축은 압축파에 의해 대기압(p_1)으로부터 상승한 압력상승 $p - p_1$ 을 나타낸다. 실험에서는 고압실의 압력 p_4 와 저압실 압력 p_1 의 비 $PR(=p_4/p_1)$ 을 변화시켰으며, FOGV의 구동압력은 $p_v=0.8 \text{ atg}$ 로 일정하게 하였다. Fig. 2(a)는 $p_4=0.35 \text{ atg}$ 이며, 초기압축파의 강도가 $(\Delta p_{21})_i=20.9 \text{ kPa}$ 의 경우에 대한 것으로, 압축파의 강도 Δp_{21} 는 거리 x 가 증가함에 따라 감소하고 있지만, 압축파에 의한 압력의 시간적 변화율(이하 파면에서 압력의 시간구배 혹은 압력구배라고 한다)은 x 의 증가에 따라 점차 급격하게 변한다는 것을 정성적으로 관찰할 수 있다. 그리고 $p_4=0.11 \text{ atg}$ 이고, $(\Delta p_{21})_i=7.06 \text{ kPa}$ 에 대한 Fig. 2(b)에서는, Δp_{21} 는 거리 x 가 증가함에 따라 감소하고 있지만, 압축파 파면의 압력구배는 거리에 따라 그다지 변화하지 않고 있다. 또 $p_4=0.05 \text{ atg}$, $(\Delta p_{21})_i=$

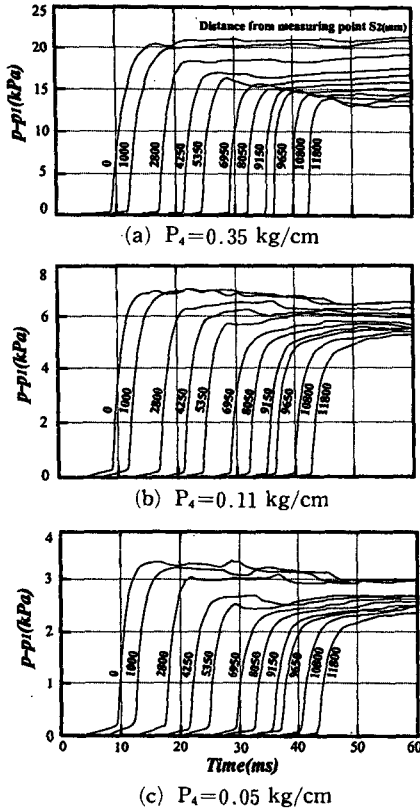


Fig. 2 Time histories of compression waves

3.26 kPa인 경우를 나타내는 Fig. 2(c)에서는, 압축파 파면의 압력구배는 거리 x 가 증가할수록 점차 완만하게 변화하고 있음을 관찰할 수 있다. 이상의 결과로부터 단면적이 일정한 관내를 전파하는 압축파에 대하여, 파면이 점차로 완만하게 변하는 경우, 거의 변화하지 않는 경우와 전파함에 따라 점차 급격하게 변하는 경우가 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 관내를 전파하는 압축파에 미치는 유체 점성 및 열전달 등의 소산효과와 파면의 비선형효과에 의한 것으로서, 전자가 후자에 비해 큰 경우에는 전파하는 파면은 점차 완만하게 되며, 반대의 경우에는 급격하게 되는 것으로 해석할 수 있다. 본 실험에서는 고압실의 압력 p_4 를 약 0.02 atg에서 0.35 atg까지 약 30여 종류로 변화시켜서 얻어지는 초기압축파의 강도 $(\Delta p_{21})_i$ 의 변화를 관찰하였다. 그 결과 $(\Delta p_{21})_i$ 는 고압실의 압력 p_4 에 선형적으로 비례하였다.

위의 그림에서 모든 경우에 압축파의 강도 Δp_{21} 는 거리 x 의 증가에 따라 감소하였다. Fig. 3에는

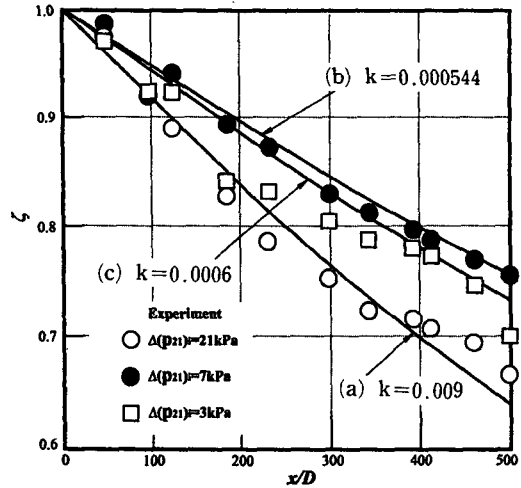


Fig. 3 Attenuation of compression waves

임의의 점 x 에서 압축파의 강도 Δp_{21} 를 점 $x=0$ (S_2 점)에서 강도 $(\Delta p_{21})_i$ 로 무차원하여, 이 값 $\zeta = \Delta p_{21}/(\Delta p_{21})_i$ 를 무차원 거리 x/D (여기에서 D 는 관의 등가직경)에 대하여 표시하였다. 그림중의 \circ , \bullet , \square 는 $(\Delta p_{21})_i$ 가 각각 21 kPa, 7 kPa, 3 kPa에 대한 실험값이다. 이들 실험값과 Thompson⁽⁷⁾에 의한 반경험식을 비교하기 위해서, 직관내에서 전파하는 압축파의 파면을 평면파로 가정하여 압축파의 감쇠가 있는 경우에 대하여 다음 식⁽⁷⁾이 제안되어 있다.

$$\zeta = \frac{\Delta p_{21}}{(\Delta p_{21})_i} = \exp^{-k(x/D)} \quad (1)$$

여기에서, k 는 압축파의 감쇠계수(attenuation coefficient)이다. 그림중에 표시한 실선들은 실험적으로 정해지는 k 의 값을 이용하여, 위의 식으로부터 구한 값을 나타낸다. 그림으로부터 압축파의 감쇠는 거리 x 의 증가에 따라 커지게 되며, $(\Delta p_{21})_i$ 가 21 kPa인 경우의 실험값 \circ 는 감쇠계수 $k=0.0009$ 인 실선(a)와 잘 일치하며, $(\Delta p_{21})_i=7$ kPa인 경우의 실험값은 $k=0.000544$ 인 실선(b)와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 실선(c)는 실험점과 약간의 차이가 있지만 $(\Delta p_{21})_i=3$ kPa이고 $k=0.0006$ 에 대한 경우이다. 그림으로부터 실선(a)와 (b)를 비교해 보면, 압축파의 감쇠비율은 초기압축파의 강도 $(\Delta p_{21})_i$ 가 클수록 크게 되지만, 실선(b)와 (c)에 대해서는 $(\Delta p_{21})_i$ 가 작을수록 크게 나타난다. 따라서 압축파의 감쇠는 초기압축파의 강도만에 의해서 결

Table 1 Values measured at real tunnel

| Tunnel | Length(m) | Velocity(km/h) | $(\Delta p_{21})_i$ (kPa) | U_i (m/s) | $Re \times 10^6$ | $k \times 10^4$ |
|---------------|-----------|----------------|---------------------------|-------------|------------------|-----------------|
| Rokkou | 16330 | 220 | 1.44 | 3.46 | 2.22 | 10.5 |
| 2'nd Takayama | 3027 | 195 | 0.994 | 2.39 | 1.53 | 3.61 |
| Ohno | 5389 | 197 | 1.09 | 2.62 | 1.67 | 2.10 |
| Bingo | 8900 | 192 | 1.12 | 2.70 | 1.72 | 2.55 |
| Fukuoka | 7900 | 200 | 1.09 | 2.62 | 1.67 | 2.70 |

정되지 않는다는 것을 알 수 있다.

참고로 참고문헌(3) 및 최근 일본의 고속철도(고속철도의 선로는 일반적으로 두 가지 형태로 되어 있다. 즉 선로에 자갈이 깔린 밸러스트케도(ballast track)와, 자갈대신에 시멘트 콘크리트를 적용한 경우를 슬라브케도(slab track)라고 한다)인 신간선 터널에서 실제 측정값으로부터 정리한 파라미터들을 Table 1에 나타내었다. 여기에서 u_i 는 압축파 배후의 흐름의 속도, Re 는 레이놀즈수, k 는 실험적으로 구한 감쇠계수이다. 본 실험에서 얻어진 압축파의 감쇠를 실제 터널에서의 실측값과 비교하기 위해서, 터널 실측값으로부터 구한 압축파의 무차원강도를 x/D 에 대하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림의 □(밸러스트케도)를 제외한 모든 측정값들은 슬라브케도에 대한 것이다. 또 그림중의 실선은 위의 Table 1의 특성값과 각각의 터널 실측값을 위의 식(1)에 적용하여 계산한 결과이다. 그림으로부터 밸러스트케도 터널(ballast track tunnel; BTT)에서 압축파의 감쇠가 슬라브케도 터널(slab track

tunnel; STT)에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 BTT에서 흐름의 Suction효과와 흐름의 Turbulence가 크기 때문이라고 생각된다. 따라서 실제 터널에서 발생하는 압축파의 감쇠를 예측하는데에는 선로의 특성에 따른 감쇠계수의 선택이 필요하다는 것을 알 수 있다.

3.2 압축파의 폭과 최대압력구배

임의의 점 x 에서 압축파의 폭 b 를 $x=0$ 에서 폭 b_i 로 무차원한 값(b/b_i)을 무차원 거리 x/D 에 대하여 Fig. 5에 나타내었으며, 참고로 실제터널에서 측정된 값도 표시하였다. 그림으로부터 b/b_i 의 값은 x/D 에 따라 감소하지만, 그의 감소비율은 초기 압축파의 강도가 클수록 현저하다는 것을 알 수 있다. 또 STT에서 실측값은 $(\Delta p_{21})_i = 7 \text{ kPa}$ 인 본 실험값과 대략 일치하고 있으며, BTT에서는 압축파의 폭이 거의 변화하지 않는다는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 BTT에서 압축파의 감쇠가 매우 크기 때문에, 즉 소산효과에 비해 파의 비선형효과가

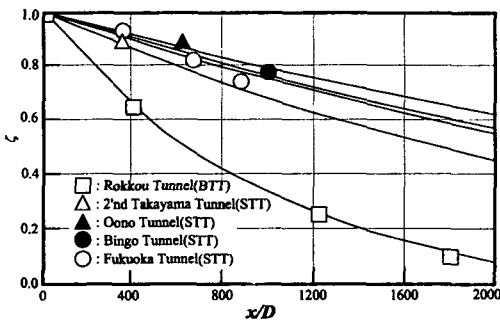


Fig. 4 Attenuation of compression waves measured at real tunnel

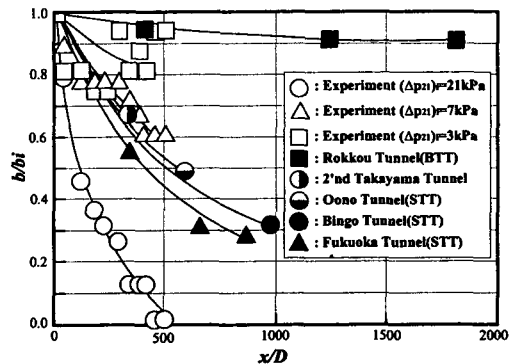


Fig. 5 Variation of widths of compression waves against distance

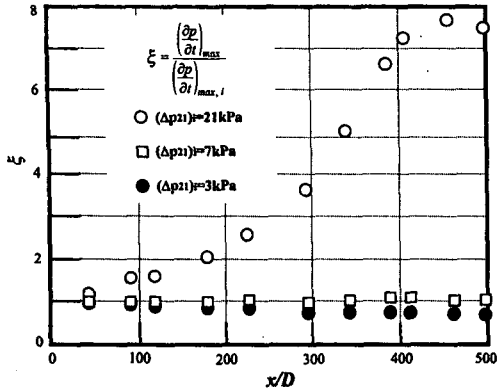


Fig. 6 Variation of pressure gradient in compression

상대적으로 작기 때문이라고 생각된다.

종래의 연구결과(3,8)에 의하면, 터널출구에 발생하는 충격음은 터널출구에 도착하는 압축파 파면에서 압력구배에 비례한다고 보고하였다. 따라서 압축파가 관내를 전파함에 따라, 그의 압력구배가 어떻게 변화하는가를 이해하는 것은 대단히 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 2의 각 파형으로부터 5점의 압력데이터를 선택하여 다항식 곡선 근사를 수행한 다음 압력의 시간미분의 최대값을 구하였다. Fig. 6에는 각 측정점에서 압축파의 최대압력구배 $(\partial p / \partial t)_{max}$ 를 $x=0$ 에서 형성된 초기압축파의 최대압력구배 $(\partial p / \partial t)_{max,i}$ 로 무차원한 값 $\xi = \{(\partial p / \partial t)_{max} / (\partial p / \partial t)_{max,i}\}$ 을 x/D 에 대하여 나타내었다. 그림으로부터 관입구에서 형성되는 압축파가 강한 경우, 압력구배는 거리에 따라 증가하지만, 상대적으로 약한 경우에는 거리에 따라 감소하고 있음을 관찰할 수 있다. 따라서 실제 고속철도 터널을 설계할 때에는 터널입구에 형성되는 압축파를 가능하면 약하게 해줄 수 있는 구상이 필요하다.

3.3 압축파의 최대압력구배의 변화

Fig. 7에는 초기압축파의 강도에 대한 무차원 압력구배의 변화를 나타내었다. 그림의 각 실험값들은 측정점 S_2 를 원점으로 하여, $x=2800, 6950$ 및 10800 mm의 위치에서 측정하였다. 각 위치에서 최대 압력구배는 초기압축파의 강도가 증가할수록 단조롭게 증가하고 있지만, $(\Delta p_{21})_i \approx 7$ kPa에서 실험값들은 서로 교차하게 된다. 즉, $(\Delta p_{21})_i < \approx 7$ kPa에서는 압축파의 최대압력구배는 거리에 따라 감소하지만, $(\Delta p_{21})_i > \approx 7$ kPa에서는 증가한다는

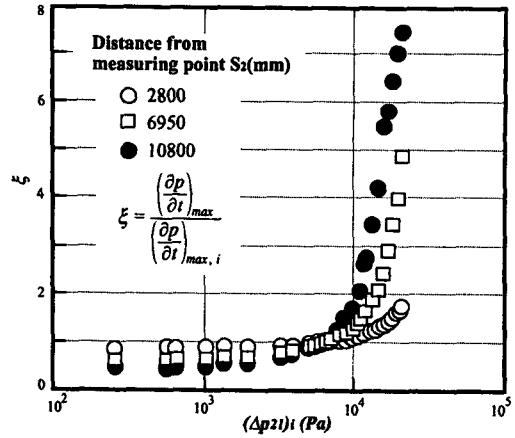


Fig. 7 Variation of maximum pressure gradients against initial compression waves

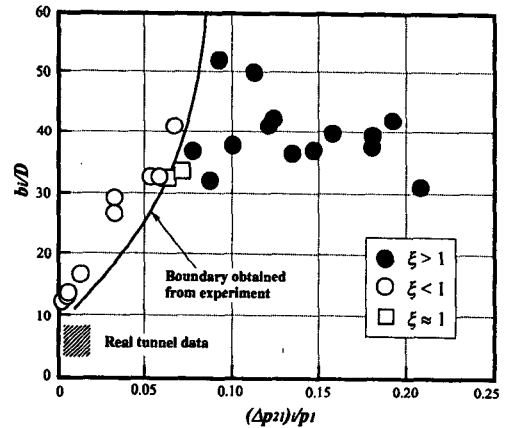


Fig. 8 Discrimination of increasing or decreasing maximum pressure gradient of compression waves

것을 의미한다. 특히 ●로 표시된 $x=10800$ mm에서 측정된 실험값에 의하면, $(\Delta p_{21})_i > \approx 10$ kPa에서는 거리에 따른 최대압력구배의 증가비율이 매우 크게 되며, 이것은 압축파가 충격파로 천이하여 가는 과정을 나타내는 것으로 생각된다.

Fig. 8에는 $x=0$ 에서 형성된 $(\Delta p_{21})_i$ 를 충격파관의 저압실 압력 p_1 으로 무차원한 값을 횡축에, 압축파의 폭 b_1 을 관의 등가직경 D 로 무차원한 값을 종축으로 하여, 압축파의 최대압력구배가 거리에 따라 감소하는 경우를 ○로, 증가하는 경우를 ●로, 또 거의 변화하지 않는 경우를 □로 표시하였다. 그림중의 실선은 압력구배가 변화하지 않는다고 판정한 실험선을 나타내며, 참고로 실제터널의

측정값들을 ■로 표시하였다. 그림으로부터 압축파의 최대압력구배가 전파거리에 따라 증가, 혹은 감소하는 것은 관입구에 형성되는 압축파의 강도와 폭에 의존하며, 초기압축파의 폭이 충분히 크다고 하여도 초기강도가 매우 큰 경우에는 비선형효과에 의해 파면이 점차 급격하게 변하게 되며, 반대로 초기압축파의 폭이 작다고 하여도 초기압축파의 강도가 약한 경우에도 역시 비선형효과가 나타날 수 있다. 예를 들면 $(\Delta p_{21})_i / p_i$ 의 값이 0.05인 경우, 초기압축파의 폭 b_i / D 의 값이 25보다 크게 되면 압축파의 비선형효과는 나타나지 않게 된다는 것을 알 수 있다. 저자들의 경험에 의하면, 초기압축파의 강도는 주로 열차와 터널의 단면적비에 의존하며, 초기압축파의 폭은 주로 열차의 선두 형상에 의존한다. 따라서 본 실험값으로부터, 열차와 터널의 단면적 비가 알려지는 경우, 열차의 선두형상에 따라 압축파의 비선형성을 대략적으로 예측할 수 있다.

Fig. 9에는 초기압축파에 대한 전파압축파의 최대압력구배의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 초기압축파의 압력구배가 약 5 kPa/ms 이상인 경우에는 비선형효과가 강하게 나타나며, 압축파의 압력구배가 점차 급격하게 변해가는 것을 알 수 있다. 그러나 압력구배가 약 5 kPa/ms 이하인 경우에는 비선형효과가 상대적으로 약하며, 압력구배가 점차 완만하게 변한다는 것을 알 수 있다. 또 초기압축파의 압력구배가 약 10 kPa/ms 정도되면, 비선형효과가 매우 강하게 되어 압축파가 약한 충격파로 천이하는 것으로 판단된다.

Fig. 10에는 초기압축파의 강도 $(\Delta p_{21})_i$ 에 대한 압축파의 감쇠비율 ξ 와 참고문헌(9, 10)으로부터 이론값을 함께 나타내었다. 그림의 실험점들은 각각 $x=2800$ mm, 6950 mm 및 10800 mm의 지점에서 측정된 압축파의 무차원 강도를 나타낸다. 여기에서 종축의 값이 작을수록 압축파의 감쇠가 커진다는 것에 주의가 필요하다. 그림으로부터 초기압축파의 강도 $(\Delta p_{21})_i$ 가 약 0.6 kPa에서 약 7 kPa의 범위에 대해서는 $(\Delta p_{21})_i$ 가 증가할수록 압축파의 감쇠는 작아지게 되며, $(\Delta p_{21})_i$ 가 약 7 kPa보다 큰 범위에서는 $(\Delta p_{21})_i$ 가 증가할수록 압축파의 감쇠가 점차 커지게 된다. 일반적으로 초기압축파의 강도가 증가하는 경우, 압축파 배후에서 유기되는 흐름경계층은 층류로부터 난류로 천이하게 된다. 압축파 배후의 경계층이 난류인 경우, 압축파의 강도가 강

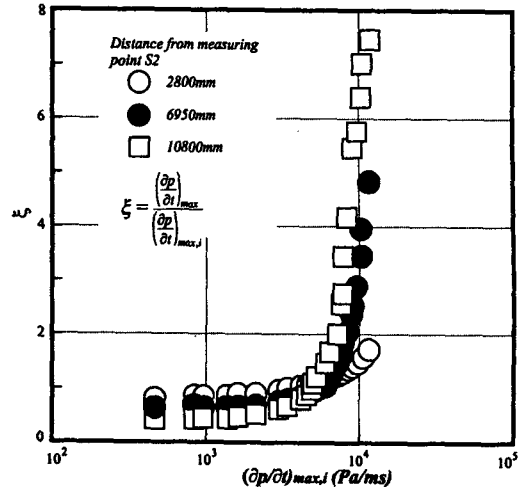


Fig. 9 Variation of maximum pressure gradients against initial values in compression waves

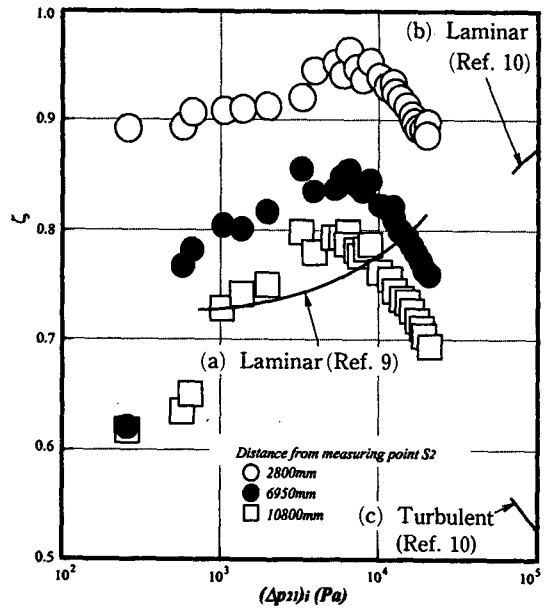


Fig. 10 Variation of attenuation of compression waves against initial strength

할수록 에너지의 손실이 증가하게 되므로 압축파의 감쇠가 커지게 된다. 그러나 본 실험값에서 보이는 바와 같이, 초기압축파의 강도가 약한 경우, 즉 $(\Delta p_{21})_i$ 가 약 7 kPa 이하에서는 반대의 현상이 나타나고 있다. 따라서 본 실험장치에서 압축파에 의해 유기되는 흐름경계층의 천이는 $(\Delta p_{21})_i$ 가 약 7 kPa에서 발생한다고 추측할 수 있으며, Fig. 7의 결과로

부터 이 값은 압축파의 비선형효과가 현저해지는 임계값과 일치한다. 따라서 초기압축파의 강도가 약 7kPa인 경우에 압축파의 비선형 효과와 벽면 마찰 및 열전달 등의 소산효과가 균형을 취한 값이라고 생각할 수 있다.

한편 그림중의 선(a)는 압축파 배후의 경계층 흐름을 층류라고 가정한 경우의 Bannister의 이론값이며, 선(b)와 (c)는 각각 흐름이 층류와 난류라고 가정한 경우의 Mirels의 이론값을 나타내고 있다. $(\Delta p_{21})_i < \text{약 } 7 \text{ kPa}$ 인 경우에 대한 본 실험값들은 선 (a)와 정성적으로 유사한 경향을 나타내고 있으나, $(\Delta p_{21})_i > \text{약 } 7 \text{ kPa}$ 인 경우에 대해서는 반대의 경향을 관찰할 수 있다. 이것은 압축파 배후의 흐름이 층류라는 가정과 관련된다. 더욱이 전파마하수가 1.25 이상인 충격파 배후의 흐름에 대한 Mirels의 이론값을 약한 $(\Delta p_{21})_i$ 쪽으로 외삽하게 되면, 흐름이 층류인 경우(즉, 선(b))에는 $(\Delta p_{21})_i < \text{약 } 7 \text{ kPa}$ 의 범위에 대한 본 실험값과 정성적으로 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 흐름이 난류인 경우(즉, 선(c))에는 $(\Delta p_{21})_i > \text{약 } 7 \text{ kPa}$ 의 범위에 대한 본 실험값의 경향과 정성적으로 일치한다. 따라서 본 실험에서는 초기압축파가 약 7kPa에서 압축파 배후의 경계층흐름이 층류에서 난류로 천이하는 것으로 생각할 수 있으며, 압축파의 감쇠 및 비선형효과는 흐름천이와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각되지만, 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

3.4 압축파의 감쇠계수

직관관을 전파하는 압축파의 감쇠를 나타내는 경험식으로써 식(1)을 기술하였다. 식(1)에서 도입된 압축파의 감쇠계수 k 는 관관을 정상적으로 전파하는 음파에 대하여, 벽면 경계층에서 확산이나 열전도 등을 고려하여 식(2)로 표시된다.⁽⁷⁾

$$k = \frac{\omega}{a_1} [\delta_v + (\gamma + 1) \delta_t]$$

$$\delta_v^2 = \frac{2\mu}{\rho\omega}$$

$$\delta_t^2 = \frac{\delta_v^2}{Pr} \tag{2}$$

여기에서, a_1 는 음속, ω 는 각진동수(angular frequency), δ_v 는 속도경계층(velocity boundary layer), δ_t 는 온도경계층(thermal boundary layer), γ 는 기체의 비열비, μ 는 점성계수, ρ 는 밀도 그리고 Pr 는 Prandtl수를 나타낸다. 또 직관관을 전파

하는 유한진폭파(압축파)의 강도는 그 배후의 흐름과 벽면과의 마찰계수를 고려함으로써 다음의 식(3)이 제안⁽⁹⁾되었다.

$$\zeta = \frac{\Delta p_{21}}{(\Delta p_{21})_i} = \frac{1}{1 + f \frac{u_i x}{a_1 D}} \tag{3}$$

여기에서, u_i 는 초기압축파에 의해서 유기된 흐름의 속도, f 는 비정상흐름에 대한 마찰계수이며, 현재 그와 같은 데이터가 거의 없기 때문에 정상흐름의 레이놀즈수로부터 Moody선도를 이용하여 구할 수 있다.

Mirels 등에 의한 연구⁽¹⁰⁾에 따르면, 충격파관내에서 충격파의 전파속도는 충격파에 의해서 유기되는 흐름에 경계층이 발달하게 되므로, 이로 인한 압력파가 흐름장의 상류와 하류로 전파하여 서로 간섭하는 것에 의해 결정된다고 주장하였다. 이 경우 충격파의 감쇠는 식(4)로 쓰여진다.

$$\frac{\Delta Ms}{Ms} = -Ms^* \frac{x^{1-n}}{D} \tag{4}$$

여기에서 $\Delta Ms/Ms$ 는 충격파 마하수의 감소비율, n 는 경계층이 층류인 경우에는 1/2, 난류의 경우에는 1/5로 되는 상수이며, Ms^* 는 충격파 마하수, 구동기체, 시험기체 및 기체의 초기상태에 의존하는 계수이다.

본 실험값을 사용하여 식(1)로 계산한 압축파의 감쇠계수 k 와 초기압축파의 강도 $(\Delta p_{21})_i$ 와의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 그림중에는 실제 터널에서의 측정값으로부터 구한 감쇠계수도 표시하였으

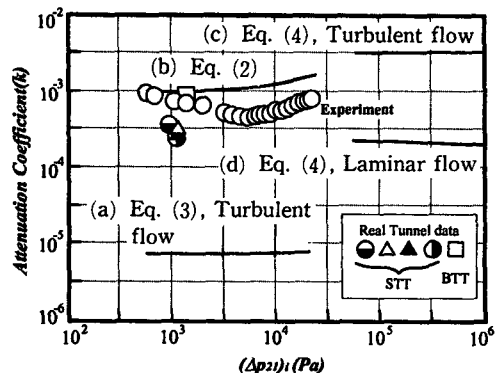


Fig. 11 Attenuation coefficient of compression waves

며, 선(a)는 압축파 배후에서 유기된 흐름이 난류인 경우를, 선(c)와 (d)는 식(4)를 이용하여 흐름이 각각 층류와 난류인 경우의 계산값을 식(1)에 대입하여 근사계산한 감쇠계수이다. 또 선(b)는 $x = 10800$ mm에서 형성된 압축파의 파면을 1/2파장으로 가정하여, 식(2)를 이용하여 계산한 감쇠계수이다. 그림으로부터 실험값은 $(\Delta p_{21})_i$ 는 약 7 kPa에서 최소값으로 되며, 여기에서 압축파의 감쇠가 최소인 것을 나타내고 있다. Bannister 등에 의한 값, 즉 선(a)로 나타낸 감쇠계수는 본 실험값보다 매우 작다. 김희동 등에 의한 이전의 연구^(2,6)에 의하면, 비록 실험결과와 유사한 감쇠경향을 나타내었지만, 선(a)로 표현되는 값을 마찰계수의 값으로 선택하는 것은 적절하지 못함을 알 수 있다. 또 선(c)와 (d)로 표시한 Mirels 등에 의한 값은 충격파에 대한 것이지만, 압력이 작은 쪽으로 외삽하게 되면, 층류에 대한 값이 실험값과 비교적 잘 일치하게 된다. 더욱이 식(2)로 계산한 선(b)의 값은 본 실험값과 비교적 잘 일치하고 있으며, 특히 $(\Delta p_{21})_i > 7$ kPa의 범위에서 초기압축파의 강도에 따른 감쇠계수의 증가경향은 실험값과 일치하지만, $(\Delta p_{21})_i < 7$ kPa의 범위에서는 약간 차이를 보이고 있다. 이것은 식(2)가 정상음파의 감쇠에 관한 것이며, 압축파가 유기하는 흐름이 재차 압축파 파면에 미치게 되는 영향을 고려하지 않았기 때문이라고 생각된다. 만일 실제 터널에 식(2)를 적용하여 감쇠계수를 계산하면 약 $k = 0.0004$ 이며, 이 값은 STT에 대한 값과 잘 일치하게 된다. 그러나 BTT에서의 실측값(□로 표시)에 대한 감쇠계수는 STT에 비해 크게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 벨러스트의 영향으로 인해 터널내를 전파하는 압축파의 감쇠가 커지게 되기 때문이다. 이상의 고찰로부터 압축파의 감쇠계수는 압축파의 파형이 알려지는 경우에 식(2)에 의해 대략적으로 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12에는 감쇠계수를 레이놀즈수에 대하여 나타내었다. 실측값과 비교를 위하여 그림에는 또한 실제 터널에서의 측정값도 함께 나타내었다. 여기에서 레이놀즈수는 관의 등가직경 D 를 대표길리로, 압축파에 의해 유기되는 흐름속도 u_i 를 대표속도로 취하였다. 본 실험값과 실제터널의 실측값에 대하여, 레이놀즈수에서의 차이는 본 실험장치와 실제터널의 등가직경의 차이 때문으로 생각된다. 그림으로부터 레이놀즈수가 약 40000보다 작은 범

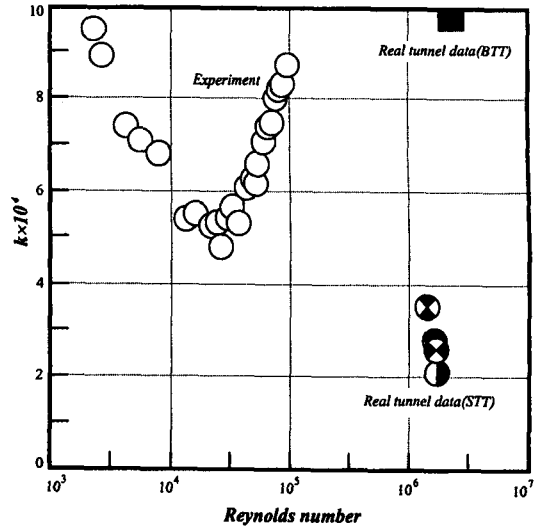


Fig. 12 Effect of Reynolds number on attenuation coefficient of compression wave

위에서는, 감쇠계수 k 의 값은 레이놀즈수가 증가함에 따라 감소하며, 레이놀즈수가 약 40000보다 큰 경우에는 역으로 된다. 이들 실험값으로부터 압축파에 의해 유기되는 흐름경계층은 레이놀즈수가 약 40000에서 난류로 천이하는 것으로 추측된다. 이러한 사실은 압축파의 강도가 약 7 kPa에서 흐름 경계층이 난류로 천이한다는 Fig. 10의 결과에 대응한다고 생각된다.

5. 결론

고속철도 터널에서 열차에 의해서 발생하는 압축파에 대하여, 충격파관을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 관내를 전파하는 압축파의 특성을 조사하기 위하여, 압축파의 강도, 압축파의 폭 및 파면에서의 최대압력구배를 측정하였다. 그 결과 전파 거리에 따른 압축파의 감쇠 및 압축파의 폭의 변화 그리고 최대압력구배의 변화를 알 수 있었다. 더욱이 압축파의 비선형효과는 초기압축파의 강도가 7 kPa이상인 경우에 현저하게 나타났으며, 압축파의 감쇠는 파형이 알려지는 경우, 경계층에서 확산이나 열전도를 고려한 식(2)에 의해 추정할 수 있다는 것을 알았다. 한편 본 실험에서 얻어진 압축파의 전파특성은 압축파에 의해서 유기되는 흐름경계층에 강하게 의존하는 것으로 나타났다. 따라서 압축파 배후에서 발달하는 경계층에 대한 실험적 연

구가 필요하다.

참고문헌

- (1) Ozawa, S., 1979, "Studies of Micro-Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit," *Railway Technical Res. Rept. of Japan*, No. 1121(In Japanese).
- (2) 김희동, 松尾一泰, 1994, "고속철도 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 충격파관의 연구(1) — 압축파의 특성에 대하여" 대한기계학회논문집, 제18권, 제10호, pp. 2686~2697.
- (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) Schlichting, H., 1951, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill.
- (5) Martin, W. A., 1958, "An Experimental Study of the Turbulent Boundary Layer Behind the Initial Shock Wave in a Shock Tube," *Journal Aerospace Sci.*, No. 10.
- (6) 김희동, 1994, "고속철도 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 연구," 大韓機械學會 春季學術大會 論文集.
- (7) Thompson, P. A., 1972, *Compressible-Fluid Dynamics*, McGraw-Hill.
- (8) Sajben, M., 1971, "Fluid Mechanics of Train-Tunnel Systems in Unsteady Motion," *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 8.
- (9) Bannister, F. K. and Mucklow, G. F., 1948, "Wave Action Following Sudden Release of Compressible Gas From a Cylinder," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol. 159.
- (10) Mirels, H. and Mullen, J. F., 1964, "Small Perturbation Theory for Shock Tube Attenuation and Nonuniformity," *Physics of Fluids*, Vol. 7, No. 8.