

## 관단으로부터 미소 압력파의 반사에 관한 기초적 연구

김 희 동\*

(1997년 9월 25일 접수)

### Fundamental Study on Reflection Phenomenon of Weak Pressure-Wave from an Open End of a Pipe

Heuy-Dong Kim

**Key Words :** Compressible Flow(압축성 유동), Compression Wave(압축파), High-Speed Railway(고속철도), Impulse Noise(충격성 소음), Shock Tube(충격파관), Railway Tunnel(철도 터널), Shock Wave(충격파)

#### Abstract

This paper describes a series of fundamental studies on reflection and emission of weak pressure waves from an open end of a pipe. Acoustical theories which have been employed in the plane pressure waves inside a pipe are applied to the present study. The objective of the present study is to investigate the reflection or emission coefficient of pressure wave at an open end of a pipe, the length of open end correction, and the directivity characteristics of the pressure waves emitted from the pipe. The results show that the reflection coefficient of pressure wave at an open end and the length of open end correction decrease for the wave length of pressure wave to increase. It is also found that the reflection coefficient for a baffle plate at the exit of pipe is larger than that for no baffle plate.

#### 1. 서 론

관내를 전파하는 압력파는 유동장의 조건 또는 파의 비선형 현상에 의하여 충격파로 천이할 수 있다. 이러한 충격파는 강도가 매우 약하고, 거의 음속에 가까운 속도로 관내를 전파한다. 예를 들면, 자동차 엔진의 배기관<sup>(1)</sup>이나 고속철도 터널내에서 발생하는 압력파<sup>(2)</sup>가 충격파로 천이하여, 대기로 방출되는 경우 일종의 sonic boom과 같은 충격성 소음<sup>(3)</sup>이 발생하게 된다. 대개의 경우, 이와 같은 충격성 소음은 비교적 큰 진폭과 수 Hz 정도의 저주파수 성분들로 되어 있어, 주변의 구조물이나 생

물체에 큰 영향을 초래한다.<sup>(4)</sup> 따라서 이러한 파동 문제는 공학적으로 서둘러 해결되어야 할 과제로 대두되고 있다.

열차가 고속으로 터널에 돌입하는 경우 열차전방에 압축파가 발생하여 터널내를 전파한다. 이 압축파가 터널출구에 도달하여 외부로 방출될 때, 돌연 발파음에 가까운 충격성 소음(impulse noise)이 발생한다.<sup>(3,5)</sup> 이러한 충격성 소음은 종래에 인식되어 온 열차의 진동(차륜과 레일의 마찰에 의한 소음) 및 주행 소음과는 성질이 전혀 다른 것으로, 터널내를 전파하는 압축파와 관련되는 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 한편 열차의 돌입에 의해서 형성된 압축파가 터널내를 전파하여 일부는 터널의 출구면에서 팽창파로서 터널내로 반사하게 된다. 이 경우 진행되는 열차와 복잡한 간섭을 일으켜 차체에 큰 압력

\*회원, 안동대학교 기계공학과

변동이 발생함은 물론 격심한 공기저항의 변동까지 발생하게 된다.<sup>(7,8)</sup>

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음의 정량적 평가를 위해서는, 터널 출구면에서 압력파의 방사 과정(emission process)을 이해할 필요가 있다. 또 터널 내부에서 발생하는 파동현상, 즉 터널내의 압력변동 혹은 공기저항 등을 계산하기 위해서는 관단(open end of pipe : 편의상 이하에서 OE라고 한다)으로부터 반사되는 압력파 현상을 이해하는 것이 매우 중요하다. 예를 들면 압축파의 어느 정도가 터널 출구로부터 반사되는지를 아는 것은 터널내의 압력변동을 계산하는데 있어서 뿐만 아니라 터널 외부로 전파하는 충격성 소음을 평가하는데 있어서 필수적이다. 최근 김희동<sup>(7,8)</sup>은 수치계산법을 이용하여, 터널내부의 압력변동 및 공기저항의 변동량을 계산하여 실측값과 비교하였다. 그러나 그의 계산에서는 터널의 출구면에서 압력파가 완전 반사(perfect reflection)한다고 가정하였다. 문헌(9)에서는 비정상 확대칭 유동의 TVD수치계산법을 이용하여 터널 출구로부터 방출되는 충격성 소음을 평가하였다. 그러나 터널출구의 형상 및 터널 출구면에서 압력파의 반사과정은 구체적으로 다루지 않았다.

압력파가 OE로부터 반사되는 과정은 압력파의 파장, 과잉압력 및 관 출구의 형상에 의존할 것으로 예상된다. 그러나 이에 대한 구체적인 연구의 실례는 지금까지 거의 없으며,<sup>(10)</sup> 특히 고속철도 터널출구에서 발생하는 압력파의 반사에 관한 연구는 전무하다. 따라서 본 연구에서는 OE로부터 압력파의 반사과정(reflection process)을 설명하기 위한 연구의 일환으로, 종래의 음향이론을 이용하여 이론해석을 수행하였다. 이론해석에서는 압력파의 반사율 및 방사파의 지향성을 조사하였다. 본 연구의 결과들은 고속철도 터널내에서 발생하는 압축파가 OE에서 어느 정도 반사되는지, 또 OE로부터 방사되는 펄스파가 어떠한 전파특성을 가지는지를 평가하기 위한 중요한 정보가 될 수 있다.

## 2. 약한 압력파의 반사와 방사

일반적으로 음향공학에서 취급되는 음파는 그의 진폭이 압축파와 같은 유한진폭파(finite amplitude wave)에 비하여 매우 작다. 이와 같은 미소진폭의 음파가 정지 기체의 어떤 점에 도달할 때, 그의 위

치에서 유체입자는 이동을 시작하게 되지만, 음파의 한 주기가 그의 위치를 통과하게 되면, 유체입자는 다시 원래의 위치로 되돌아오게 되므로, 입자의 변위는 0으로 된다. 즉 음파의 통과에 의하여 유체입자의 정미변위(net displacement)는 발생하지 않게 되므로, 결과적으로 음파의 통과에 의하여 유동은 발생하지 않는다고 볼 수 있다. 그러나 정지 상태의 기체중의 어떤 한 점에 압축파와 같은 유한진폭파가 도달하는 경우에는 유체입자의 정미변위가 발생하게 되므로, 압축파에 의하여 유동이 발생하게 된다. 따라서 어떤 음파가 OE에서 반사 혹은 방사하는 경우에는 유동이 발생하지 않지만, 압축파의 경우에는 OE로부터 하류방향으로 향하는 유동이 발생하게 된다. 따라서 OE로부터의 음파와 압축파의 반사현상은 매우 다르며, 두 파동현상은 엄격하게 구별되어야 한다. 압축성 유체공학에서는 음파가 OE에 도달하여 주위로 전파되는 경우를 방사(emission)라고 하며, 압축파의 경우에는 방출(discharge)이라고 한다.

한편 OE로부터 약한 충격파의 반사형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, OE로 향하는 충격파 상·하류의 압력조건에 의하여 결정된다. 그림에서 영역 1, 2 및 3은 각각 전파하는 입사충격파(incident shock wave)의 전·후의 상태, 그리고 반사충격파(reflected shock wave)의 직후의 상태를 나타낸다. 만일 위의 상태 1과 입사충격파의 강도가 알려지는 경우, 영역 2에서 상태는 충격파의 단순이론<sup>(11)</sup>을 이용하여 용이하게 계산할 수 있다. 그러나 반사 충격파의 형태와 강도는 입사충격파 뿐만 아니라 영역 3에서의 상태에 의존하게 된다. 여기

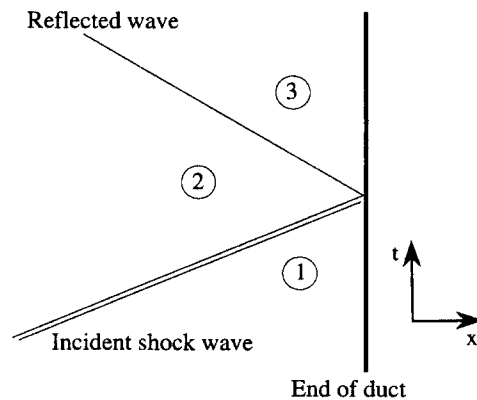


Fig. 1 Shock reflection from an open end.

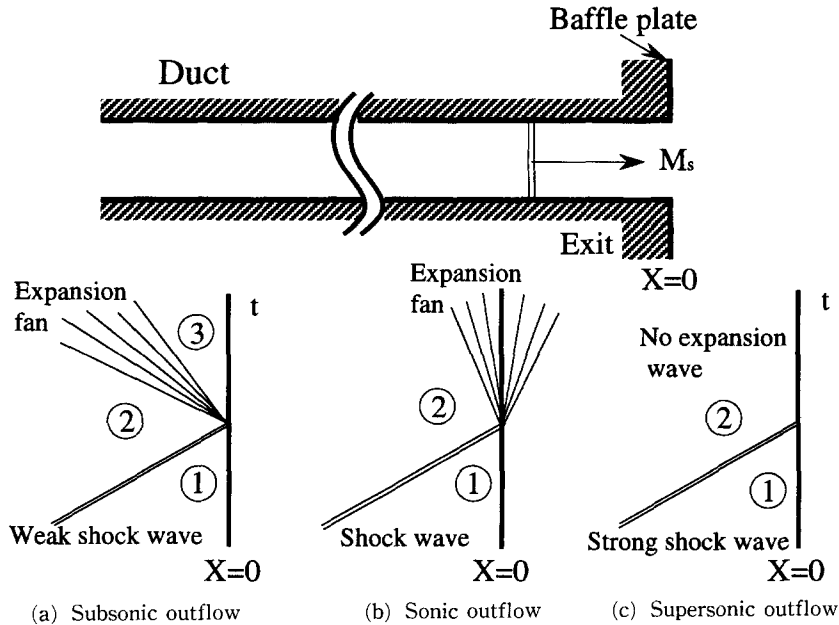


Fig. 2 Reflection patterns of shock-wave from an open end of a duct.

에서 영역 3의 상태는 영역 1의 상태와 반드시 같지는 않다. 예를 들어 영역 3에서의 압력이 영역 2의 압력보다 크다면, 반사파는 충격파로 되며, 반대로 영역 3에서의 압력이 영역 2의 압력보다 작다면, 반사파는 팽창파로 된다.

일반적으로 OE로부터 반사하는 압력파의 문제는 주어진 경계조건을 만족하도록 반사파의 형태와 강도를 반복계산하여 얻는다. 그러나 대개의 계산에서 반사파는 유동이 변화하는 시간 스케일에 비해 압력파가 관내를 전파하는데 걸리는 시간이 작다고 가정하는 즉 정상유동의 가정 하에 수행된다. 여기에서 정상유동의 가정은 압력파가 도달한 후, 관출구에서 정상 유동이 얻어지는데 걸리는 시간을 무시한 경우로, 관 출구에서 순간적인 유동의 조절이 이루어진다는 것을 의미한다. 이 경우, 반사파는 유심팽창파(centered expansion wave)로 된다.

Rudinger<sup>(12)</sup>는 관 출구에서 형성되는 약한 충격파의 반사형태를 Fig. 2에 나타내는 바와 같이 충격파의 전파 마하수  $M_s$ 에 따라 세 가지로 분류하였다. 그림 (a)에 나타낸 바와 같이, 영역 3에서의 유동이 아음속이라면 반사파는 관 출구에서 압력을 주어진 경계조건에 압력까지 감소시키는 팽창파로 되며, 전체 팽창파(Expansion wave fan)는 OE에서 반사하여, 관 내부로 전파하게 된다. 또

그림 (b)에 나타낸 바와 같이 영역 3에서 유동이 음속, 즉 관의 출구에서 유속이 음속과 같아지는 경우에는 압력의 감소는 불가능해지며, 어떠한 압력파도 관내부로 전파하지 못하게 된다. 그리고 그림 (c)에 나타낸 바와 같이 영역 3에서 유동이 초음속으로 되는 경우에는 관 출구면에서 파동은 존재하지 않는다.

위에서 기술한 충격파의 반사형태는 충격파 파장의 효과와 관로의 형상의 효과를 무시한 이상적인 경우로, 고속철도 터널에서 형성되는 압력파와 같이 유한의 파장을 가진 경우에는 반사형태는 달라질 수 있다. 그러나 현재까지 압축파의 반사과정을 연구한 실례는 보고되지 않았다. 본 연구는 고속철도 터널내를 전파하는 압축파( $M_s=1.0$ )에 착목하고 있으므로, 위의 그림 (a)에 해당하는 유동장을 종래의 음향이론을 이용하여 해석적으로 조사하였다.

### 3. 기초방정식과 해석방법

미소진폭의 정상압력파가 관내를 전파하여, 관의 OE에 도달하는 경우에, 압력파의 일부는 관외로 방사되며, 나머지 일부는 OE로부터 반사하여 관내로 전파하게 된다. 이 경우에 Fig. 3에 나타낸 바

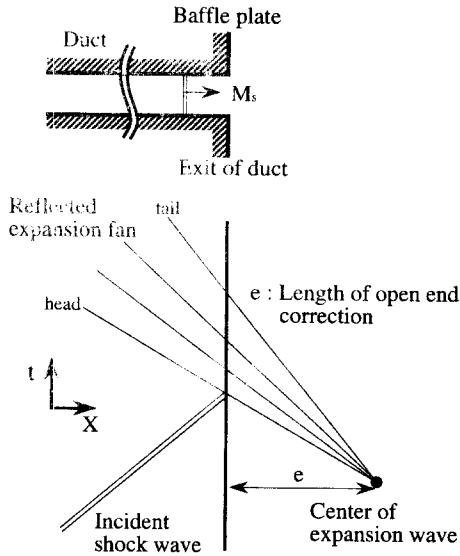


Fig. 3 Wave diagram for weak shock reflection from an open end of a duct.

와 같이 압력파의 반사와 방사현상에는 관의 길이가 길어지는 것과 같은 개구단보정(open end correction: 편의상 이하에서는 OEC라고 한다)이 발생하여,<sup>(13)</sup> 압력파의 방사와 반사에 큰 영향을 미치게 된다. 또 관내를 전파하는 약한 압력파가 OE로부터 방사되는 경우에 형성되는 펄스파는 전파 방향에 따라서 그의 강도가 다르게 되는 지향성(directivity)<sup>(14)</sup>을 가지게 된다.

관내를 약한 충격파나 압축파와 같은 유한 진폭의 비정상 압력파가 전파하는 경우에도 국소적으로 음향이론을 적용할 수 있다. 그러나 고속철도 터널에서와 같이 압축파가 터널 출구로부터 방출되어 충격성 소음이 발생하게 되는 경우에 음향이론을 적용하는 데는 한계가 있을 수 있으며, 실험값과의 비교 등 많은 미해결점이 남아 있다. 본 연구에서는 터널 출구에서 압력파의 반사 및 방사(방출) 과정을 조사하기 위한 첫째 단계로, 원형 직관 내를 전파하는 미소압력파에 대하여, OE에서의 반사, 방사, OEC 및 방사파의 지향성 등에 관하여 고찰하였다.

미소압력파의 전파를 고찰하는데는 식 (1)에 나타난 바와 같이 고전적인 파동방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \phi \quad (1)$$

위의 식에서  $a$ 는 파가 전파해 가는 매질의 음속이

며,  $\phi$ 는 속도포텐셜(velocity potential), 그리고  $t$ 는 시간이다. 식 (1)에서  $\phi$ 가 구해지면, 음장에서의 음압  $p$ 와 입자속도  $V$ 가 결정된다. 즉 매질의 밀도를  $\rho$ 라고 하면,  $p$ 와  $V$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$

$$V = -\nabla \phi \quad (3)$$

본 연구에서는 유동장의 모델로서 관의 직경에 대하여 관의 길이가 매우 긴 원형단면의 직관을 가정한다. 이와 같은 관내를 전파하는 음파는 평면파(plane wave)로 간주될 수 있다. 일반적으로 음향이론에서는 음파의 파장에 따라서 전파특성이 다르게 될 수 있으며, 파장은 이러한 유동장을 해석하는데 매우 중요한 변수가 된다. 대부분의 음향해석에서는 파장을 고려하기 위하여 삼각함수를 사용한다. 이 경우 파의 운동을 단현진동이라 하며, 본 연구에서는 직관내를 전파하는 단현진동 음파가 전파하는 경우에 대하여 음향해석을 수행하였다.

미소 압력파의 파장을 고려하기 위하여 위의 식 (1)은 식 (4)와 같이 다시 쓰여진다.

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (4)$$

여기에서  $k$ 는 파수이며, 파장을  $\lambda$ 로 가정하는 경우에  $k = 2\pi/\lambda$ 로 주어진다. 위의 식 (4)를 해석하는데 있어서 OE에서 어려움이 따르게 된다. OE으로부터 음파의 일부가 방사되어, 구면파(spherical wave)에 가까운 형태로 주위로 전파하게 된다. 따라서 OE에서 파의 방사와 반사를 구하기 위해서는 OE 부근의 음장을 정확하게 이해할 필요가 있다. 종래 Nomura<sup>(15)</sup>는 관 끝에 무한배플판(infinite baffle plate)을 설치한 경우, 그리고 Levine<sup>(16)</sup>은 배플판이 없는 경우에 대한 이론해석을 수행하였다. 본 연구에서는 이들 연구결과를 이용하여, OE에서 파의 반사와 방사의 비 즉 반사계수(혹은 반사율)을 구하고, 방사음파의 전파특성을 고찰하였다.

Fig. 4에는 본 연구에서 사용된 유동장 및 좌표계를 나타내었다. 통상적인 원통좌표계에서와 같이, OE의 중심 O를 원점으로 하고, 관의 중심축 선상에서 원점으로부터의 거리를  $x$ , 관의 중심축에 수직인 면에서 원점으로부터의 거리를  $y$ , 또 원점과 측정점 P와의 거리를  $r$ , 측정점과 관의 중

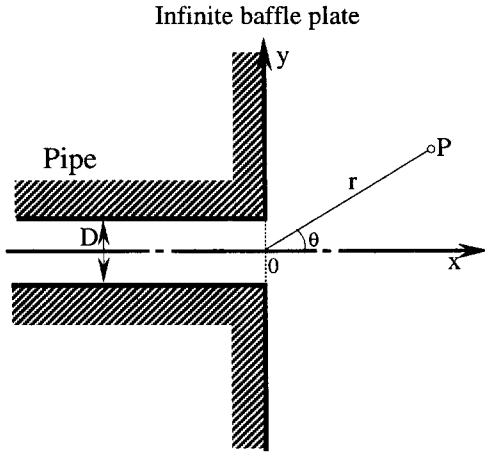


Fig. 4 Flow field and coordinate system.

심축이 이루는 각도를  $\theta$ 로 가정하였다.

무한배플판이 있는 경우에 식 (4)의 근사해<sup>(15)</sup>는 다음의 식으로 주어진다.

$$\phi_0 = \frac{V_0}{k} e^{-ikx} \quad (5)$$

$$\phi_1 = \frac{V_0}{k} \left\{ C_0 e^{ikx} + \sum_{s=1}^{\infty} C_s J_0(\beta_s k) \cdot \exp \sqrt{\beta_s^2 - k^2} \left( \frac{D}{2} \right)^2 \frac{x D}{2} \right\} \quad (6)$$

$$\phi_2 = \frac{V_0}{k} \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot S_n(k, x), \quad x > 0 \quad (7)$$

여기에서  $D/2$ 는 원관의 반경,  $J$ 는 Bessel함수,  $V_0$ 는 유체입자의 진동속도,  $A_n$ 과  $C_0$ ,  $C_s$ 는 계수를 의미한다. 또  $\phi_0$ ,  $\phi_1$  및  $\phi_2$ 는 각각 입사파, 반사파 그리고 방사파의 속도포텐셜을 나타내며,  $J_0$ 는 0차 Bessel함수,  $\beta_s$ 는 다음의 식을 만족하는 값이다.

$$J_0'(\beta_s) = -J_1(\beta_s) = 0 \quad (8)$$

여기에서  $J_0'$ 는 0차 Bessel함수의 1차미분,  $J_1$ 는 제1종 Bessel함수를 나타낸다. 또 위의 식에서  $S_n$ 는 다음으로 주어진다.<sup>(15)</sup>

$$S_n(k, x) = \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{\zeta} J_0(k\zeta) \cdot J_{2n+\frac{1}{2}}(\zeta)}{\sqrt{\zeta^2 - k^2} (kD/2)^2} \cdot \exp(-\sqrt{\zeta^2 - k^2} (kD/2)^2 \frac{x D}{2}) d\zeta, \quad x > 0 \quad (9)$$

해석에서는 위의 식 (6)과 식 (7)을 Fig. 5에 나타낸 유동장에 적용하여  $A_n$ ,  $C_0$  및  $C_s$ 를 구하여 속도포텐셜을 결정한다.

한편 무한배플판이 없는 경우에는 식 (4)의 해를 다음과 같이 가정한다.<sup>(16)</sup>

$$\phi_0 + \phi_2 = A e^{ikx} + B e^{-ikx}, \quad x \rightarrow -\infty \quad (10)$$

$$\phi_1 = f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r}, \quad r \rightarrow \infty \quad (11)$$

위의 식 (10)은 관내의 속도포텐셜을 나타내며, 우변의 제1항은 입사파의 속도포텐셜을, 우변의 제2항은 반사파의 속도포텐셜을 나타낸다. 또 식 (11)은 관외의 속도포텐셜을 나타내며,  $f(\theta)$ 는 각도  $\theta$ 에 의한 포텐셜의 변화를 나타낸다. 따라서 무한배플판이 있는 경우와 유사하게, 위의 식 (10) 및 식 (11)에서 우변의 계수  $A$ ,  $B$  및  $f(\theta)$ 를 구하여, 속도포텐셜을 구할 수 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 반사율

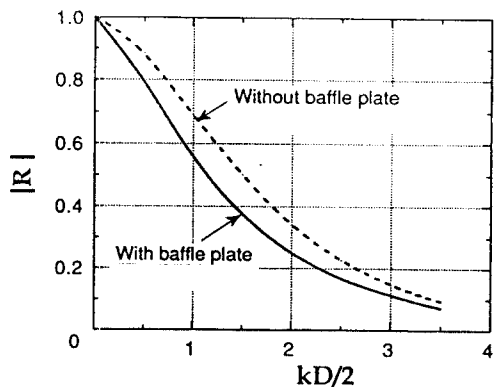
관내를 전파하는 음파가 관의 OE에 도달하게 되면, 음파의 반사와 방사가 발생하므로, 관내의 파동에너지를 일부가 관외로 방사된다. 만일 관의 OE에서 음파의 완전반사가 일어난다면, OE을 포함하는 평면상에서 음압의 변화는 발생하지 않으며, 관외의 압력을 대기압으로 가정하는 경우에 관외에서 압력변동은 발생하지 않는다. 이러한 음파의 반사와 방사현상은 OE에 도달하는 압력파의 파장에 의하여 달라지게 된다.

여기에서 반사파의 음압(sound pressure) 혹은 속도포텐셜과 입사파의 음압 혹은 속도포텐셜의 비를 반사계수 혹은 반사율(reflection coefficient)<sup>(13,14)</sup>  $R$ 로 정의한다. 따라서 입사파가 관외로 방사되는 비율은  $1-R$ 로 된다. 관 출구에 무한배플판이 설치된 경우는 위의 식 (5)와 식 (6)으로부터, 반사율은 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$R = \frac{\phi_1}{\phi_0} \quad (12)$$

또 무한배플판이 없는 경우에는 위와 유사한 방법 즉 위의 식 (10)으로부터  $R=B/A$ 와 같이 정의할 수 있지만, 근사적으로 다음의 식<sup>(16)</sup>으로 주어진다.

$$|R| \approx \left[ 1 + \frac{1}{6} (kD/2)^4 \left\{ \log \left( \frac{1}{\gamma kD/2} + \frac{19}{12} \right) \right\} \right] \cdot \exp(- (kD/2)^2 / 2), \quad kD/2 < 1 \quad (13)$$

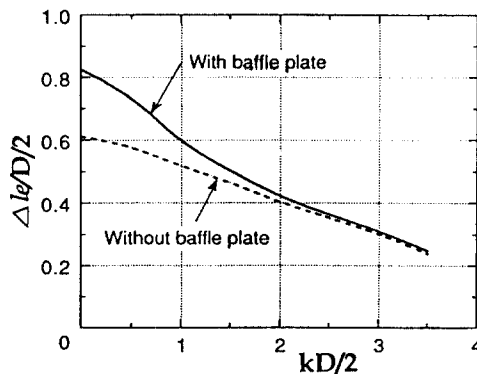
Fig. 5 Reflection coefficient vs  $kD/2$ .

$$|R| \approx \left\{ 1 + \frac{3}{32} \frac{1}{(kD/2)^2} \right\} \cdot (\pi kD/2)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp(-kD/2), \quad kD/2 > 1 \quad (14)$$

여기에서  $|R|$ 은 복소수의 절대값을 의미하며,  $\gamma$ 는 상수이다. Fig. 5에는 위의 식 (12), (13), (14)의 계산결과를 각각 실선과 파선으로 나타내었다. 그림은 반사율  $R$ 에 미치는 무차원 파장정수  $kD/2$  즉  $\pi D/\lambda$ 의 영향을 나타낸 것으로, 반사율은 배플판의 유무에 관계없이  $kD/2$ 가 증가할수록 작아진다.

구체적으로  $kD/2=0$ 인 경우 입사파의 파장이 무한대의 값이 되므로, 배플판의 유무에 관계없이 반사율의 값은 1로 되며, 관출구면에서 완전반사가 일어난다. 따라서 관외로 음파의 방사현상은 발생하지 않는다. 또 입사파의 파장과 관의 직경이 거의 같은  $kD/2=3.0$ 에서 배플판이 있는 경우에 반사율의 값은 약 0.1이며, 배플판이 없는 경우에는 약 0.15 정도로 된다. 따라서 입사파의 대부분은 관외로 방사된다는 것을 알 수 있다. 또 배플판이 있는 경우,  $kD/2=1.5$ 에서 반사율의 값은 0.5로 되며, 입사파와 반사파의 음압은 거의 같아진다.

한편 그림에서 음파의 반사율에 미치는 배플판의 영향에 대해서는 배플판이 없는 경우가 반사율이 크다는 것을 알 수 있다. 실제로 고속철도 터널내에서 형성되는 압력파의 파장은 열차의 속도에 의존하게 되지만, 대략 터널 등가직경의 수배에서 수십배에 달하게 될 것으로 예상된다. 따라서 터널내에서 형성된 압축파의 대부분은 터널 출구에서 반사하여 터널내로 전파한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 Length of open end correction vs  $kD/2$ .

#### 4.2 OEC의 길이

위의 결과로부터  $kD/2 > 0$ 인 경우 관의 OE에서 완전반사가 일어나지 않기 때문에, 관외 즉 관의 출구로부터 하류의 어떤 지점에서 완전반사가 일어난다고 가정하는 가상적인 OE를 생각할 수 있다. 만일 관 출구로부터 가상적인 OE까지의 거리를  $\Delta le$ 로 하는 경우,  $\Delta le$ 를 OEC의 길이(length of open end correction)라 정의한다.<sup>(13,14)</sup> 이와 같은 OEC의 길이는 터널내에서 발생하는 압력변동 및 터널 밖에서 발생하는 충격성 소음을 평가하는데 매우 중요하다. 따라서 이러한 OEC의 개념을 적용하여, 완전반사가 일어나는 가상적인 OE의 길이를 구하면 터널내에서 발생하는 압력변동을 보다 정확하게 예측할 수 있다. 즉 관의 OE에서 반사파를 입사파와 같은 진폭과 OEC의 길이에 비례하는 위상의 차이를 가지는 파동으로서 취급할 수 있다.

OEC의 길이와 반사율  $|R|$  사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.<sup>(16)</sup>

$$R = |R| \cdot \exp(-2ik \cdot \Delta le) \quad (15)$$

따라서 위의 식 (15)에 식 (12)와 식 (13), 식 (14)를 대입하면, OEC의 길이를 구할 수 있다. Fig. 6에는 OEC의 길이와 무차원 파장정수와의 관계를 나타내었다. 그림에서 실선은 무한배플판이 있는 경우이며, 파선은 배플판이 없는 경우를 나타낸다.  $kD/2=0$  즉 압력파의 파장이 무한대의 경우에는 OEC의 길이  $\Delta le$ 는 배플판이 있는 경우에는  $\Delta le=0.411D$ , 없는 경우에는  $\Delta le=0.307D$ 로 되며, 본 해석의 결과와 문헌 (17)의 값( $\Delta le=0.425D$ ) 및 문헌 (18)의 값( $\Delta le=0.41D$ )과 대략 일치한다. 또 그림으로부터  $\Delta le$ 는  $kD/2$ 가 증가함에 따

라 감소하게 되며,  $kD/2 < 2$ 의 영역에서는 배플판이 있는 경우가  $\Delta l e$ 의 값이 큰 것으로 나타나지만,  $kD/2 > 2$ 의 영역에서는 배플판의 영향은 거의 나타나지 않는다. 즉 압력파의 파장이 짧아져 극단적으로 충격파와 같은 형태로 되면, 배플판의 영향은 거의 나타나지 않을 것으로 예상된다.

그러나 이러한 결과는 터널 출구에 설치된 배플판의 크기가 유한한 경우, 예를 들어 터널의 등가 직경의 수배 정도의 크기인 경우에는 분명하지 않다. 실제로 고속철도 터널의 출구에는 배플판과 유사한 형태의 지형이 예상된다. 이 경우 배플판의 크기는 무한하지 않으며, 유한 배플판의 효과에 대한 연구가 필요하다.

### 4.3 지향성계수

관 출구로부터 방사된 압력파는 주위 공간으로 전파하게 된다. 여기에서는 이러한 방사파의 전파 특성을 고찰한다. 관 출구로부터 방사되는 압력파는 원점  $O$ 로부터 같은 거리  $r$ 에 있는 위치에서 그 강도가 달라지는 지향성을 가지게 된다. 음향이론에 의하면, 관 출구로부터 충분히 멀리 떨어진 위치에서 음원으로 부터 임의의 방향으로 방사되는 음압과 음원으로부터 어떤 특정 방향  $\theta$ 에서의 음압의 비를 지향성계수  $D(\theta)$ 로 정의한다. 이러한 지향성 계수(Directivity coefficient)를 구하기 위해서는 음의 방사공간에서 다음과 같이 속도포텐셜을 계산함으로써 얻어질 수 있다. 원형 단면의 직관으로부터 발생하는 평면음원에 대하여, 음원으로부터 멀리 떨어진 위치에서 관 중심축 상의 속도포텐셜은 다음의 식<sup>(19)</sup>으로 주어진다.

$$\phi = \frac{V_0(D/2)^2}{2x} \cdot e^{-ikx} \quad (16)$$

또 중심축 이외의 위치에서 속도포텐셜은 식 (17)<sup>(19)</sup>로 주어진다.

$$\phi(\theta) = \frac{V_0 e^{-ikr}}{2\pi r} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{2J_1(kD/2 \cdot \sin\theta)}{kD/2 \cdot \sin\theta} \quad (17)$$

여기에서  $\theta$ 는 진동판의 중심과 어떤 측정점을 연결하는 직선이 관의 중심축과 이루는 각도이며,  $J_1$ 는 제1차 제1종 Bessel함수이다. 따라서 위의 식 (16)과 식 (17)로부터  $D(\theta)$ 는 다음의 식으로 쓰여진다.

$$D(\theta) = \left| \frac{\phi(\theta)}{\phi(0)} \right| = \left| \frac{2J_1(kD/2 \cdot \sin\theta)}{kD/2 \cdot \sin\theta} \right| \quad (18)$$

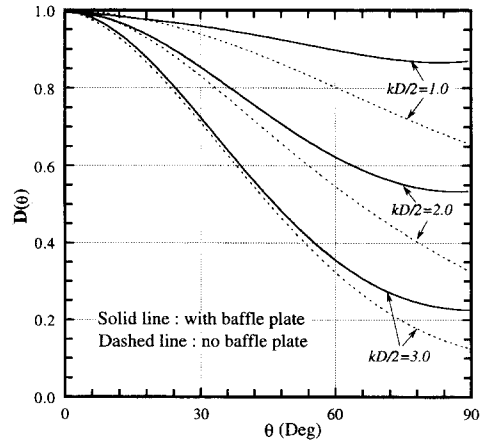


Fig. 7 Directivity coefficient vs  $\theta$ .

Fig. 7에는 관 출구에 무한배플판을 설치한 경우와 설치하지 않은 두 경우,  $\theta$ 에 대한 지향성 계수(절대값)를 나타낸다. 본 연구에서는 관의 중심축을 기준( $\theta=0$ )으로 하였으므로,  $\theta=0$ 에서  $D(\theta)$ 의 값은 1.0이다. 그림으로부터  $D(\theta)$ 는  $\theta$ 가 증가할수록 감소하며, 무차원 파장정수  $kD/2$ 가 커질수록  $D(\theta)$ 의 감소비율은 커지게 된다는 것을 알 수 있다. 이것은  $kD/2$ 의 증가에 따라 관의 중심축 방향으로 방사파의 지향성이 강하게 된다는 것을 의미한다. 한편  $D(\theta)$ 에 미치는 배플판 유무의 영향을 조사하기 위하여, 그림에는 배플판이 있는 경우와 없는 경우를 각각 실선과 파선으로 나타내었다. 그림으로부터 주어진  $\theta$ 에 대하여 배플판이 있는 경우가 없는 경우에 비하여  $D(\theta)$ 가 크게 나타나며,  $kD/2$ 가 증가할수록 두 경우의 차이는 작아진다는 것을 알 수 있다. 또 배플판이 없는 경우에  $D(\theta)$ 는  $\theta$ 가 증가할수록 단조롭게 감소하는 반면, 배플판이 설치된 경우에는  $\theta=60\sim 70^\circ$  부근에서부터 감소율이 달라지게 된다. 이러한 결과로부터 관 출구에 배플판을 설치하는 경우에 방사파의 지향성계수는 커지게 되며, 특히 배플판 부근( $\theta=90^\circ$ )에서 두 경우의 차이가 커지게 된다는 것을 알 수 있다.

한편  $D(\theta)$ 는 기준축( $\theta=0$ )에서의 음압과 임의의  $\theta$ 방향에서의 음압의 비로, 기준축에서 그의 값은 항상 1.0으로 된다. 그러나 본 연구에서와 같이 입사파인 압축파와 방사파인 펄스파의 관계를 구하는 경우에는 입사파를 기준으로 하여 파장을 변수로 한 방사파의 지향특성을 조사하는 것이 보다 바람직하다. 즉 입사파는 관의 OE에서 반사와 방사

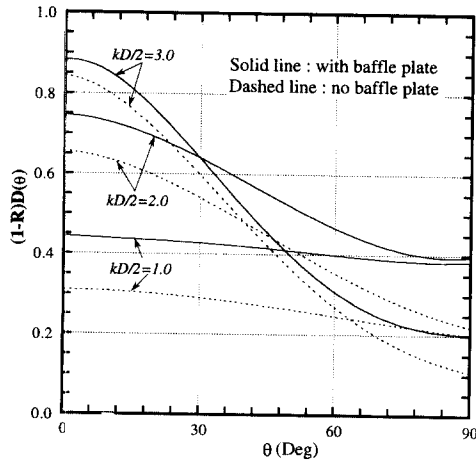


Fig. 8 Ratio of incident and radiated sound pressures vs  $\theta$ .

를 일으키게 되며, 방사파는 그의 전파 지향성을 가지게 된다. 이와 같은 전체 과정을 평가하기 위하여, Fig. 8에는 본 연구에서는 방사율  $(1-R)$ 과  $D(\theta)$ 의 곱으로 나타낸 절대값을 종축으로 하고, 각도  $\theta$ 를 횡축으로 나타내었다. 즉 종축의 값은 입사파의 음압과 방사파의 음압의 비를 의미한다. 그림으로부터 배플판이 있는 경우,  $\theta=0-30^\circ$ 의 영역에서  $kD/2$ 가 증가할수록  $(1-R)D(\theta)$ 의 값은 커지며,  $\theta>30^\circ$ 의 영역에서는 그 반대로 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 OE에서 방사율이 감소하여, 방사율이 증가하기 때문이다. 또  $(1-R)D(\theta)$ 의 값은  $\theta$ 가 증가할수록 감소하며, 그 감소비율은  $kD/2$ 가 증가할수록 커지게 된다. 또 배플판이 있는 경우와 없는 두 경우에 대하여,  $(1-R)D(\theta)$ 의 값은 배플판이 있는 경우가 더 크게 나타나지만,  $kD/2$ 의 증가에 따라 두 경우의 차는 작아진다. 또 배플판이 있는 경우,  $\theta=60-70^\circ$  부근에서부터  $(1-R)D(\theta)$ 의 감소율은 작아지게 되며, 배플판이 없는 경우의 값과의 차이가 증가한다.

## 5. 결 론

고속철도 터널내에서 발생하는 압력파가 터널 출구에서 방사/반사하는 경우에 대한 기초적인 연구의 일환으로, 종래의 음향이론을 이용하여 관의 출구면에서 압력파의 반사, 개구단보정, 방사파의 지향성 등을 조사하였다. 그 결과 관의 출구에서 압력파의 방사율은 파장이 길어질수록 감소하며, 관

출구에 배플판이 없는 경우가 있는 경우에 비해 방사율이 커진다는 것을 알았다. 관의 개구단의 보정 길이는 압력파의 파장이 길어질수록 짧아지며, 무차원 파장정수  $kD/2 > 2$ 의 범위에서 배플판이 개구단 보정길이에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또 압력파의 파장이 길어질수록 관의 중심축 방향으로 방사파의 지향성이 강해진다는 것을 알았다. 따라서 본 연구의 결과로부터 실제 고속철도 터널내에서 형성되는 압력파의 파장이 알려지는 경우, 터널 출구에서 터널내로 반사되는 압력파를 대략적으로 예측할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 연구비지원(과제번호: 971-1008-052-2)에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Sekine, N., et. al., 1988, "Initiation and Propagation of Shock Waves in the Exhaust Pipe of an Internal Combustion Engine," *Transactions of JSME, Series B*, Vol. 54, No. 498, pp. 498~527 (In Japanese).
- (2) 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.
- (3) Kim, H. D., et al., 1997, "Impulse Noise and Its Control," *Prog. Aerospace Sci.*, Pergamon Press, (to be published).
- (4) Rice, C. G. and Martin, A. M., 1973, "Impulse Noise Damage Risk Criteria," *Jour. Sound & Vib.*, Vol. 28, No. 3, pp. 359~367.
- (5) 金義東, 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)," *大韓機械學會論文集*, 第18卷, 第10號.
- (6) 김희동, 1996, "고속鐵道の 空氣力學 IV," *大韓機械學會誌* 第36卷, 第12號.
- (7) 김희동, 1997, "터널內를 走行하는 列車의 空氣力學的 解析 I (1列車의 空氣力學)," *大韓機械學會論文集(B)*, 第21卷, 第8號.
- (8) 김희동, 1997, "터널內를 走行하는 列車의 空氣力學的 解析 II (2列車의 空氣力學)," *大韓機械*



- 學會 論文集(B), 第21卷, 第8號.
- (9) Matsuo, K., Aoki, T., Kashimura, H. and Nonaka, Y., 1992, "Emission of a Propagating Compression Wave from an Open End of a Tube (1st Report, Analytical Study)," *Transactions of JSME*, Series B, Vol. 58, No. 546, pp. 331~337 (In Japanese).
- (10) Wiryadi, A. I. and Hagi, S., 1988, "Experimental Study of Sound Radiation at the Open End of Pipe with Flange and Outer Pipe," *Transactions of JSME*, Series B, Vol. 54, No. 503 (In Japanese).
- (11) 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(B), 第20卷, 第12號.
- (12) Rudinger, G., 1957, "The Reflection of Pressure Wave of Finite Amplitude from an Open End of a Duct," *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 3, No. 1, pp. 48~66.
- (13) 伊藤, 1967, "音響工學原論(上卷)," Korona Co.
- (14) 伊藤, 1967, "音響工學原論(下卷)," Korona Co.
- (15) Nomura, Y., et al., 1960, "On the Acoustic Radiation from a Flanged Circular Pipe," *Jour. Phys. Soc. Japan*, Vol. 15, No. 3, pp. 510~517.
- (16) Levine, H. and Schwinger, R., 1948, "On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe," *Phys. Rev.*, Vol. 73, No. 4, pp. 383~405.
- (17) 小橋, 1978, "音と音波," Korona Co., pp. 104~105.
- (18) Rayleigh, J. W. S., 1945, "The Theory of Sound," Dover Pub. Inc. Vol. 2, pp. 487~491.
- (19) 太田, 1990, "基礎物理音響工學," 朝倉書店, pp. 8~122.