

< 논 문 >

## 지표면에 의한 음의 초과 감쇠 특성 연구

A Study on the Characteristics of Excess Attenuation of the Sound due to the Ground

황 철 호\* · 정 성 수\*

Cheol-Ho Hwang and Sung-Soo Jung

(1996년 12월 30일 접수 ; 1997년 5월 15일 심사완료)

**Key Words :** Excess Attenuation(초과감쇠), Flow Resistivity(유동저항), Spherical Wave Analysis(구면파 해석), Plane Wave Analysis(평면파 해석), Locally Reacting(국소적 반응)

### ABSTRACT

This study observed the meteorological influence on the excess attenuation with various flow resistivities. The flow resistivity is simulated up to 30,000 cgs rays. There is no significant differences among results from spherical wave analysis for excess attenuation, from plane wave analysis, and from locally reacting analysis. This is validated only when the flow resistivity is more than 100 cgs rays. For the determination of effective flow resistivity of ground by measuring the excess attenuation experimentally, it is highly recommended that the distance between source and receiver is about 2.5 m, and that the height of them is 0.3~0.4 m in case that they have the same height. Under this proposed conditions, the flow resistivity of 6-month-passed asphalt ground is estimated to 5,000 cgs rays by comparing the measured excess attenuation with the calculated.

### 1. 서 론

소음원으로부터 임의의 거리만큼 떨어진 수음자는 대기를 통해 직접 전달되는 직접음과 지표면에서 반사된 반사음과의 중첩음을 듣게 된다. 반사파는 지표면의 상태에 따라 그 특성이 달라지므로 수음자는 지표면의 종류에 따라 각기 다른 특성의 음을 듣게 된다. 음에 대한 지표면의 특성은 지표면의 음향 임피던스로 나타내게 되는데 이러한 지표면의 특성 데이터는 육상교통 수단에 의한 소음전파 해석에 필요한 데이터로서 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있다.

지표면 위의 점음원에 의한 음장의 해는 지표면에서의 전자장의 반사파 문제에 대한 해를 구한 Sommerfeld<sup>(1)</sup>의 식이 기본이 된다. 이 식에는 복잡

한 형태의 Sommerfeld 적분식이 있으며, 이 식을 풀기 위해 여러 가지 가정과 근사를 하였는데 Ingard<sup>(2)</sup>, Chien과 Soroka<sup>(3)</sup> 등은 오차 함수, Donato<sup>(4)</sup>와 Kawai 등<sup>(5)</sup>은 안장점(saddle point), Attenborough 등<sup>(6)</sup>, Nobile과 Hayek<sup>(7)</sup>은 steepest descent 방법, 그리고 Habault<sup>(8)</sup>는 급수전개로 근사하여 이론해를 구하였다.

한편, 이들 지표면의 상태가 음의 전파에 미치는 영향에 대한 평가는 초과감쇠(excess attenuation)<sup>(9)</sup>를 주로 사용하여 왔다. 초과감쇠는 자유공간으로 전파되는 직접파의 음압레벨과 지표면에서의 반사영향을 고려한 중첩파 음압레벨과의 차이로 정의된다. 현재까지의 초과감쇠에 대한 연구를 종합해 보면 지표면의 입사음에 대한 국소적 반응(locally reacting)에 대한 연구와 구면파가 평탄한 지표면과 접촉시 발생하는 지면파(ground wave)의 영향 고려에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

\*정회원, 한국표준과학연구원 음향·진동그룹

본 논문에서는 지표면의 상태를 유동저항(flow resistivity)으로 대신하여 Delany와 Bazley<sup>(10)</sup>의 실험식을 이용해서 음의 초과감쇠를 이론적으로 예측하였다. 다양한 지표면을 나타낼 수 있도록 유동저항 값을 30~30,000 cgs rayls 범위로 하여 음원과 수음점의 높이, 음원과 수음점 간의 거리 등 기하학적 변화와 바람등에 의한 기상학적 요동(turbulence)을 고려한 초과감쇠를 이론적으로 예측하고 비교하였다. 또한 음이 지표면에 작용할 때 관심의 대상이 되고 있는 지표면의 입사음에 대한 국소적 반응과 지면파의 영향 등을 비교·분석하였다. 그리고 초과감쇠로부터 지표면의 유동저항 예측치 오차를 최소화할 수 있는 적절한 측정조건을 제시하고, 이들 조건하에서 아스팔트 지표면에 대한 음의 초과감쇠 측정치로부터 이론 예측식과의 비교를 통해 아스팔트 지표면의 유동저항 값을 도출하였다.

## 2. 기본이론

Fig. 1에서 반무한 지표면 위의 수음점 R에서의 음압은 경로  $r_1$ 에 의한 점음원 S로부터의 직접파와 경로  $r_2$ 에 의한 지표면 반사파와의 합으로 표시되며, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{e^{jk_1 r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{jk_1 r_2}}{r_2} + \frac{(1-R_p)F(\zeta)e^{jk_1 r_2}}{r_2} \quad (1)$$

여기서,  $R_p$ 는 평면파 반사계수이며,  $F(\zeta)$ 는 구면파가 평탄한 지표면과 접촉할 때 발생하는 경계 손실 인자로서 지면파 함수라고도 한다.  $\zeta$ 는  $F(\zeta)$ 의 계산에 필요한 수치 거리(numerical distance)이다.

식 (1)에서 우변의 처음 두 항은 직접파와 지표면에서 반사된 반사파를 나타내며, 마지막 항은 구면파와 평탄한 지면과의 접촉에 따른 보정항을 나타낸

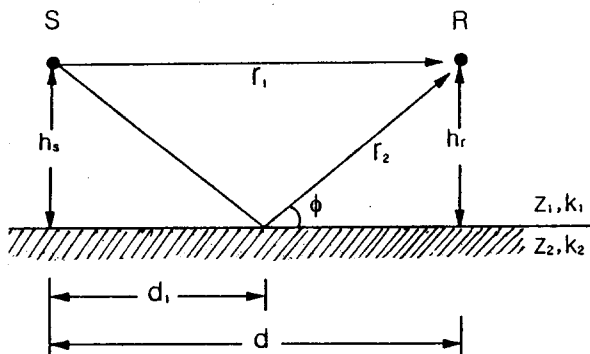


Fig. 1 Schematic diagram of source and receiver geometry

것이다.  $R_p$ 의 형태에 대해서는 여러 가지 이론들이 있으나 대표적인 형태는 다음 식과 같다<sup>(3,11)</sup>.

$$R_p = \frac{[Z_2 \sin \phi - Z_1 \sqrt{(1 - k_1^2 \cos^2 \phi / k_2^2)}]}{[Z_2 \sin \phi + Z_1 \sqrt{(1 - k_1^2 \cos^2 \phi / k_2^2)}]} \quad (2)$$

여기서,  $Z_1$ 과  $k_1$ 은 공기 중에서의 음향 임피던스와 음의 파수,  $Z_2$ 와  $k_2$ 는 지표면의 음향 임피던스와 전파상수를 나타내며,  $\phi$ 는 지표면에서의 반사파와 지표면이 이루는 사이각을 나타낸다.

$F(\zeta)$ 는 다음 식 (3)으로 표시된다.

$$F(\zeta) = 1 + j\sqrt{\pi\zeta} e^{-\zeta} \operatorname{erfc}(-j\sqrt{\zeta}) \quad (3)$$

여기서  $\operatorname{erfc}$ 는 상보 오차함수(complementary error function)이다.

$F(\zeta)$ 의 계산에 필요한 변수  $\zeta$  역시 여러 이론이 있으나 대표적인 형태로 다음 식을 사용한다<sup>(3,11)</sup>.

$$\zeta = \frac{j2k_1 r_2}{(1-R_p)^2} \left( \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \left( 1 - \frac{k_1^2}{k_2^2} \cos^2 \phi \right) \quad (4)$$

식 (1)은 우변의 두 번째 항과 세 번째 항을 정리하여 다음 식과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$P = \frac{e^{jk_1 r_1}}{r_1} + Q \frac{e^{jk_1 r_2}}{r_2} \quad (5)$$

여기서,  $Q$ 는  $Q = R_p + (1-R_p)F(\zeta)$ 로서 영상음원의 강도(strength)라고 하며, 위 식에서 마치 구면파의 반사계수와 같은 역할을 하고 있다.

식 (2)에 있는 지표면 음향 임피던스  $Z_2$ 와 전파상수  $k_2$ 는 지표면의 기공도(porosity)와 굽힘율(tortuosity), 유동저항과 지표면의 구성입자, 기공의 모양인자 등 많은 변수들을 사용하여 기술<sup>(12)</sup>할 수도 있으나, 본 연구에서는 유동저항만을 변수로 지표면의 음향특성을 기술하는 Delany와 Bazley<sup>(10)</sup>의 모델을 사용하였다. 다양한 지표면에 대해 Delany와 Bazley의 모델을 적용한 연구사례<sup>(9,13,14)</sup>가 많이 발표된 바 있는데, 이 모델을 사용하는 경우 유동저항이라는 한개의 값으로 지표면의 상태에 따른 음향특성을 대표할 수 있어 편리하다. Delany와 Bazley의 모델은 흡음재에 사용된 실험식으로  $Z_2$ 와  $k_2$ 가 유동저항  $\sigma$ (cgs rayls)와 주파수  $f$ 의 함수로 다음 식과 같이 표시된다.

$$Z_2/Z_1 = 1 + 9.08(f/\sigma)^{-0.75} + j11.9(f/\sigma)^{-0.73} \quad (6)$$

$$k_2/k_1 = 1 + 10.8(f/\sigma)^{-0.70} + j10.3(f/\sigma)^{-0.59} \quad (7)$$

이때 유동저항  $\sigma$ 값은 시료의 기공도가 1에 근접한 경우<sup>(15)</sup>에 대한 값이므로 지표면에 적용하는 경우에는 지표면을 구성하는 입자들의 기공도가 1에 못 미

치므로 원래의 유동저항 값의 의미보다는 유효 유동저항 값으로 해석하는 것이 일반적이다. 따라서 본 논문에서의 유동저항은 유효 유동저항을 나타내는 것이다. 식 (6)과 (7)에서 볼 수 있듯이 지표면의 음향 임피던스와 전파상수의 값은 지표면의 유동저항값으로부터 구할 수 있으므로 지표면의 상태는 유동저항으로 대표할 수 있게 된다.

한편, 지표면에 의한 초과감쇠(excess attenuation)는 지표면에서의 반사를 고려한 음압레벨과 반사없이 직접파만에 의한 음압레벨과의 차이로 정의되며, Fig. 1의 경우 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$EA = 20 \log_{10} \left| \frac{\frac{e^{jk_1 r_1}}{r_1} + Q \frac{e^{jk_1 r_2}}{r_2}}{\frac{e^{jk_1 r_1}}{r_1}} \right|$$

$$= 20 \log_{10} \left| 1 + Q \left( \frac{r_1}{r_2} \right) e^{jk_1 \Delta r} \right| \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

여기서,  $\Delta r$ 은  $r_2 - r_1$ 이다.

음원과 수음점의 높이( $h_s$ ,  $h_r$ ), 그리고 두 지점 사이의 거리( $d$ )가 정해지면 식 (8)에 따라 초과감쇠를 결정할 수 있다.

### 3. 초과감쇠의 비교 및 분석

평면파 반사계수  $R_p$ 와 수치거리  $\zeta$ 의 결정에 필요한 지표면 임피던스  $Z_2$ 와 전파상수  $k_2$ 는 유동저항  $\sigma$ 를 이용하여 Delany와 Bazley 식에서 결정하면 된다. 실험에 의하면, 대표적인 지표면의 유동저항 값으로는 지표면이 눈으로 덮인 경우 유동저항 값이 가장 낮아서 10~50 cgs rayls 정도이며, 초지의 경우 100~300 cgs rayls, 흙의 경우 2,000~3,000 cgs rayls, 그리고 시멘트와 아스팔트의 경우는 30,000 cgs rayls 정도로 대략 10배 정도씩 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 전형적인 지표면들을 대표할 수 있도록 유동저항이 각각 30, 300, 3,000, 30,000 cgs rayls인 경우에 대해 계산하였으며, 편의상 음원과 수음점은 같은 높이로 하였다. 또한 육상교통소음의 전파특성 예측에서의 사용을 고려해서 분석 주파수 범위는 10 kHz까지로 하였다.

이 절에서는 기상학적 인자들이 지표면에 의한 초과감쇠에 미치는 영향을 검토하였으며, 지표면 상태에 따른 구면파 해석과 평면파 해석, 그리고 국소적 반응 해석의 차이점을 비교하였다. 마지막으로 실험적으로 지표면의 상태를 대표하는 유동저항 값을 안

정되게 도출할 수 있는 기상학적 조건과 기하학적 조건들을 살펴보았다.

#### 3.1 기상학적 요동의 영향

앞 절의 식 (8)은 지표면의 효과만을 고려한 음의 초과감쇠를 나타낸 것인데 실제로 초과감쇠는 지표면 뿐만 아니라 기온 차와 바람 등에 의해서도 영향을 받는다. 예를 들어 지표면과 지표면 위 1 m 지점 간의 온도차가 0.5°C 정도만 되어도 1 dB 이상의 음압레벨 차이가 발생하게 된다<sup>(13)</sup>. 다음 식 (9)는 기상학적 요동을 고려한 지표면의 초과감쇠를 나타낸 것이다<sup>(16)</sup>.

$$EAT = 10 \log_{10} \left| 1 + \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 |Q|^2 + 2 \frac{r_1}{r_2} \{ \cos(k\Delta r) \operatorname{Re}(Q) - \sin(k\Delta r) \operatorname{Im}(Q) \} \eta \right| \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

여기서,  $\eta$ 는 기상학적인 요동 양으로 다음과 같다.

$$\eta = \exp[-a\delta^2(1-\rho)] \quad (10)$$

여기서,  $\delta^2$ 은  $\delta^2 = \sqrt{\pi} \langle \mu^2 \rangle k^2 d L_0$ 이다.  $a$ 는 복잡한 식으로 표현되나, 요동의 크기를 나타내는  $L_0$ 의 값에 따라  $L_0 \ll \sqrt{d/k}$ 인 경우에는 0.5,  $L_0 \gg \sqrt{d/k}$  경우에는 1의 극한값을 가지므로  $a$ 는 0.5~1사이의 값을 갖게 된다.  $\langle \mu^2 \rangle$ 은 바람과 기온 차에 의한 굴절을 변화의 제곱 평균치이며,  $\rho$ 는 직접파와 반사파의 상관관계를 나타내는 상수값으로서 0~1 사이의 값을 가지며 다음 식으로 주어진다<sup>(17)</sup>.

$$\rho = \rho_1 + \rho_2, \quad (11)$$

$$\rho_1 = (\sqrt{\pi} L_0 / 4 h_r) \operatorname{erf}[2 d_1 h_r / (d L_0)], \quad (12)$$

$$\rho_2 = (\sqrt{\pi} L_0 / 4 h_s) \operatorname{erf}[2(d-d_1) h_s / (d L_0)] \quad (13)$$

여기서,  $\operatorname{erf}$ 는 오차함수(error function)이다.

식 (10)의  $\eta$ 를 결정하는  $a$ ,  $\delta$ ,  $\rho$ 의 값들은 기하학적 변수들  $h_s$ ,  $h_r$ ,  $d$ 와 복잡하게 연관되어 있다. 따라서 먼저 기하학적 변수들을 변화시키면서 기상학적 요동이 초과감쇠에 미치는 영향에 대해 살펴보도록 한다. 음원과 수음점의 높이를 0.4 m, 둘 사이의 거리를 1.75 m로 하고 유동저항이 30 cgs rayls와 30,000 cgs rayls인 두 극단적인 지표면에 대해 기온 차와 바람의 영향을 고려한 초과감쇠(점선)와 지표면 상태만에 의한 초과감쇠(실선)를 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 기상학적 변수  $L_0$ 는 기상학에 의한 요동의 크기로 풍속 4 m/s 이상의 강한 바람까지 고려하면 주파수 범위 10 kHz 이하에 대해 1 m 정도의 값을 가지게 되어 10~10,000 Hz의 주

과수 범위에서 0.1~3.1 정도의 값을 갖는  $\sqrt{d/k}$ 와 큰 차이가 없다. 따라서  $\alpha$ 는 앞서 언급한  $\alpha$ 의 두 극한값인 0.5와 1의 중간값을 취하여 0.75로 하였다. 또한,  $\langle \mu^2 \rangle$ 은 바람과 기온에 대한 요동값을 모두 포함하는데 기온 차에 의한 요동이 비교적 큰 경우와 초속 4 m/s 이상의 강한 바람의 경우까지 고려하여  $\langle \mu^2 \rangle = 2 \times 10^{-5(16)}$ 으로 하였다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 기상학적 요동은 초과감쇠의 최소값에 주로 영향을 미치며, 유동저항이 증가할수록 영향이 커져서 유동저항이 30,000 cgs rayls인 경우 3 kHz 부근의 최소값에서 약 2.5 dB 정도의 차이를 보이며 주파수가 높아질수록 차이가 점점 커지고 있다. 그러나 유동저항이 30 cgs rayls인 경우는 기상학적 요동의 효과가 거의 없는 것으

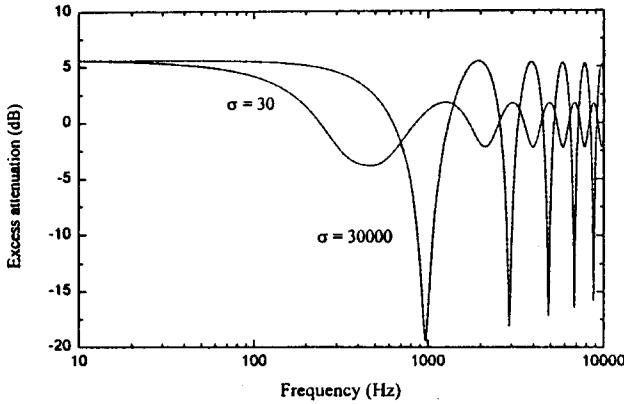


Fig. 2 Comparisons of predicted values of excess attenuation for flow resistivity values of 30 and 30,000 cgs rayls with (dotted lines) and without (solid lines) meteorological turbulence using source and receiver height of 0.4 m and source-receiver distance of 1.75 m

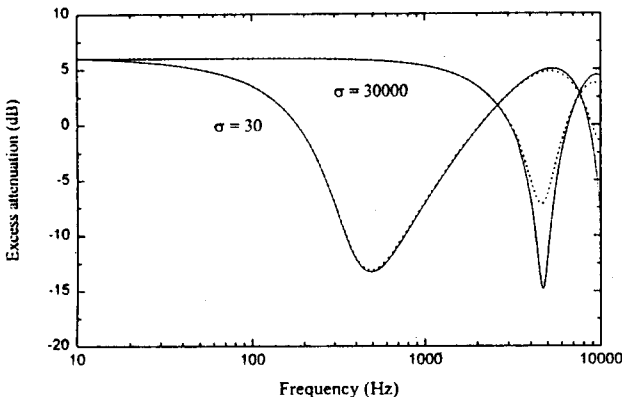


Fig. 3 Same as Fig. 2, but source and receiver separation of 10 m

로 보아 유동저항이 클수록 기상학적 요동의 영향이 큼을 알 수 있다. 고주파수 영역으로 갈수록 기상학적 요동의 영향이 크게 증가하는 것은 식 (10)에서  $\eta$ 를 결정하는  $\delta$  항이 주파수  $f$ 에 매우 민감하며 주파수가 증가할수록  $\eta$ 가 급격히 감소하게 되므로 기상학적 요동의 효과를 고려하지 않은 경우에 비하여 값이 많이 감소하게 된다.

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 조건하에서 음원과 수음점 사이의 거리  $d$ 를 10 m로 증가시켜 계산한 결과이다. 이 그림에 의하면 거리  $d$ 의 증가로  $\Delta r$ 이 감소하게 되어 초과감쇠가 주파수에 대해 완만하게 변하는 형상을 보이며, 기상학적 요동의 영향(점선)이 더 커져서 유동저항이 30,000 cgs rayls인 경우는 첫 번째 최소값부터 영향을 크게 받으며, 유동저항이 30 cgs rayls인 경우는 두 번째 최소치가 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 4는 음원과 수음점의 높이를 1 m로 높이고, 거리  $d$ 를 1.75 m로 하여 유동저항이 30,000 cgs rayls인 경우에 대한 결과이다. 그림에 의하면 음원과 수음점의 높이를 증가시키면 기상학적 요동에 의한 영향(점선)은 크게 줄어들지만,  $\Delta r$ 이 증가하여 초과감쇠의 최대·최소값이 주파수에 대해 민감하게 변함을 알 수 있다.

### 3.2 국소적 반응과 평면파 해석

앞 절에서의 식 (5)는 음이 지표면과 접촉할 때의 일반식으로 이 식에서  $Q$ 는 마치 구면파의 반사계수와 같은 역할을 하고 있다. 현재까지의 연구 결과들

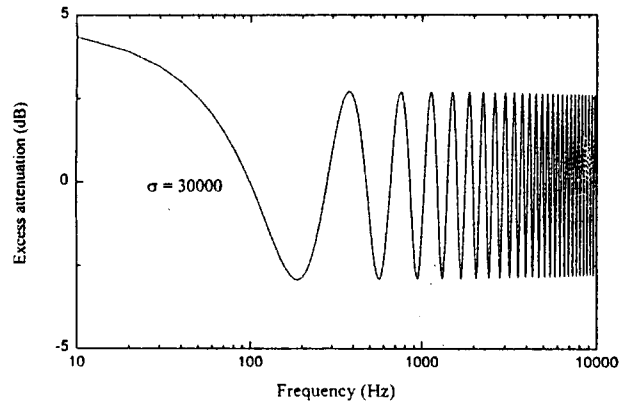


Fig. 4 Comparisons of predicted values of excess attenuation for flow resistivity values of 30,000 cgs rayls with (dotted line) and without (solid line) meteorological turbulence using source and receiver height of 1 m and horizontal separation of 1.75 m

을 비교, 검토해 보면 지표면에서의 음의 전파는 지표면과 나란하게 전파되는 성분을 무시하고 수직 성분만 고려하는, 즉 지표면이 입사음에 대해 국소적인 반응을 하는 것으로 보는 해석방법<sup>(9,11)</sup>과 식 (1)의 마지막 항에서 지면파 함수  $F(\zeta)$ 의 영향을 무시하는 해석방법<sup>(14)</sup>이 있다. 여기서는  $R_p$ 와  $\zeta$ 에 대한 일반 식을 사용한 해석과 국소적인 반응 해석, 그리고 지면파를 무시한 해석의 경우에 대해 각각 유동저항의 변화에 따른 초과감쇠의 변화를 비교한다. 국소적인 반응의 경우 식 (2)와 (4)로부터  $R_p$ 와  $\zeta$ 는 다음 식으로 각각 표현된다<sup>(3,6)</sup>.

$$R_p = \frac{[Z_2 \sin \phi - Z_1]}{[Z_2 \sin \phi + Z_1]}, \quad (14)$$

$$\zeta = \frac{jkr_2}{2} \left( \sin \phi + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2. \quad (15)$$

한편 Cramond와 Don<sup>(14)</sup>은 다양한 실험을 통해 많은 지표면에 대해 지면파의 영향을 무시( $F(\zeta)=0$ )할 수 있음을 보였는데 이 경우  $Q$ 는 식 (14)의  $R_p$ 와 같아지게 된다.

$$Q = R_p = \frac{[Z_2 \sin \phi - Z_1]}{[Z_2 \sin \phi + Z_1]}. \quad (16)$$

편의상 각각의 경우를 구분하기 위하여 식 (2)와 (4)를 사용하는 경우  $Q$ 가 구면파의 반사계수 역할을 하므로 '구면파 해석'으로, 식 (14)와 (15)를 사용하는 경우를 '국소적 반응 해석'으로, 마지막으로 식 (16)의 경우는  $Q$ 가 평면파 반사계수  $R_p$ 와 같으므로 '평면파 해석'으로 부르도록 한다.

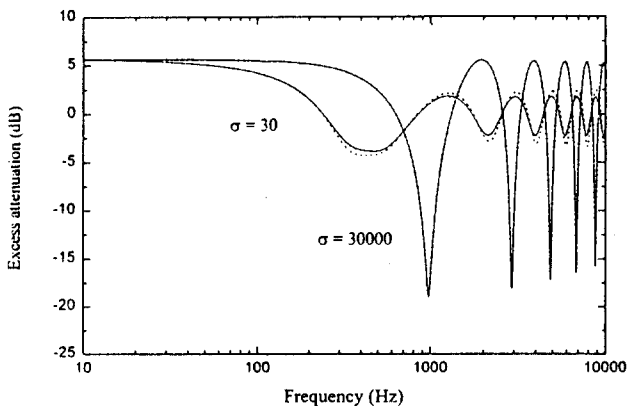


Fig. 5 Comparisons of predicted values of excess attenuation for flow resistivity values of 30 and 30,000 cgs rayls with spherical analysis(solid lines) and locally reacting analysis(dotted lines) using equal source and receiver height of 0.4 m and horizontal separation of 1.75 m

Fig. 5는 음원과 수음점의 높이와 거리가 각각 0.4 m, 1.75m일 때 유동저항이 30 cgs rayls와 30,000 cgs rayls인 두 가지 경우에 대해 '구면파 해석' 결과(실선)와 '국소적 반응 해석' 결과(점선)를 나타낸 것이다. 그림에서 유동저항이 30 cgs rayls 경우 주파수가 높아질수록 '구면파 해석'과 '국소적 반응 해석'의 차이가 커짐을 알 수 있는데, 이것은 지표면이 눈처럼 무른 경우 지표면과 평행하게 전파되는 음의 효과를 고려해야 하며, 국소적인 반응을 하지 않음을 보여주는 것이다. 한편, 유동저항이 커지면 '구면파 해석'과 '국소적 반응 해석'에 의한 초과감쇠의 차이가 줄어들는데 유동저항을 증가시키면서 조사한 결과 100 cgs rayls이 되면 10 kHz까지 최대 0.5 dB 이내에서 잘 일치하였으며, 그림에서 보듯이 유동저항이 30,000 cgs rayls인 경우는 두 해석방법에 의한 초과감쇠 값이 완전히 일치함을 알 수 있다.

다음은 Fig. 5와 같은 조건하에서 '구면파 해석'에 의한 결과(실선)와 '평면파 해석'에 의한 결과(점선)를 Fig. 6에 나타내었는데 유동저항 값이 30,000 cgs rayls인 경우는 두 값의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 유동저항이 클수록 반사계수의 크기  $|R_p|$ 가 1에 가까워지므로  $Q$ 가  $R_p$ 에 근접하여 '구면파 해석'이 '평면파 해석'과 같게 되기 때문이다. 유동저항이 30 cgs rayls인 경우 전반적인 초과감쇠 값은 Fig. 5와 비슷하나 저주파수 영역에서는 '국소적 반응 해석'의 경우보다 초과감쇠의 차이가 더 큼을 알 수 있다. 따라서 유동저항이 작은 경우

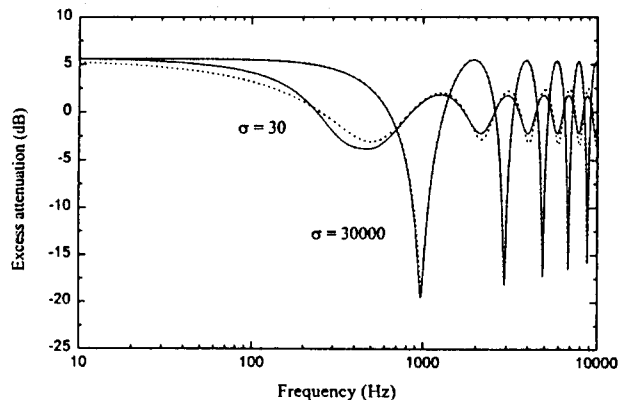


Fig. 6 Comparisons of predicted values of excess attenuation for flow resistivity values of 30 and 30,000 cgs rayls with spherical analysis(solid lines) and plane analysis(dotted lines) using equal source and receiver height of 0.4 m and horizontal separation of 1.75 m

에는 '평면파 해석'이 부적절함을 알 수 있다. 그러나 유동저항이 100 cgs rayls 이상인 경우에는 '구면파 해석'과 '평면파 해석'에 의한 초과감쇠의 차이가 거의 없음을 수치적 계산을 통해 확인하였다.

한편, 유동저항이 30,000 cgs rayls인 지표면에 대해서는 지표면이 딱딱해서 반사파가 지표면에서 위상 지연없이 바로 반사가 되므로 초과감쇠의 최대·최소값이 발생하는 주파수를 예측할 수 있다. 식 (8)로부터  $\Delta r = n\lambda/2$  ( $n$ 은 홀수)일 때 초과감쇠가 최소값이 되며, Fig. 6의 경우  $h_s = h_r = 0.4$  m,  $d = 1.75$  m로부터 초과감쇠가 최소가 되는 주파수는 976 Hz, 2,930 Hz, 4,880 Hz, 6,830 Hz 등으로 계산되며 그림에서 확인할 수 있다.

음의 전파에 대한 세가지 해석방법인 '구면파 해석'과 '평면파 해석', 그리고 '국소적 반응 해석'에 의한 초과감쇠 예측치를 비교해 본 결과 유동저항이 100 cgs rayls 이상인 지표면 상태에 대해서는 세가지 해석이 잘 일치하므로 어떤 방법으로 초과감쇠의 이론적 예측치를 구하더라도 별 문제가 없음을 확인할 수 있었다. 그러나 유동저항이 100 cgs rayls 미만인 경우 지표면은 더 이상 국소적 반응을 하지 않게 되며, 평면파 해석에 의한 결과와도 차이가 있음을 알 수 있었다.

### 3.3 적초과감쇠에 의한 지표면의 유동저항 예측

지표면의 유동저항은 해당 지표면에서의 초과감쇠를 측정함으로써 역으로 산출해 낼 수가 있는데 이를 위해서는 앞서 고찰한 여러 가지 인자들을 고려해서 초과감쇠 측정시 발생할 수 있는 오차를 최소화해야 한다. 종전에는 초과감쇠 측정시 음원과 수음점 사이의 거리를 7~15 m<sup>(13)</sup>정도로 설정하였으나 앞서 Fig. 3에서 확인한 것과 같이 거리가 커질수록 기상학적 요동의 영향이 커지며, 측정시 S/N비가 나빠지게 되므로 최근에는 거리를 짧게 하는 방향으로 연구가 이루어지고 있다. 특히, Attenborough<sup>(16)</sup>는 이러한 기상학적 요인들에 의한 영향을 최소화하여 지표면만에 의한 음의 초과감쇠를 예측할 수 있도록 음원과 수음점의 높이를 0.2~0.4 m로, 음원과 수음점 사이의 거리는 1.75 m로 제안한 바 있다. 그러나 Attenborough는 풍속 4 m/s 이상의 강한 바람까지의 영향을 고려하고, 유동저항의 크기는 5,000 cgs rayls까지로 제한하였기 때문에 Fig. 2에서 이미 본 바와 같이 유동저항이 30,000 cgs rayls인 지표면의 경우에 대해서는 잘 맞지 않음을 알 수 있다. 따라서 유동저항의 적용 범위를 30,000 cgs rayls까지

확대하기 위해서는 기상학적 요동에 의한 영향을 최소화하는 것이 필요하다. 풍속이 1 m/s일 때  $\langle \mu^2 \rangle$ 의 값은 실험<sup>(18)</sup>에 의하면  $\sim 10^{-6}$ 이 되어 초과감쇠에 대한 영향을 무시할 수 있다. Fig. 7은 음원과 수음점의 높이와 거리가 각각 0.4 m, 1.75 m이고, 유동저항이 30,000 cgs rayls인 경우에 대해 1 m/sec의 풍속을 고려한 식 (9)의 초과감쇠값과 식 (8)에 의한 '구면파 해석'결과를 나타낸 것인데 이 결과에 의하면 1m/sec의 풍속은 무시할 수 있음을 알 수 있다.

다음은 초과감쇠의 측정방법에 있어서 음원과 수음점을 수평으로 설치하는 경우와 수직으로 설치하는 경우의 차이점에 대해 살펴보았다. 음원을 수음점 위 수직선 상에 두고 실험을 하는 경우  $\phi$ 가 90°가 되므로 '구면파 해석'이나 '국소적 반응'에서의  $R_p$ 와  $\zeta$ 가 다음 식으로 표현된다.

$$R_p = \frac{[Z_2 - Z_1]}{[Z_2 + Z_1]}, \quad (17)$$

$$\zeta = \frac{jkr_2}{2} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)^2. \quad (18)$$

이러한 수직 입사법은 특히 지표면이 평탄하지 않아서 수평 입사법을 적용하기 곤란한 경우에 유용하게 활용할 수 있다. 한 예로서, 음원과 수음점의 높이를 각각 0.4 m, 0.04 m로 했을 때 유동저항값의 변화에 대한 초과감쇠값의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보면 유동저항에 따라 초과감쇠의 크기는 차이가 있으나 최대·최소값이 생기는 주파수

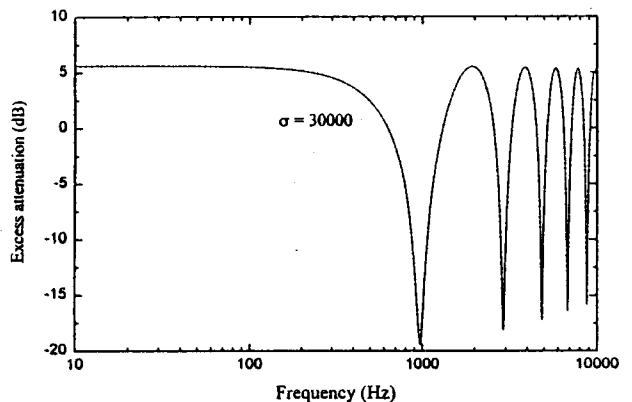


Fig. 7 Comparisons of predicted values of excess attenuation with (dotted line) the value of  $10^{-6}$  for  $\langle \mu^2 \rangle$  in meteorological turbulence and without (solid line) turbulence using equal source and receiver height of 0.4 m, horizontal distance of 1.75 m, and flow resistivity values of 30,000 cgs rayls

의 위치 이동이 별로 없다. 특히,  $\sigma=3,000$  cgs rayls 이상에서는 크기의 차이도 별로 없으므로 초과감쇠 실험에 의해 유동저항을 결정하고자 하는 경우 실험을 정밀하게 할 필요가 있다.

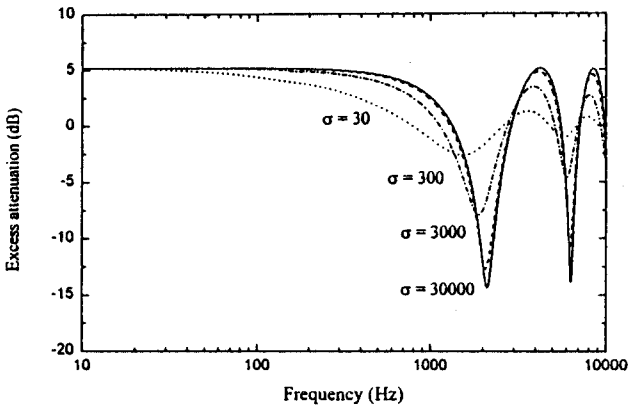
지금까지 초과감쇠를 이용한 지표면의 유동저항 예측을 살펴보았는데 Fig. 7의 경우처럼 풍속 1m/sec 이하에서 측정을 하면 기상학적 요동의 영향은 배제할 수 있으나 지표면의 유동저항이 클수록 유동저항값의 변화에 대한 초과감쇠의 크기와 위상 변화가 작아서 유동저항 값을 결정하기가 어렵다. 따라서 측정시의 기하학적 조건이 유동저항 결정에 미치는 영향을 조사함으로써 측정에 적절한 기하학적 조건을 도출하는 것이 필요하다. 초과감쇠 측정시 음원과 수음점의 높이를 너무 높게 하면 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 초과감쇠값이 주파수에 매우 민감하게 반응하며, 반면 지표면에 너무 가깝게 하면 근접장에 의한 영향과 지표면 구성입자들에 의한 산란 영향으로 역시 유동저항 결정이 어려워진다. 음원과 수음점간의 거리는 너무 크게 하면 기상학적 요동의 영향이 커지고 주변 암소음의 영향으로 신호 대 잡음비가 나쁘게 되며, 반대로 거리를 너무 작게 하면 유동저항의 변화에 대한 초과감쇠값의 주파수 이동이 작아져서 유동저항을 결정하기가 어려워진다. 이러한 상관관계를 고려하여 유동저항 30,000 cgs rayls까지 그리고 주파수 10 kHz 범위 내에서 기상학적 요동의 영향을 0.5 dB 이내로 유지하면서 초과감쇠 측정치로부터 유동저항 값의 결정이 적절한 기하학적 조건을 시뮬레이션한 결과 음원과 수음점의

높이는 0.3~0.4 m, 음원과 수음점간의 거리는 2.5 m 일 때가 적절하였다.

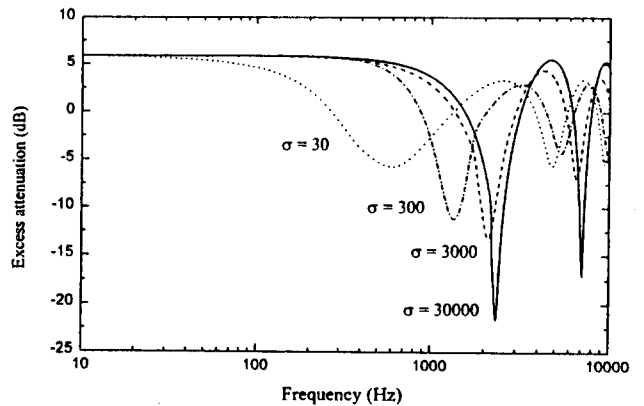
Fig. 9는 제안한 기하학적 조건에 따라 음원과 수음점의 높이 및 거리를 각각 0.3 m, 2.5 m로 하고, 지표면의 유동저항 값이 30, 300, 3,000, 30,000 cgs rayls인 경우에 대해 '구면파 해석'에 의한 초과감쇠를 비교한 것이다. 그림에서 초과감쇠의 최대·최소값의 위치와 크기가 유동저항에 따라 잘 구분됨을 볼 수 있다. 그림에는 나타내지 않았으나 이 경우 기상학적 요동에 의한 영향은  $\sigma=30,000$  cgs rayls인 경우 최대 0.2 dB 이내로 유지되었다. 한편, Attenborough의 제안처럼 음원과 수음점의 높이 및 거리를 각각 0.3 m, 1.75 m로 두고 지표면의 유동저항이 3,000, 30,000 cgs rayls인 두 경우에 대하여 초과감쇠의 이론적 계산치를 비교한 결과 그림 9의 경우에 비해 유동저항 크기에 따른 주파수 변화가 작아서 유동저항 결정이 상대적으로 불리함을 확인하였다.

지금까지 초과감쇠에 대한 기상학적 요동의 효과와 해석방법에 따른 차이점 그리고 지표면의 유동저항 도출에 적절한 기하학적 거리를 수치적 계산을 통해 살펴보았는데 실제 측정에 있어서는 지표면의 평탄도, 구성입자들에 의한 산란, 주변 물체들에서의 반사음, 기상학적 요동 그리고 암소음 등의 다양한 조건들에 의해 실험값이 영향을 받게 된다.

다음은 야외에서 실제 초과감쇠를 측정하고 이론치와 비교하기 위하여 한 예로 평탄한 아스팔트 지표면을 선택하였다. 아스팔트는 포장한지 약 6개월



**Fig. 8** Comparisons of predicted values of excess attenuation for flow resistivity values of 30, 300, 3,000, and 30,000 cgs rayls. The source height of 0.4 m and receiver height 0.04 m are vertically separated



**Fig. 9** Comparisons of predicted values of excess attenuation for flow resistivity values of 30, 300, 3,000, and 30,000 cgs rayls with spherical analysis using source and receiver height of 0.3 m and horizontal separation of 2.5 m

정도된 것이며, 실험은 순간 풍속 0.5 m/s 이하인 맑은 날에 하였다. Fig. 10은 음원과 수음점의 높이 및 거리가 각각 0.39 m, 5 m일 때 초과감쇠의 측정치(가는 실선)와 이론적 예측치(굵은 실선)를 비교한 것이며, Fig. 11은 본 연구에서 제안한 기하학적 조건인 음원과 수음점의 높이 0.3 m, 거리 2.5 m로 해서 측정한 결과와 예측치를 나타낸 것이다. 유동저항 값을 변화시키면서 초과감쇠의 이론 예측치가 실험치와 가장 잘 일치하는 경우를 조사한 결과 5,000 cgs rayls인 경우에 오차가 가장 적었다. 따라서 실험한 아스팔트 지표면의 유동저항은 5,000 cgs rayls로 추정할 수 있다. 제안한 기하조건으로 실험한 Fig. 11의 경우 Fig. 10에 비해 1 kHz 이상에서 산란이 많이 줄어든 것을 볼 수 있는데 이것은 음원

과 수음점 사이의 거리 감소로 기상학적 요동의 영향 감소와 신호대 잡음 비의 향상때문으로 생각된다. Fig. 10과 Fig. 11에서 200 Hz 이하에 대해 예측치와 실험치의 차이가 커진 것은 음원으로 사용된 확성기의 작동 주파수 특성 영역이 200 Hz 이상으로 200 Hz 이하에서는 동특성이 약 20 dB 정도 떨어지므로 다른 주파수 범위에 비해 상대적으로 신호 대 잡음비가 나빠지게 된 것이 원인으로 생각된다. 그런데 아스팔트 지표면에 대한 다른 연구결과에 의하면 20,000~30,000 cgs rayls 정도로 본 연구의 결과보다 큰 값인데 이것은 실험 대상으로 한 아스팔트가 포장된지 6개월 정도 경과한 것으로 비교적 한적한 곳에 위치하고 있어 오염정도가 적고 잘 다져지지 않은 상태여서 일반 도로의 아스팔트 지표면의 유동저항 값과는 차이가 있는 것으로 사료된다.

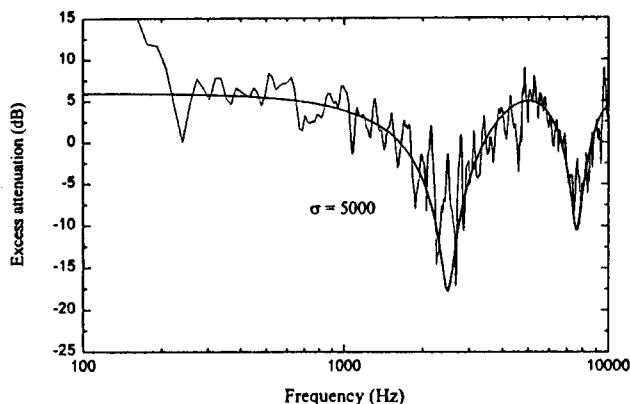


Fig. 10 Comparisons of predicted values(thick solid line) of excess attenuation with experimental values (thin solid line) for the ground surface of asphalt using  $h_s = h_r = 0.39$  m and  $d = 5$  m

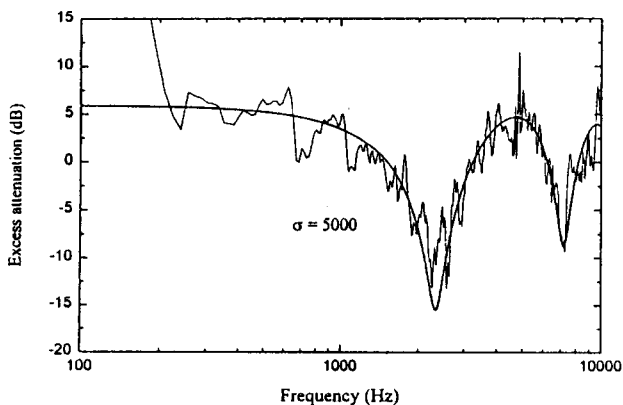


Fig. 11 Comparisons of predicted values(thick solid line) of excess attenuation with experimental values (thin solid line) for the ground surface of asphalt using  $h_s = h_r = 0.3$  m and  $d = 2.5$  m

#### 4. 결 론

다양한 지표면을 나타내는 30~30,000 cgs rayls 범위의 다양한 유동저항에 대해 음원과 수음점의 높이 및 거리 등 기하학적 조건과 기상학적 요동이 초과감쇠에 미치는 영향을 이론적으로 예측하고 비교하였다. 온도차이와 바람 등 기상학적 요동은 초과감쇠의 최소값에 주로 크게 영향을 미치게 되는데, 초과감쇠를 이용하여 지표면의 유동저항을 결정하는 경우 풍속이 1 m/s 이하일 때 실험을 하면 기상학적 요동을 최소화할 수 있으며, 유동저항을 좀더 정확히 분류해 내기 위해서는 음원과 수음점의 높이를 0.3~0.4 m, 두 지점간의 거리를 2.5 m 정도로 유지하는 것이 적절함을 수치적 계산을 통하여 알 수 있었다. 또한 음원과 수음점의 위치 및 거리 등 기하학적 조건들에 대해 유동저항을 30~30,000 cgs rayls 범위 내에서 변화시키면서 '구면파 해석', '평면파 해석' 및 '국소적 반응 해석'으로 초과감쇠를 계산해 본 결과 유동저항이 100 cgs rayls 이상에서는 세 방법 모두 차이가 없음을 알 수 있었다. 제안한 조건하에서 아스팔트에 대한 초과감쇠 실험을 한 결과 안정적인 신호를 얻을 수 있었으며, 실험한 아스팔트 지표면의 유동저항은 5,000 cgs rayls로 예측되었다.

#### 참고문헌

- (1) Sommerfeld, A., 1909, "Über die Ausbreitung der Wellen in der Drahtlosen Telegraphie," Ann.



- Phys. Vol. 28, pp. 665~736.
- (2) Ingard, U., 1951, "On the Reflection of a Spherical Sound Wave from an Infinite Plane," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 23, pp. 329~335.
- (3) Chien, C. F. and Soroka, W. W., 1980, "A Note on the Calculation of Sound Propagation Along an Impedance Plane," J. Sound Vib. Vol. 69, pp. 340~343.
- (4) Donato, R. J., 1976, "Propagation of a Spherical Wave Near a Plane Boundary with a Complex Impedance," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 60, pp. 34~39.
- (5) Kawai, T., Hidaka, T., and Nakajima, T., 1982, "Sound Propagation Above an Impedance Boundary," J. Sound Vib. Vol. 83, pp. 125~138.
- (6) Attenborough, K., Hayek, S. I., and Lawther, J. M., 1980, "Propagation of Sound Above a Porous Half-Space," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 68, pp. 1493~1501.
- (7) Nobile, M. A. and Hayek, S. I., 1985, "Acoustic Propagation Over an Impedance Plane," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 78, pp. 1325~1336.
- (8) Habault, D., 1980, "Diffraction of a Spherical Wave by Different Models of Ground: Approximate Formulas," J. Sound Vib. Vol. 68, pp. 413~425.
- (9) Chessell, C. I., 1977, "Propagation of Noise Along a Finite Impedance Boundary," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 62, pp. 825~834.
- (10) Delany, M. E. and Bazley, E. N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials," Appl. Acoust. Vol. 3, pp. 105~116.
- (11) Di, X. and Gilbert, K. E., 1993, "An Exact Laplace Transform Formulation for a Point Source Above a Ground Surface," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 93, pp. 714~720.
- (12) Attenborough, K., 1985, "Acoustical Impedance models for outdoor ground surface," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 99, pp. 521~544.
- (13) Embleton, T. F. W., Piercy, J. E., and Daigle, G. A., 1983, "Effective Flow Resistivity of Ground Surfaces Determined by Acoustical Measurements," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 74, pp. 1239~1244.
- (14) Cramond, A. J. and Don, C. G., 1984, "Reflection of Impulses as a Method of Determining Acoustic Impedance," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 75, pp. 382~389.
- (15) Miki, Y., 1990, "Acoustical Properties of porous materials-Generalizations of empirical models," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) Vol. 11, pp. 25~28.
- (16) Attenborough, K., 1994, "A Note on Short-Range Ground Characterization," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 95, pp. 3103~3108.
- (17) Clifford, S. F. and Lataitis, R. J., 1983, "Turbulence Effects on Acoustic Wave Propagation Over a Smooth Surface," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 73, pp. 1545~1550.
- (18) L'Esperance, Gabillet, Y., and Daigle, G. A., 1995, "Outdoor Sound Propagation in the Presence of Atmospheric Turbulence: Experiments and Theoretical Analysis with the Fast Filed Program Algorithm," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 98, pp. 570~579.