

# 음향학적 방법에 의한 지표면의 유동 비저항 예측

°황철호\* · 정성수\* · 은희준\*

## Prediction of the Specific flow resistivity of the Ground Surface by Acoustical Method

Cheol-Ho Hwang, Sung-Soo Jung, Hee-Jun Eun

### ABSTRACT

Most outdoor sounds go from sources relatively near the ground to receivers near the ground. When either source or receiver are near the ground, interference can occur between the direct sound and that reflected at the ground which travels a slightly longer path. The sound pressure at the receiver is very different depending on the state of ground surface i.e. ground impedance. Ground impedances could be characterized by the value of a single parameter, namely the flow resistivity of the ground surface. This study suggests the measurement method of the flow resistivity using two microphones and predicts the flow resistivities of various ground surfaces.

### 1. 서론

옥외에서 전파되는 소음은 여러 다양한 경로를 거쳐 수음자에게 도달하게 되는데, 이러한 경로중에서 가장 기본이 되는 것은 지표면에서의 반사이다. 장애물이 없는 평지에서의 경우 수음자는 대기중으로 직접 전파되는 직접파와 지표면에서 반사된 반사파와의 중첩파를 듣게 되므로, 반사파의 특성에 따라 수음점에서의 소음특성이 좌우되게 된다. 이 때 반사파의 특성은 지표면의 상태에 따라 달라지게 되므로 결국 지표면의 음향학적 특성 즉, 지표면의 음향 임피던스는 수음점에서의 음향특성을 결정하는 중요한 인자가 된다.

지표면의 음향 임피던스를 결정하는 대표적인 방법으로는 초과감쇠 방법<sup>(1)</sup>과 음압레벨 차이 방법<sup>(2)</sup>이 있는데, 음압레벨 차이 방법이 초과감쇠 법에

비해 실험시 오차를 더 줄일 수 있으므로 더 안정적인 방법이라 할 수 있다. 지표면의 음향 임피던스에 대한 이론적 해석은 지표면 구성입자의 기공률(porosity), 굽힘율(tortuosity), 유동 비저항(flow resistivity), 기공의 모양인자(shape factor) 등의 변수들로 기술할 수 있다<sup>(3)</sup>. 이들 변수들을 모두 사용하여 해석하면 지표면의 음향 임피던스 값의 정확도는 높일 수 있으나, 변수들이 너무 많아 실용적으로 사용하기에는 불편하다. 따라서 이들 변수들 중 유동 비저항만을 사용하여 지표면 음향 임피던스를 기술할 수 있는 Delany와 Bazley<sup>(4)</sup>의 모델을 많이 사용하고 있는데<sup>(1,5)</sup>, 이 경우 지표면의 음향 임피던스는 상수인 유동비저항으로 표현되므로 결국 지표면의 음향 임피던스를 구하는 문제는 지표면의 유동비저항을 구하는 문제로 귀착된다.

초과감쇠나 음압레벨 차이를 측정하는 경우, 이들 측정값이 순수하게 지표면의 특성에만 의존하

\* 한국표준과학연구원 음향진동그룹

는 것이 아니라 음원과 수음점의 높이와 거리, 기온과 바람 등의 기상학적 변수들에 의해서도 영향을 받는다. 종전에는 음원과 수음점의 거리를 7~15 m 정도로 설정하였으나<sup>(6)</sup> 최근에는 기상학적 변수들에 의한 오차를 최소화하기 위해 두 지점간의 거리를 짧게 하는 추세이다<sup>(7)</sup>. 최근에 황철호등<sup>(8)</sup>은 지표면의 유동 비저항을 안정되게 예측할 수 있는 방안으로 풍속 1 m/s 이하, 음원과 수음점의 높이를 동일하게 하는 경우 0.3~0.4 m, 그리고 두 지점간의 거리는 2.5 m로 설정할 것을 제안한 바 있다.

국내의 경우 김동일 등<sup>(9)</sup>이 몇가지 지표면에 대한 유동 비저항 값을 초과감쇠 방법을 이용하여 예측한 바 있으나 특정 주파수에 대해서만 실험을 함으로써 주파수에 따른 데이터가 충분하지 못하였다. 본 연구에서는 몇가지 전형적인 지표면에 대해 유동 비저항 값 예측을 위해 주파수 10 kHz까지 두 마이크로폰의 음압레벨 차를 측정하였다. 이들 측정치에 대해 지표면에 대한 특성 임피던스와 전파상수를 Delany와 Bazley의 모델을 이용한 음압레벨 차 계산치와 비교함으로써 지표면의 유동 비저항을 도출하였다. 실험은 음원인 확성기와 측정용 마이크로폰을 수평으로 배열시켜 측정하는 수평배열법과 함께 확성기와 마이크로폰을 수직으로 놓고 측정하는 수직배열법을 같이 사용함으로써 유동비저항 값에 대한 신뢰도를 향상시켰다.

## 2. 기본이론

Fig. 1에서 수음점 R의 음압은 점음원 S로부터 경로 r을 따르는 직접파와 지표면에서 반사한 경로 r\*의 반사파 음압이 중첩되어 결정되며, 다음식과 같이 표시된다.

$$\frac{P}{P_o} = \frac{e^{jk_1 r}}{r} + R_p \frac{e^{jk_1 r^*}}{r^*} + \frac{(1 - R_p)F(\zeta)e^{jk_1 r^*}}{r^*} \quad (1)$$

여기서, P<sub>o</sub>는 음원의 특성에 의존하는 기준 음압, R<sub>p</sub>는 평면파 반사계수, 그리고 F(ζ)는 구면파가 평탄한 지표면과 접촉할 때 발생하는 경계 손실인 자로서 지면파 함수라고도 한다. ζ는 F(ζ)의 계산에 필요한 수치 거리(numerical distance)이다.

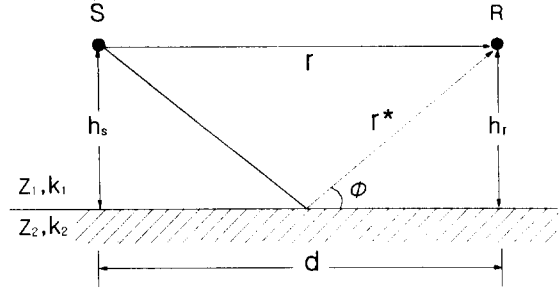


Fig. 1 Diagram showing location of source S and receiver M to measure excess attenuation.

식 (1)에서 우변의 처음 두 항은 직접파와 지표면에서 반사된 반사파를 각각 나타내며, 마지막 항은 구면파와 평탄한 지면과의 접촉에 따른 보정항을 나타낸 것이다. R<sub>p</sub>는 다음 식과 같다<sup>(6)</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<sub>1</sub>과 k<sub>1</sub>은 공기 중에서의 음향 임피던스와 음의 파수, Z<sub>2</sub>와 k<sub>2</sub>는 지표면의 음향 임피던스와 전파상수 그리고 φ는 지표면에서의 반사파와 지표면이 이루는 사이각을 나타낸다.

F(ζ)는 다음 식으로 표시된다.

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

여기서, erfc는 상보 오차함수(complementary error function)이다.

F(ζ)의 계산에 필요한 변수 ζ는 다음과 같다.

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

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

$$P/P_o = \frac{e^{jk_1 r}}{r} + Q \frac{e^{jk_1 r^*}}{r^*} \quad (5)$$

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

식 (2)의 지표면 음향 임피던스  $Z_2$ 와 전파상수  $k_2$ 를 Delany와 Bazley의 모델을 이용하여 나타내면 다음 식과 같다<sup>(4)</sup>.

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

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

위의 식에서 유동 비저항  $\sigma$ (cgs rayls)는 원래 유리솜이나 압면과 같이 시료의 기공률이 1에 가까운 경우에 대한 값인데 비해 지표면을 구성하는 입자들은 기공률이 1보다 작으므로 본래의 유동 비저항 의미보다는 유효 유동 비저항으로 해석한다. 식 (6)과 (7)에서 볼 수 있듯이 지표면의 음향 임피던스와 전파상수 값은 지표면의 유동 비저항 값으로부터 구할 수 있으므로 결국 지표면의 상태는 유동 비저항으로 나타낼 수 있다.

음압레벨 차 방법에서 음원과 두 개의 마이크로폰의 배치는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 음원과 두 개의 마이크로폰을 모두 수직선상에 위치시킨다. 두 마이크로폰은 지표면에 의한 반사파와 직접 파가 중첩된 음압을 각각 측정하게 되며, 두 마이크로폰에서의 음압은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{M_1}/P_0 = \frac{e^{jk_1 r_1}}{r_1} + Q_1 \frac{e^{jk_1 r_1^*}}{r_1^*} \quad (8)$$

$$P_{M_2}/P_0 = \frac{e^{jk_1 r_2}}{r_2} + Q_2 \frac{e^{jk_1 r_2^*}}{r_2^*} \quad (9)$$

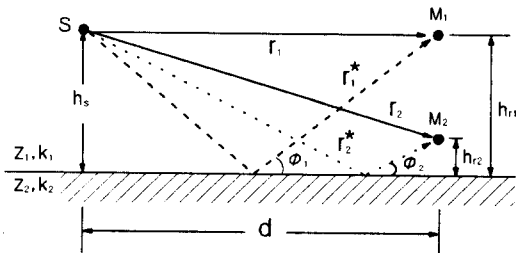


Fig. 2 Diagram showing location of source S and receiver  $M_1$  and  $M_2$  to measure pressure level difference.

따라서 음압레벨 차이는 다음 식과 같다.

$$P_{diff} = 20 \log_{10} \left| \frac{\frac{\exp(jk_1 r_1)}{r_1} + Q_1 \frac{\exp(jk_1 r_1^*)}{r_1^*}}{\frac{\exp(jk_1 r_2)}{r_2} + Q_2 \frac{\exp(jk_1 r_2^*)}{r_2^*}} \right| \text{ dB} \quad (10)$$

여기서,  $Q_1$ 과  $Q_2$ 는 영상음원의 강도로서 반사파와 지표면의 각도에 의존한다.

### 3. 실험방법 및 결과분석

#### 3-1 실험방법

대표적인 지표면으로 아스팔트 포장도로, 시멘트 포장도로, 진흙 땅, 일반적인 흙, 모래, 자갈밭, 초지, 배추밭 등을 선정하였다. 실험이 야외에서 이루어지므로 휴대가 가능한 장비로 시스템을 구성하여 측정 데이터를 DAT에 녹음하고, 실험실에서 분석기와 컴퓨터를 이용하여 분석하였다. 신호 발생기가 내장된 FFT 분석기(Larson & Davis 2900)와 전력증폭기(B&K 2706), 확성기(삼미 SU-100 EF)를 이용하여 발생시킨 백색잡음을 음원으로 사용하였다. 발생 음압의 크기는 확성기로부터 1 m 떨어진 지점에서 90 dB를 유지하도록 하였다. 상호 보정이 잘 된 두 개의 마이크로폰을 이용하여 FFT 분석기(Larson & Davis 2900)에서 실시간 분석 내용을 확인하면서 두 음압신호를 DAT(Sony PC208Ax)에 녹음하였다. 실험실에서 녹음된 신호를 주파수 분석기(B&K 3550)로 500회 스펙트럼 평균하여 두 마이크로폰 간의 음압레벨 차를 구하였다. Fig. 3은 야외 실험장치에 대한 모형을 나타낸 것이다.

#### 3-2 결과 및 분석

풍속 0.5 m/s 이하인 맑은 날, 포장한지 약 6개월된 평탄한 아스팔트 도로에 대하여 음압레벨 차를 측정하였다. 음원( $h_s$ )과 윗쪽 마이크로폰( $h_{r1}$ )의 높이는 0.3 m로 같게 두고, 아랫쪽 마이크로폰

( $h_{r2}$ )은 지면 가까이 0.03 m 위치에 설치하였으며 음원과 뒷쪽 마이크로폰간의 거리( $d$ )는 2.5 m로 하였다. 이러한 조건하에서 측정된 음압레벨 차의 실험치(가는실선)와 유동 비저항을 5,000 cgs rayl/m로 하여 이론적으로 계산한 음압레벨 차(굵은 실선)를 Fig. 4에 같이 나타내었다.

그림 4와 같이 유동 비저항 값을 바꿔가면서 예측치와 측정값을 비교하여 두 값의 오차가 가장 작아지게 되는 때의 유동 비저항을 찾으면 이 값이 대상 지표면의 유동 비저항을 대표한다고 볼 수 있다. 그림에서 실험대상으로 하고 있는 아스팔트 도로의 유동 비저항은 5,000 cgs rayl/m이라고 할 수 있다.

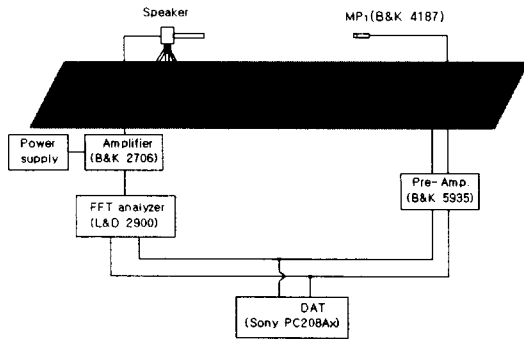


Fig. 3 Experimental setup.

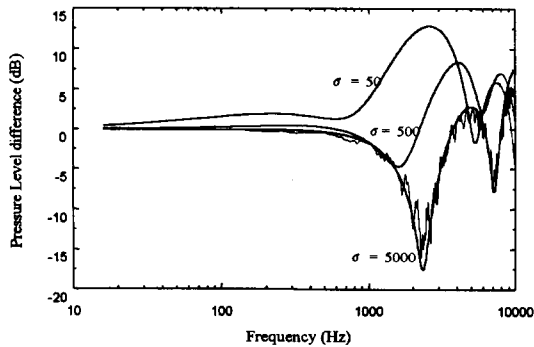


Fig. 4 Comparison of three theoretical sound spectra with results measured over asphalt for one configuration of source and receiver heights ( $h_s=h_{r1}=0.3$  m,  $h_{r2}=0.03$  m) and distance apart ( $d=2.5$  m). Best fit is for  $\sigma=5,000$  cgs rayls.

이 값은 다른 연구 결과<sup>(6)</sup>에 의한 20,000 cgs rayl/m에 비하면 상당히 낮은 편이다. 이러한 차이 점은 본 실험에서 사용된 아스팔트 도로가 포장한 지 6개월 정도 경과된 것으로 차량의 통행이 거의 없는 상태에서 아스팔트를 이루는 구성 입자들 사이에 공기 틈새가 많이 존재함으로써 음이 아스팔트 내부로 어느정도 전파될 수 있었기 때문으로 보인다. 일반적으로 유동비저항은 지표면 구성 입자들의 기공률에 의존하며, 기공률이 낮을수록 유동 비저항은 높아져서 음향학적으로 딱딱한 지표면을 이루게 된다.

음원과 마이크로폰을 수평으로 배열하여 실험하는 방법과 함께 수직으로 배열하여 실험을 수행하였다. 이러한 수직 입사법은 측정하고자 하는 지역이 협소하거나 주변의 구조물에 의한 반사음의 영향이 큰 경우 등 수평배열이 곤란한 경우에 효과적으로 사용될 수 있는 방법이다. Fig. 5는 역시 같은 아스팔트 도로에 대하여 음원과 마이크로폰을 같은 수직선상에 위치시키는 수직입사법을 이용하여  $h_s=0.3$  m,  $h_{r1}=0.065$  m,  $h_{r2}=0.04$  m 일 때 음압레벨 차의 실험치(가는실선)와 이론적 예측치(굵은 실선)를 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 결과가 잘 일치하며 유동 비저항 값은 수평 배열일 경우와 마찬가지로 5,000 cgs rayl/m 일 때 가장 잘 일치하였다.

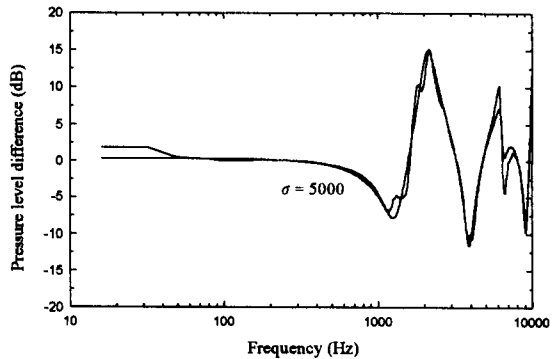


Fig. 5 Comparison of predicted sound spectrum (thick line;  $\sigma=5,000$  cgs rayl/m) with results (thin line) measured over asphalt for source height 0.3 m, receiver heights 0.065 and 0.04 m respectively. A loud speaker and the two microphones are positioned on the same vertical line.

Fig. 6은 수평입사법(음원 높이  $h_s=0.4$  m, 수음점 높이  $h_{r1}=0.4$  m,  $h_{r2}=0.04$  m, 음원과 수음점 간의 거리  $d=2.5$  m)을 이용하여 진흙 땅에 대한 유동저항을 예측한 것이다. 유동비저항 값이 8,000 cgs rayl/m 일 때 음압레벨 차의 측정치(가는 실선)와 이론치(굵은 실선)가 가장 잘 일치하였다. 진흙 땅의 유동 비저항 값이 아스팔트인 경우보다 더 높게 나온 것은 진흙 땅은 미세한 입자들로 이루어져 있고 잘 다져져 있어 입자들 사이에 공기 틈이 거의 없기 때문인 것으로 보인다.

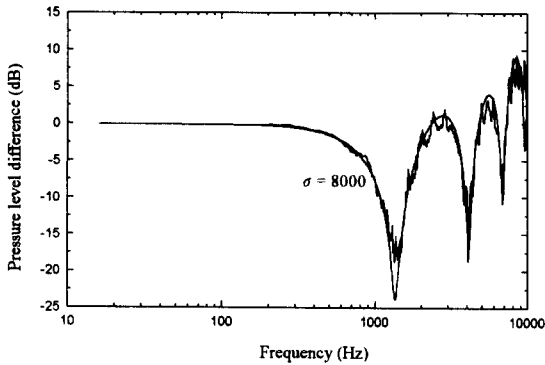


Fig. 6 Comparison of predicted sound spectrum( thick line;  $\sigma=8,000$  cgs rayl/m) with results(thin line) measured over clay soil for the configuration of source and receiver heights( $h_s=h_{r1}=0.4$  m,  $h_{r2}=0.04$  m) and distance apart( $d=2.5$  m).

같은 방법으로 흙, 모래, 초지등에 대하여 측정한 결과, 흙 지표면은 유동 비저항이 3,000 cgs rayl/m, 모래는 300 cgs rayl/m 그리고 초지(잔디)의 경우는 400 cgs rayl/m일 때 예측치와 측정치가 가장 잘 일치하였다. 흙의 경우는 비교적 굵은 입자들로 구성되어 있어서 진흙에 비하여 공기 틈새가 많으므로 유동저항이 낮은 값을 가지며, 모래와 초지의 경우는 구성입자들 사이에 공기 틈새가 상당히 많으므로 기공률이 높아서 유동 비저항이 더 작은 값을 갖게 된다.

Fig. 7은 수평입사법(음원 높이  $h_s=0.47$  m, 수음점 높이  $h_{r1}=0.47$  m,  $h_{r2}=0.05$  m, 음원과 수음점 간의 거리  $d=2.5$  m)을 이용하여 자갈로 덮인 자갈 지표면에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 그림에

서 볼 수 있듯이 실험치와 예측치가 1 kHz 이상의 주파수 범위에서 비교적 큰 차이가 나는데 이것은 앞서의 경우는 지표면이 비교적 평탄한데 비해 자갈 지표면은 그 표면이 울퉁불퉁하여 불규칙하며, 음의 산란 등이 실험치에 큰 영향을 미친 것 때문으로 판단된다.

자갈밭에 대한 유동 비저항 값을 결정하기에는 측정값의 산란이 심하고, 이들 산란이 고주파수로 갈수록 심하게 나타나므로 측정값의 최소·최대값 첫 부분을 비교적 가장 잘 기술하는 예측치를 비교하여 유동 비저항을 2,000 cgs rayl/m로 예측하였다.

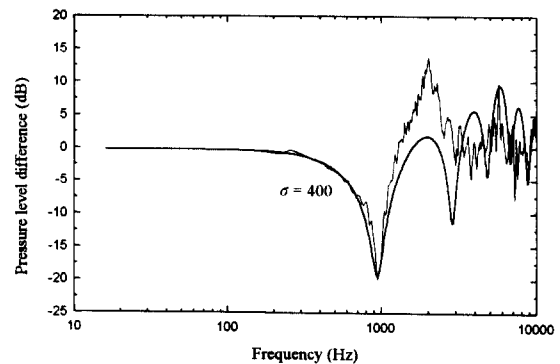


Fig. 7 Comparison of predicted sound spectrum( thick line;  $\sigma=2,000$  cgs rayl/m) with results(thin line) measured over gravel ground for the configuration of source and receiver heights( $h_s=h_{r1}=0.47$  m,  $h_{r2}=0.05$  m) and distance apart( $d=2.5$  m).

다음은 밭 작물의 대표적인 배추밭에서 실험하였다. 배추는 수확기에 접어든 상태였기 때문에 완전히 성장되었으며 평균 높이는 0.45 m였다. 이들에 대한 음압레벨 차의 측정값과 예측값을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 수평입사법에 의한 측정(음원의 높이  $h_s=1$  m, 수음점의 높이  $h_{r1}=1$  m,  $h_{r2}=0.7$  m 그리고  $d=3$  m) 결과 그림에서 보듯이 측정값에 산란이 심하게 나타나고 있어 정확한 평가를 하기가 곤란하다. 이러한 이유는 역 삼각형 모양의 배추들이 한 고랑씩 심어져 있으므로 실제로 지표면을 배추로만 구성된 균일한 상태로 보기가 어렵다. 또한 배추 밑에서 음이 일부 흡수되거나 반사되며, 투과된 입사음이 흙에서 다시 반사되

는 이중 반사의 형태가 되므로 이론식을 적용하기가 어렵다. 따라서 정확한 유동 비저항 값의 산출은 어려운 상황이지만 실험치의 첫 번째와 두 번째 최대치가 이론적 예측치와 가장 잘 일치하는 경우를 기준으로 적용한 결과 200 cgs rayl/m로 평가되었다.

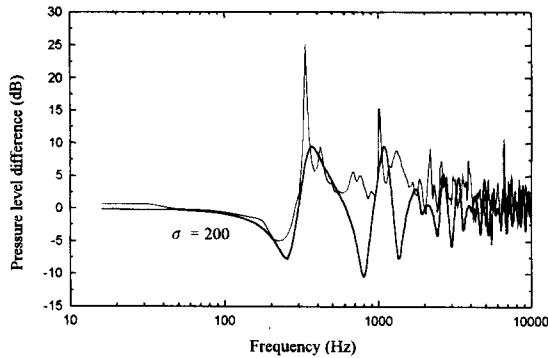


Fig. 8 Comparison of predicted sound spectrum (thick line;  $\sigma=200$  cgs rayl/m) with results (thin line) measured over cabbage ground for the configuration of source and receiver heights ( $h_s=h_{r1}=1$  m,  $h_{r2}=0.7$  m) and distance apart ( $d=3$  m).

지금까지 몇가지 대표적인 지표면의 상태에 대하여 음압레벨 차 방법으로 측정된 유동 비저항 값을 정리하면 Table 1과 같다.

#### 4. 결론

음압레벨 차이 방법을 사용하여 몇가지 대표적인 지표면에 대해 유동 비저항을 도출하였다. 확성기와 마이크로폰을 수평으로 설치하는 일반적인 수평배열법과 수직으로 유지하는 수직배열법으로 구한 몇가지 지표면에 대한 유동 비저항은, 포장한 지 6개월 경과한 아스팔트가 5,000 cgs rayl/m, 진흙 땅이 8,000 cgs rayl/m, 일반적인 흙이 3,000 cgs rayl/m, 모래가 300 cgs rayl/m, 자갈 밭이 2,000 cgs rayl/m, 초지가 400 cgs rayl/m 그리고 배추 밭이 200 cgs rayl/m인 것으로 예측되었다. 지표면의 상태가 비교적 평탄한 아스팔트나 흙의 경우는 측정치가 안정된 값을 나타냈지만 자갈이

나 배추밭과 같이 울퉁불퉁한 경우는 측정값에 산란이 심하여 좀 더 보강이 필요할 것으로 사료된다.

Table 1 Estimated values of flow resistivity for various ground state.

Description of surface	Flow Resistivity (cgs rayl)
"Clean" Asphalt	5,000
Cement road	30,000
Clay soil	8,000
Earth	3,000
Sand	300
Gravel	2,000
Grass	400
Cabbage field	200

#### 참고문헌

- (1) Chessell, C. I., 1977, "Propagation of Noise Along a Finite Impedance Boundary," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 62, pp. 825-834.
- (2) Hess, H. M., Attenborough, K., and Heap, N. W., 1990, "Ground Characterization by Short-Range Propagation Measurements," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 87, pp. 1975-1986.
- (3) Attenborough, K., 1985, "Acoustical Impedance models for outdoor ground surface," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 99, pp. 521-544.
- (4) Delany, M. E. and Bazley, E. N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials," Appl. Acoust. Vol. 3, pp. 105-116.
- (5) Van Wyk, K. D., Bolton, J. S., Mem., INCE, and Sherman, P. J., 1992, "The Use of a Single-Parameter Model to Characterize the Condition of Asphalt Surfaces," Noise Control

Engineering Journal Vol. 38, pp. 39-50.

- (6) 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.
- (7) Attenborough, K., 1994, "A Note on Short-Range Ground Characterization," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 95, pp. 3103-3108.
- (8) 황철호, 정성수, 1997, "지표면에 의한 음의 초과 감쇠 특성 연구," 한국소음진동공학회지 제 7권 제 3호, pp. 401-409.
- (9) 김동일, 강병용, 장호경, 김예현, "지표면 임피던스에 의한 소음의 초과감쇠에 대한 연구," 한국음향학회지 제 13권 제 5호, pp. 5-14.