

< 본 문 >

등속 이동 음원의 통과소음 스펙트럼 추정에 관한 연구

임 병 덕[†] · 김 덕 기^{*}

(2005년 4월 8일 접수, 2005년 11월 11일 심사완료)

Spectral Estimation of the Pass-by Noise of an Acoustic Source

Byoung-Duk Lim and Deok-Ki Kim

Key Words : Moving Acoustic Source(이동음원), Pass-by Noise(통과소음), Spectral Estimation(스펙트럼 추정)

Abstract

The identification of a moving noise source is important in reducing the source power of the transport systems such as airplanes or high speed trains. However, the direct measurement using a microphone running with noise source is usually difficult due to wind noise, while the source motion distorts the frequency characteristics of the pass-by sound measured at a fixed point. In this study the relationship between the spectra of the source and the pass-by sound signal is analyzed for an acoustic source moving at a constant velocity. Spectrum of the sound signal measured at a fixed point has an integral relationship with the source spectrum. Nevertheless direct conversion of the measured spectrum to the source spectrum is ill-posed due to the singularity of the integral kernel. Alternatively a differential equation approach is proposed, where the source characteristics can be recovered by solving a differential equation relating the source signal to the distorted measurement in time domain. The parameters such as the source speed and the time origin, required beforehand, are also determined only from the frequency-phase relationship using an auxiliary measurement. With the help of the regularization method, the source signal is successfully recovered. The effects of the parameter errors to the estimated frequency characteristics of the source are investigated through numerical simulations.

1. 서 론

자동차, 철도차량, 항공기 등의 교통기관이 운행 중 발생시키는 소음, 진동의 특성은 정지 상태와 다른 경우가 대부분이다. 교통기관 소음의 음원대책을 위해서는 음원특성을 알아야 하는데 실험실 규모의 측정시험만으로는 이러한 소음의 실제 상황을 충분히 파악하기 어려울 수가 있다.

이동음원으로부터 발생하는 소음을 음원과 함께 움직이는 마이크로폰으로 측정할 수도 있겠으나 외부소음일 경우 속도가 증가하면 마이크로폰을 지나가는 공기유동에 의한 잡음으로 인해 측정대상 소음의 특성을 파악하기 곤란하다. 반면에 현재까지 사용되고 있는 통과소음 측정방식으로는 음원의 스펙트럼이 왜곡되어 나타나므로 상세한 음원 특성을 알기 어렵다. 이는 이동음원의 속도가 커질수록 더 현저해서 고속전철과 같이 빠른 음원에서는 상당한 주파수 차이가 나는 조화파 성분도 구분하기 어려워 질 수 있다. 철도차량의 경우 제레식 열차의 속도는 Mach수 약 0.11 정도이며 고속전철의 Mach수는 0.3 정도이므로 수십 m 정도의 거리에서 측정된 음압신호는 상당한 주파

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
E-mail : bdlim@yu.ac.kr
TEL : (053)810-2571 FAX : (053)810-4627

^{*} 영남대학교 대학원 기계공학과

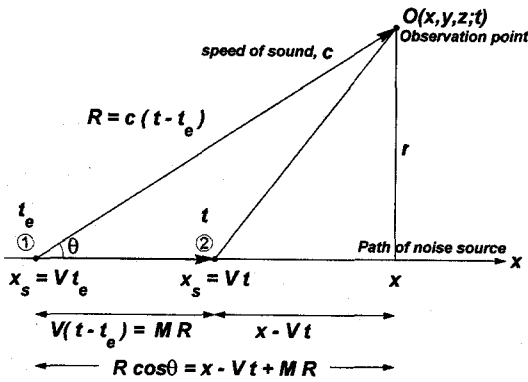


Fig. 1 Geometric relations between source and observer

수 변조와 진폭의 급격한 변화를 수반한다. 통과소음 신호에서 단위시간당 에너지가 가장 클 때는 열차와 관측점의 거리가 가까울 때이지만 유감스럽게도 이 영역에서 위상의 변화가 가장 크므로 주파수 특성은 매우 심하게 왜곡된다. 한편 거리가 충분히 먼 곳에서는 도플러 효과만큼 일정한 주파수 천이를 나타내지만 에너지가 적어서 잡음 등의 외란효과에 따라 추정치가 부정확해질 수 있다.

본 연구에서는 계측된 통과소음으로부터 음원 신호의 특성을 추정하기 위해 시간 영역에서 음장신호를 역변환하는 방법을 제안하였다. 이는 도플러 역변환을 통해 음장의 파동방정식을 1계 상미분방정식의 형태로 간략화 하는 방법으로서, 그 과정에 필요한 음원의 이동속도와 관측점의 위치 등의 매개변수를 추정하는 방법도 제시하였다. 또한 그 추정오차가 신호복원에 미치는 효과를 고찰하였다.

2. 등속 이동 음원의 특성

2.1 음원, 방사시점, 관측점간의 기하학적 관계
 등속으로 이동하는 점음원의 이동경로와 떨어진 고정된 위치에서 관측된 음장은 음원의 운동으로 인해 시간에 따라 특성이 계속 변한다. 정지된 관측점에서 이동음원으로부터 방사되는 소음을 관찰하는 가장 간단한 사례는 Fig.1에 보이는 바와 같이 정상 점음원(stationary point source)

이 직선 경로를 따라 속도 V 의 등속으로 움직이는 경우이다. 이동음원의 속도 V 가 음속보다 작은 경우 직선 경로를 x 축이라 하고 관측점으로부터 직선 경로까지의 거리를 r 이라 하자. 관측점의 x 좌표를 변수 x 로 정의하고 이동음원이 관측점으로부터 최단거리위치를 통과하는 시각을 시간원점 $t=0$ 으로 하면, Fig.1과 같이 기하학적 관계로부터 관측되는 신호를 알 수 있다.^(1,2) 음원이 V 의 속도로 이동하면서 시각 t_e 에 위치 ①에서 방사한 소리는 거리 R 을 음속 c 로 진행하여 $t=t_e+R/c$ 인 시각 t 에 관측점 O 에 도달한다. 이 시각 t 에 음원은 ①지점으로부터 R/c 시간 동안 $R/c V = MR$ ($M=V/c$ 는 Mach수)의 거리를 이동하여 ②의 지점까지 이동하게 된다.

음원의 속도가 음속보다 작은 아음속(subsonic)의 경우에는 기하학적 관계로부터 다음과 같이 R 을 유도할 수 있다. 먼저, 피타고라스 정리에 따라 $R^2 = (x - Vt + MR)^2 + r^2$ 의 R 에 관한 2차 방정식을 얻는다. 근의 공식으로부터 R 은 다음과 같다.

$$R = \frac{M(x - Vt) + R_1}{1 - M^2} \tag{1}$$

x : 관측점의 좌표

t : 관측시각

여기서, R_1 은 다음과 같이 정의한다.

$$R_1 = \sqrt{(x - Vt)^2 + (1 - M^2)r^2} \tag{2}$$

R_1 과 R 의 관계는, 위의 식으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$R_1 = R(1 - M \cos \theta) \tag{3}$$

2.2 이동음원에 의한 음장의 파동방정식과 해
 음원의 세기(source strength) $q(t)$ 의 점음원이 x 축 상을 V 의 속도로 이동할 때 그 음원밀도함

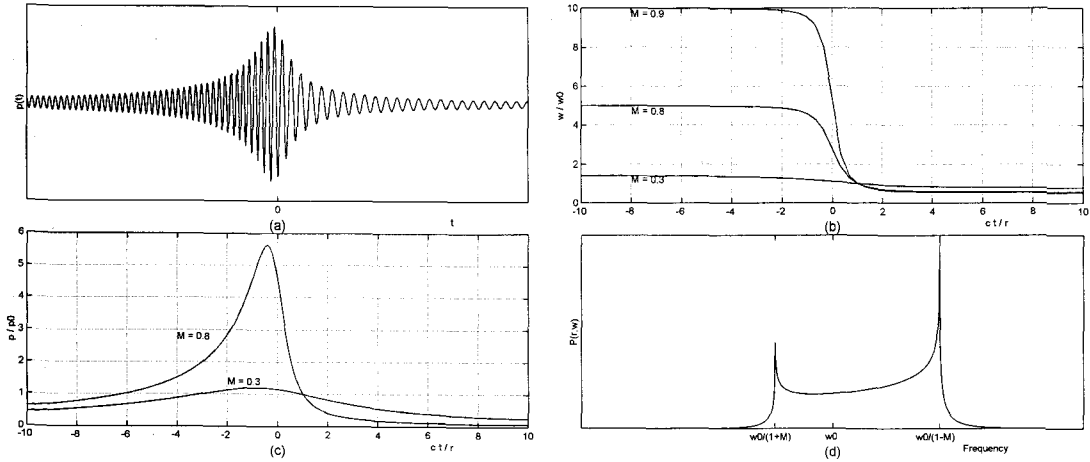


Fig. 2 Characteristics of the pass-by noise from a harmonic moving source (a) Observed signal, $M = 0.3$ (b) Normalized instantaneous frequency (c) Normalized amplitude (d) Amplitude spectrum (w_0 : source frequency)

수(source density function)는 다음과 같다.

$$Q(\mathbf{r}, t) = q(t)\delta(x - Vt)\delta(y)\delta(z) \quad (4)$$

여기서, δ 는 Dirac delta function

이동음원으로부터 발생하는 음장의 파동방정식은 velocity potential ψ 와 음압 p 의 관계, $p = -\frac{\partial\psi}{\partial t}$ 로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla^2\psi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} \\ = -q(t)\delta(x - Vt)\delta(y)\delta(z) \end{aligned} \quad (5)$$

위의 비정상음원(non-stationary source)에 관한 식을 좌표변환을 통하여 정상음원(stationary source)에 관한 식으로 바꾸면 음원의 속도가 음속보다 작은 경우($M < 1$)에 관측되는 velocity potential은 $x=0$ 을 대입하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{r}, t) &= \frac{q(t_e)}{4\pi R_1} \\ &= \frac{q(t_e)}{4\pi R(1 - M\cos\theta)} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $q(t_e)$ 는 방사된 시각기준의 음원신호이다. $t_e = t - R/c$ 이고, R 은 t 의 함수이므로 $q(t_e)$ 는 t 의 함수이다. 음압은 $p = \partial\psi/\partial t$ 의 관계로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial\psi}{\partial t} &= \frac{q'(t - R/c)}{4\pi R_1} \left(1 - \frac{1}{c} \frac{dR}{dt}\right) \\ &\quad - \frac{q(t - R/c)}{4\pi R_1^2} \frac{dR_1}{dt} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{c} \frac{dR}{dt} = -\frac{M\cos\theta}{1 - M\cos\theta}$$

$$\frac{dR_1}{dt} = -\frac{V(x - Vt)}{R_1} = -\frac{VR(\cos\theta - M)}{R_1}$$

그러므로

$$\begin{aligned} p &= \frac{q'(t - R/c)}{4\pi R(1 - M\cos\theta)^2} \\ &\quad + \frac{q(t - R/c)V(\cos\theta - M)}{4\pi R^2(1 - M\cos\theta)^3} \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 관측신호의 시간적 특성

Fig. 2(a)는 음원이 $q_0 e^{i\omega_0 t_e}$ 의 조화음원(harmonic

source) 일 때, 음원의 Mach수 $M=0.3$ 인 경우에 정지 위치에서 관측되는 음압의 simulation 결과로서, 관측되는 신호의 주파수는 음원이 관측점으로 다가올 때는 음원의 실제 주파수보다 높게, 멀어질 때는 낮게 나타나며 이들 주파수는 다음의 관계로부터 도플러 효과임을 쉽게 알 수 있다.

$$\omega = \frac{d\phi}{dt} = \omega_0 \left(1 - \frac{1}{c} \frac{dR}{dt}\right) = \frac{\omega_0}{1 - M \cos \Theta} \quad (8)$$

여기서, ϕ 는 신호의 위상이며, 주파수와 위상의 일반적인 관계 $\phi = \omega t$ 로부터 유도되었다.

Fig. 2(b)는 관측점에서 관측되는 음원의 주파수를 측정시각별로 보인 것으로서 실제의 주파수는 음원이 관측점 정면을 통과한 후 나타나며 이 시간은 Mach수와 무관하게 $t = r/c$ 임을 알 수 있다. Fig. 2(c)는 시간에 따라 관측점에서 관찰되는 음파의 진폭을 보인 것이며 최대진폭은 음원이 정면을 통과하기 전에 나타남을 알 수 있다.⁽¹⁾

2.4 관측신호의 주파수 특성

음원의 운동으로 인해 음원의 주파수 특성이 관측점에서 측정된 음압의 주파수 특성으로 어떻게 왜곡되는가를 살펴보기 위해 주파수 특성이 시불변인 정상음원 신호 $q(t)$ 의 푸리에변환을 $Q(\omega)$ 라 하면 관측시각 t 에 대한 음장의 파동방정식의 푸리에변환은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 P + k^2 P = \frac{i\omega}{2\pi V} \left[\int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) e^{-i\xi t} d\xi \right]_{t=x/V} e^{i\omega \frac{x}{V}} \delta(y) \delta(z) \quad (9)$$

이 방정식은 x 축 상에 놓인 선음원으로부터 방사되는 음장의 방정식으로 볼 수 있으며 2차원 Green 함수를 사용하면 방정식의 해는 다음과 같다.

$$P(\omega) = \frac{\omega}{8\pi V} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) H_0^{(1)}(kr) e^{-i(\xi-\omega) \frac{x}{V}} d\xi \quad (10)$$

여기서, $H_0^{(1)}(kr)$ 는 0차의 Hankel 함수이며 k 는

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\omega-\xi}{V}\right)^2 = k^2 - \left(\frac{\omega-\xi}{V}\right)^2 \quad (11)$$

가장 간단한 경우로 $q(t) = q_0 e^{i\omega_0 t}$ 의 조화음을 생각하면 관측점 음압신호의 푸리에변환은 다음과 같다.

$$P(x, r, \omega) = \frac{\omega q_0}{16\pi V} H_0^{(1)}(kr) e^{i(\omega-\omega_0) \frac{x}{V}} \quad (12)$$

$$k^2 = \frac{M^2 - 1}{V^2} \left(\omega - \frac{\omega_0}{1-M}\right) \left(\omega - \frac{\omega_0}{1+M}\right) \quad (13)$$

$M < 1$ 일 때 $\frac{\omega_0}{1+M} \leq \omega \leq \frac{\omega_0}{1-M}$ 의 범위에

서 $k^2 \geq 0$ 이며 $H_0^{(1)}$ 은 허수에 대해서는 지수적으로 감소하므로 $P(0, r, \omega)$ 는 Fig. 2(d)와 같은 대역한정된 스펙트럼을 보이게 된다. Fig. 2(d)는 관측신호를 푸리에변환하여 얻은 것이며 이론적으로는 피크의 두 주파수에서 무한대의 크기를 갖는다. 피크의 두 주파수를 찾을 수 있다면 다음과 같이 음원의 실제 주파수를 찾을 수 있다.

$$\frac{2}{\frac{1}{\omega_L} + \frac{1}{\omega_H}} = \frac{2}{\frac{1}{\omega_0} + \frac{1}{\omega_0}} = \omega_0 \quad (14)$$

하지만 이것은 단일 주파수의 음원일 경우만 가능하다. 두 개 이상의 주파수일 경우에는 도플러 상·하한 주파수의 중첩에 의한 왜곡으로 피크를 찾는 것이 불가능하다.

3. 관측신호로부터 음원신호 추정

3.1 주파수 추정과 시간영역에서의 복원

관측신호로부터 음원신호의 주파수를 복원하는 직접적인 방법은 주파수영역에서 관측신호의 스펙트럼 $P(\omega)$ 와 음원신호의 스펙트럼 $Q(\xi)$ 사이의 적분식을 수치적분의 형태로 변형하여 음원신호의 스펙트럼 $Q(\xi)$ 를 추출하는 것이다. 그러나

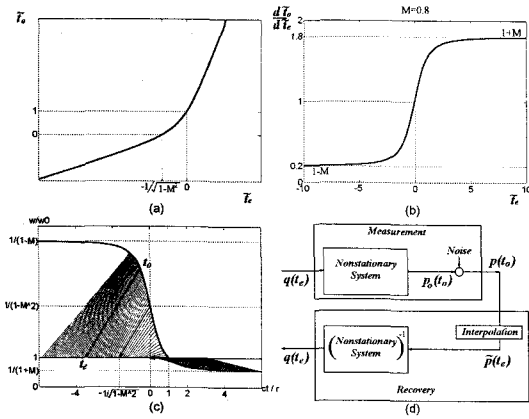


Fig. 3 Relationship between the source time T_e and the observer time T_o (here $t_o = t$) (a) observer time T_o as a function of T_e (b) rate of the change of T_o with respect to T_e (c) instantaneous frequency of the observed signal as a function of the source displacement (or equivalently the source time) (d) block diagram of the source signal recovery system

이 방법으로는 Hankel 함수로 구성된 계수행렬의 특이성 때문에 음원신호복원에 실패하였다.

본 연구에서는 음원신호와 관측된 음압신호 사이의 미분방정식을 사용하여 시간영역에서 음원신호를 복원하고자 하였다. 관측신호와 음원신호 사이의 관계식을 음원에서 방사되는 신호 q 에 대한 미분방정식의 형태로 다시 쓰면 다음과 같이 방사시각 t_e 를 독립변수로 하는 1계 상미분방정식이 된다.

$$q' + \tilde{a}q = \tilde{b}\tilde{p} \tag{15}$$

$$\tilde{a} = \frac{V \left(\frac{x - Vt_e}{\sqrt{(x - Vt_e)^2 + r^2}} - M \right)}{\sqrt{(x - Vt_e)^2 + r^2} \left(1 - M \frac{x - Vt_e}{\sqrt{(x - Vt_e)^2 + r^2}} \right)} \tag{16}$$

$$\tilde{b} = 4\pi \sqrt{(x - Vt_e)^2 + r^2} \left(1 - M \frac{x - Vt_e}{\sqrt{(x - Vt_e)^2 + r^2}} \right)^2 \tag{17}$$

$$\tilde{p}(t_e) \Leftarrow p(t_e + R/c) \tag{18}$$

관측신호 $p(t)$ 는 관측자 시각에서 등간격의 시간마다 샘플링된 신호지만, 이 미분방정식은 방사시각 t_e 에 대한 식이므로 관측신호 $p(t)$ 를 $\tilde{p}(t_e)$ 로 변환해야 한다. 관측시각 t 와 방사시각 t_e 의 관계로부터 $\tilde{p}(t_e)$ 의 샘플이 등간격이 되도록 보간변환할 수 있다. Fig. 3(a)는 방사시각과 관측시각의 관계를 보인 것이며 Fig. 3(b)는 방사시각에 대한 관측시각의 변화율을 보인 것이다. Fig. 3(c)는 관측시각에서 방사시각으로의 보간변환을 주파수의 관점에서 보인 것이다. Fig. 3(d)는 음원신호의 관측 및 복원시스템을 도식화한 것이다.

시간영역에서의 음원신호복원을 위해서는 음원의 이동속도, 관측시각원점이 매개변수로 필요하다. 이러한 매개변수는 관측신호 자체의 특성이므로 관측신호만으로부터 정보를 얻는 방법을 고려하였다. 음원의 이동속도는, 하나의 관측신호와 음원의 이동경로에 평행하게 이동된 위치에서 측정된 또 다른 관측신호와의 위상차를 이용하여 얻었다. 그리고, 음원신호에 지배적인 주파수 성분이 존재할 때 그 상.하한주파수로부터 관측시각원점에 대한 정보를 추정할 수 있었다. 관측시각원점은 미분방정식의 해법에서 경계조건에 대한 정보를 주는 매개변수이다.

주어진 미분방정식은 1계 상미분방정식이므로 일반해가 다음과 같이 알려져 있다.

$$q(t_e) = e^{-h} \left[\int e^{h\tilde{b}\tilde{p}} dt_e + c \right] \tag{19}$$

$$h = \int \tilde{a}(t_e) dt_e$$

미분방정식의 해법으로서 일반해에 포함된 적분식을 수치적분하는 방법과 유한차분법을 사용하였다. 수치적분에 의한 신호복원 결과는 오차의 누적으로 인해 무의미한 저주파성분이 크게 나타나므로 신호에 대해 선형적인 정보가 주어지지 않으면 음원신호를 복원하기 곤란하였다. 유한 차분법에서는 정밀도를 높이기 위해 Richardson의삼법을 병용하였으며 수치적분의 경우와 같은 저주파성분이 발생하지는 않았으나 방사시각 0부근에서 계수행렬의 대각요소에 급격한 변화가 있는데, 이 때문에 해의 안정성이 나빠졌

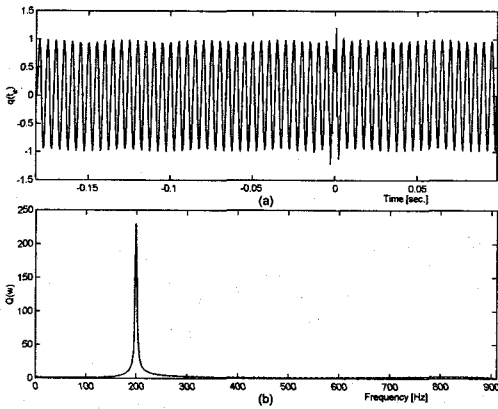


Fig. 4 Restoration of the harmonic source signal with single frequency component by FDM (a) restored source signal (b) its spectrum

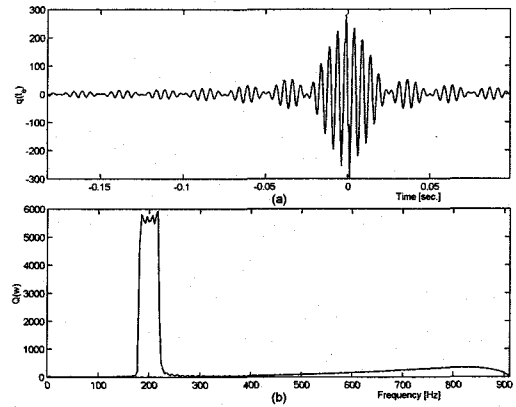


Fig. 6 Restoration of band limited source signal by FDM (a) restored source signal (b) its spectrum

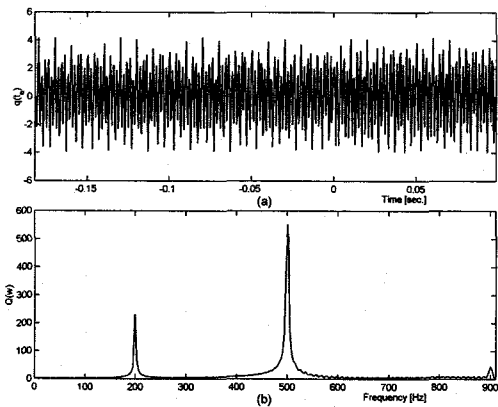


Fig. 5 Restoration of the harmonic source signal with two frequency components by FDM (a) restored source signal (b) its spectrum

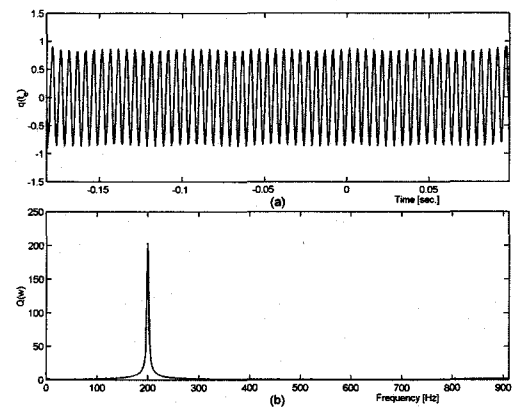


Fig. 7 Restoration of the harmonic source signal with single frequency component by FDM with regularization (a) restored source signal (b) its spectrum

다. 이러한 문제점을 극복하는 방법으로서, 계수 행렬의 조건수(condition number)를 낮추어 해의 안정성을 향상시키기 위해 계수행렬의 대각요소에 양(+)의 작은 값 σ 을 더해주는 정규화 방법을 도입하였다. 정규화 매개변수 σ 의 값은 경험적으로 부여하였는데, 신호대잡음비(SNR)가 낮아짐에 따라 점점 더 큰 σ 값이 요구됨을 알 수 있었다.

3.2 전산기 모의 복원 실험

시간영역에서의 복원방법을 다음과 같이 정현파와 대역한정신호에 대해서 전산기 모의 복원 실험에 적용하였다.

Fig. 4는 단일 주파수 성분을 가지는 음원신호에 대한 모의복원실험 결과이다. 전체적으로는 원래의 음원신호와 유사하게 복원되었지만 방사시각 0부근에서 고주파 성분이 발생되었다. Fig. 5는 두개의 주파수 성분을 갖는 음원신호에 대한 모의복원실험 결과이다. 마찬가지로 0부근에서 고주파 성분이 발생된다. Fig. 6은 대역 한정 음원신호에 대한 모의복원실험 결과이다. 역시 0부근에서 고주파 성분이 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 7은 단일 주파수 성분을 갖는 음원신호에 대한 유한차분법 정규화에 의한 모의복원실험 결과이다. 그림의 시간신호에서 보듯이 방사시각 0

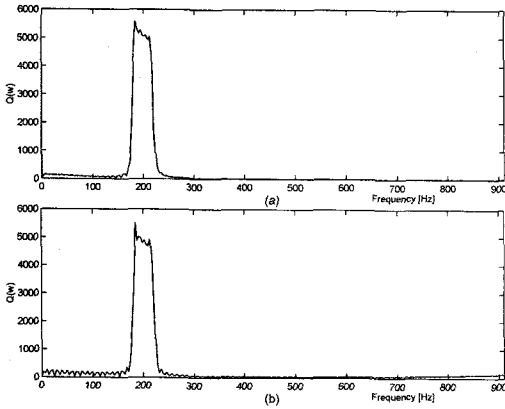


Fig. 8 Effect of velocity error in restoration (a) +3% error (b) -3% error

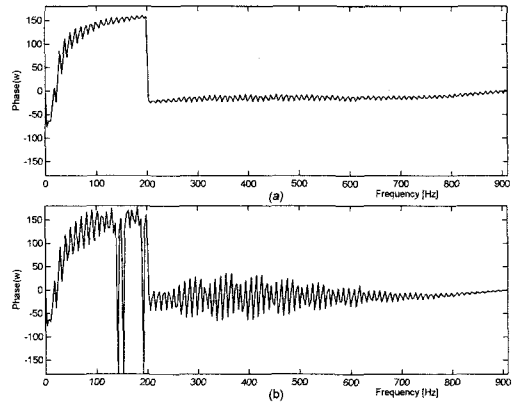


Fig. 10 Effect of time origin estimation error (in a point of the phase) (a) +30% error (b) -200% error

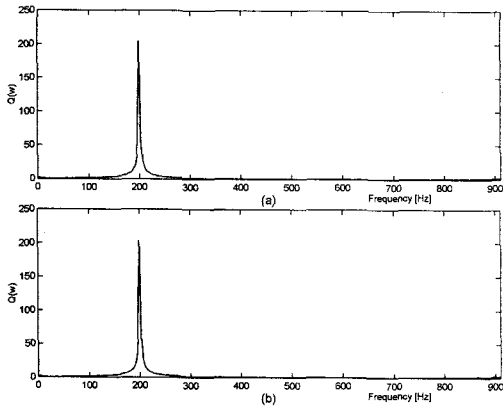


Fig. 9 Effect of time origin estimation error (in a point of magnitude) (a) +30% error (b) -10% error

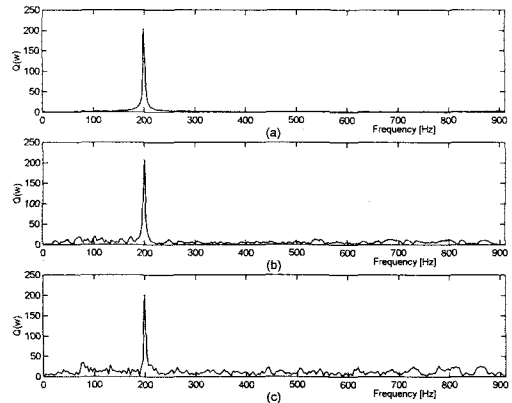


Fig. 11 Effect of the measurement noise (a) SNR=20dB (b) SNR=10dB (c) SNR=7dB

부근에서 나타나던 고주파 성분은 사라졌으며, 비교적 양호한 복원신호를 얻을 수 있었다.

신호복원에는 음원의 이동속도와 관측시각원점의 매개변수를 필요로 하여 이를 관측신호로부터 추정하였다. 음원의 이동속도를 얻기 위해서 관측신호와 음원의 이동경로에 평행하게 이동된 위치에서 측정된 또 다른 관측신호와와의 위상차를 이용하였으며, 관측시각원점은 관측신호의 시간-주파수 해석에서 도플러 상-하한 주파수를 추정하여 음원신호와 관측신호의 주파수비에 관한 식에서 보간하였다. 매개변수의 추정 오차에 대한 효과를 살펴보기 위해 매개변수에 의도적인 오차를

주어 전산기 모의 복원 실험을 하였다. 결과는 음원의 이동속도를 실제보다 빠르게 추정하면 복원된 신호의 주파수 특성은 전체적으로 낮은 주파수 영역으로 이동되고, 느리게 추정하면 반대로 높은 주파수 영역으로 이동한다. 이러한 주파수 천이현상은 고주파일수록 두드러지게 나타났다. 또한, 실제이동속도보다 느리게 추정하는 것이 빠르게 추정하는 것에 비해 신호복원에 더 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 8은 중심주파수 200Hz, 대역폭비 0.1인 대역 한정 음원신호에 대해서 이동속도 추정오차를 각각 (a) +3%, (b) -3%로 하였을 때 복원되는 신호의 스펙트럼이다.

Fig. 9는 단일 주파수의 음원신호에 대해서 관측시각원점 설정에 각각 (a) +30%와 (b) -10%의 오차를 부여했을 때 복원되는 신호의 스펙트럼이다. 그림에서 보듯이 복원신호의 진폭스펙트럼은 설정오차에 전혀 무관한 것처럼 음원신호의 주파수 특성을 잘 나타내고 있다. 극단적으로 $\pm 200\%$ 의 설정오차에 대해서도 복원신호의 진폭스펙트럼은 거의 변하지 않았다. 하지만 복원신호의 위상 스펙트럼에는 설정오차의 영향이 분명히 나타난다. Fig. 10은 각각 (a) +30%, (b) +200%의 설정오차를 부여했을 때 복원되는 신호의 위상 스펙트럼이다. 만약 복원하고자 하는 음원신호의 위상에 대한 정보가 중요하다면 관측시각원점, 즉 음원이 최근접 위치를 통과하는 시각의 설정이 중요함을 알 수 있다.

실제 측정에서는 관측신호에 측정잡음이 섞이게 되는데, 음원신호 복원에 사용한 유한차분법이 측정 잡음에 대해서 어느 정도 유효한지 알아보기 위해 측정잡음이 섞인 관측신호로서 모의복원실험을 하였다. 모의복원실험에서는 측정잡음으로서 SNR = 20dB, 10dB, 7dB의 백색잡음을 사용하였다. Fig.11은 200Hz의 단일주파수 성분을 갖는 음원신호에 대하여 각각 (a) SNR 20dB, (b) SNR 10dB, (c) SNR 7dB 일 때 복원신호의 진폭스펙트럼을 나타낸 것이다. SNR 20dB의 백색잡음에 대해서는 복원신호로부터 음원신호의 주파수특성을 어느 정도 파악할 수 있으나, SNR 10dB이상의 백색잡음에 대해서는 복원신호의 주파수 특성이 좋지 않았다. 이러한 효과는 광대역 주파수 스펙트럼을 나타내는 음원신호를 복원할 경우 더욱 두드러질 것으로 예상된다.

4. 결 론

고정 관측점에서 측정하는 통과소음신호는 음원의 주파수 특성이 왜곡되어 나타나므로 상세한 음원 특성을 파악하기 어렵다.

본 연구에서는 교통기관 소음의 음원대책을 위해서 등속으로 이동하면서 정상신호를 방사하는 점음원에 대해서 고정된 관측점에서 측정되는 신호로부터 음원신호를 복원하는 방법을 제안하였다.

이동음원에 의한 음장의 파동방정식으로부터

관측신호의 스펙트럼은 Hankel 함수를 포함한 적분식으로 표현된다. 도플러 천이 상·하한 주파수에서 Hankel 함수의 특이성은, 이 적분 관계식으로부터 음원의 주파수 특성을 추정하기 어렵게 한다.

본 연구에서는 주파수 영역에서의 복원을 시도하는 대신에 음원신호와 음장신호 사이의 관계가 1계 미분방정식으로 주어진다는 점에 착안하여 시간 영역에서 음원신호를 복원하고자 하였다. 미분방정식과 관련된 매개 변수는 음원의 이동속도와 관측시각 원점이 있는데 별도의 계측에 의해 이러한 변수값들을 알아내는 대신에 본 연구에서는 음장신호의 위상특성으로부터 찾아내고자 하였다. 시각원점 부근에서 수치해의 악조건성을 극복하기 위해 정규화 방법을 도입한 결과 정상적인 음원신호를 복원할 수 있었다. 음원신호복원에 있어서 매개변수 추정오차가 미치는 영향과 측정 잡음의 영향을 조사하였다. 본 연구의 결과는 등속 운동하는 이동음원신호의 복원에 광범위하게 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국 21사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) Morse, P. M. and Ingard, U., 1968, "Theoretical Acoustics," McGraw-Hill, New York.
- (2) Lee, J. S., 1989, "Time-varying Filter Modeling and Time-Frequency Characterization of Non-Stationary Sound Field Due to a Moving Source," Ph. D. Dissertation, Univ. of Southampton, Southampton.
- (3) Felsen, L. B. and Marcuvitz, N., 1973, "Radiation and Scattering of Waves," Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- (4) Morse, P. M. and Feshbach, H., 1953, "Methods of Theoretical Physics," McGraw-Hill, New York.
- (5) Papoulis, A., 1977, "Signal Analysis," McGraw-Hill, New York.