

TDOA 기법을 이용한 소음원 위치파악에 관한 연구

Experimental Studies for Noise Source Positioning Using TDOA Algorithm

이 육† · 최 종 수*

Wook Rhee, Jong-soo Choi

Key Words : Source Positioning (소음원 위치파악), TDOA (Time Difference of Arrival, 도달 지연시간), Measurement of TDAO (도달 지연시간 측정), Moving Sound Source (움직이는 소음원)

ABSTRACT

Time Difference of Arrival (TDOA) algorithm was applied to sound source positioning. Using measured microphones signal, difference of distance from source to sensors were estimated by TDOA and speed of sound, and taken by navigational measurements. And iteration procedures were induced to find the actual source location. For the case of stationary and moving sound source, validation test were performed in the anechoic room. In the stationary case, the error of positioning is less than 1.3% in length scale, and it could be seen proper filtering processes were required in the application of moving sound source.

1. 서 론

도달 지연시간(Time Difference of Arrival, TDOA) 알고리즘은 GPS 항법 신호 처리용으로 적용되는 기법으로 복수개의 항법 측정신호의 도달시간차를 이용하여 위치를 측정하는 방법이다. 지구 경지궤도상에 위치한 다수의 인공위성을 활용하는 GPS 측정에서는 각 위성에서 발신된 신호를 수신점에서 측정하여 지연시간을 계산하고, 알고 있는 위성의 궤도상의 위치정보를 활용하여 관측자의 지구상의 위치를 계산하는 방식을 사용한다.⁽¹⁾ 이러한 위치 추적기법은 최근 휴대전화의 위치 추적에도 활용되고 있는데, 고정된 기지국의 위치정보와 휴대폰의 기지국별 수신신호를 사용하여 휴대전화의 위치를 계산하고 있다.

이러한 TDOA 알고리즘은 특정한 전파특성을 지니고 방사되는 음파에도 적용할 수 있는데, 특정 소음원에서 방사되는 음압신호를 복수개의 마이크로폰을 이용하여 측정하고, 이의 위상차 관계를 활용하여 소음원 위치파악에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 TDOA 알고리즘을 이용한 소음원 위치파악의 유용성을 검증하는데 그 목적이 있으며, 고정된 소음원과 이동하는 소음원에 대하여 수행한 실험을 통하여 측정기법의 정확성을 검증하였다.

2. TDOA 기법을 이용한 소음원 위치파악

2.1 기존의 소음원 위치추적기법과 TDOA 기법의 적용

소음원의 위치를 규명하기 위한 방법으로 인텐시티 프로브를 사용하거나 음향학적 반사판을 부착한 지향성 마이크로폰을 활용한 방법이 전통적으로 활용되어 왔으나 근래 연구에서는 다수의 마이크로폰을 활용한 범 형성기법이나 홀로그래피 기법을 활용하여 가상 음장 상에서의 음압분포를 도시화 하여 최대 음압을 내는 위치를 기준으로 소음원의 위치를 파악하는 방식이 보편화 되고 있는 추세이다.⁽²⁾⁽³⁾ 이러한 음장 가시화 기법의 경우 공간상에서 소음의 강도를 시각적으로 보여주기 때문에 사용자가 직관적으로 시험대상체에서의 소음원의 위치와 특성을 직관적으로 파악할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 하지만 다수의 마이크로폰을 활용하여야 정확한 분포를 얻을 수 있으며, 공간상의 가상 음장의 측정점에 대한 개별적 연산을 수행하여야 하므로 고가의 설비비용과 많은 계산시간을 필요로 하게 된다.

다음의 그림 1은 소음원 위치파악에 대한 TDOA 알고리즘의 적용을 정리한 것이다. 알려지지 않은 위치, (x_0, y_0, z_0) 상의 소음원에 대하여 n 개의 마이크로폰을 이용하여 발생 음압신호를 측정하는 경우, 각 측정점의 위치, (x_i, y_i, z_i) 에 대하여 소음원과 측정점사이의 거리, r_i 는 식(1)과 같이 계산되어 진다.

* 정회원, 충남대학교 대학원 항공우주공학과
E-mail : wookrhee@cnu.ac.kr
Tel : (042) 821-7774, Fax : (042) 860-9225

† 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

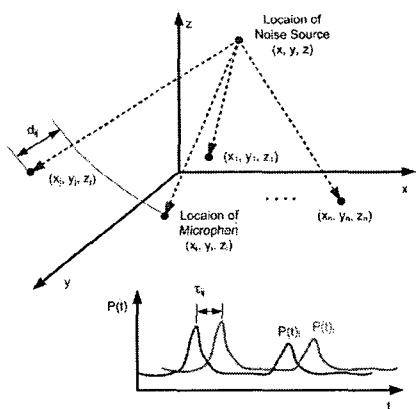


그림 1. Application of TDOA on Noise Source Localization

이때 임의의 두 측정점에 대하여 각 측정점과 소음원 사이의 거리의 차이, d_{ij} 는 식 (2)와 같이 정리되어지고, 이때 두 측정점 사이의 도달 지연시간, τ_{ij} 는 음속, c_0 와 식 (3)과 같은 관계를 지니게 된다.

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad (1)$$

$$d_{ij} = r_i - r_j \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &= |\vec{x} - \vec{x}_i| - |\vec{x} - \vec{x}_j| \\ &= \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} \end{aligned}$$

$$\tau_{ij} = \frac{d_{ij}}{c_0} \quad (3)$$

TDOA 알고리즘에서는 이러한 관계를 이용하는데, 시간에 따라 측정된 복수의 신호에 대하여 각 신호 조합간의 도달 지연시간, τ_{ij} 를 측정하면, 알고 있는 측정점의 위치와 음속의 관계에 의하여 미지의 소음원의 위치, (x, y, z) 를 결정하는 것이다.

2.2 마이크로폰 수신신호를 이용한 도달 지연시간 측정

본 연구에서와 같이 2개의 마이크로폰의 측정 데이터를 이용하여 이의 도달 지연시간을 측정하는 방법으로는 크게 두 가지 방법을 생각할 수 있는데, 두 신호의 Cross Correlation Function, $R_{ij}(\tau)$ 를 이용하는 방법과 두 신호의 Cross Spectrum의 Phase 관계, $\Theta_{ij}(f)$ 를 이용하는 방법이 있다. 전자의 경우 식 (4)와 같은 정의에 의하여 측정된 두

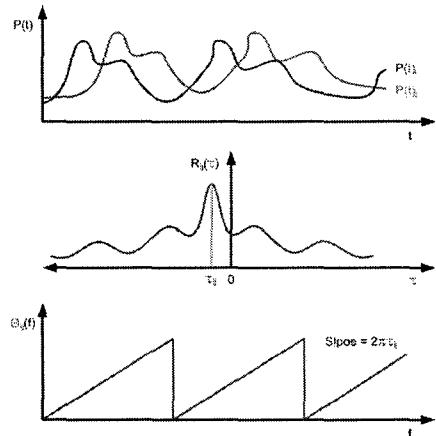


그림 2. Measurement of Time Difference of Arrival

신호에 대한 Cross Correlation Function을 지연시간, τ 의 함수로 구하게 된다. 이때 $R_{ij}(\tau)$ 가 최대가 되는 위치가 τ_{ij} 에 해당하므로, 계산 결과에 대한 Peak Detect를 이용하여 정확한 도달 지연시간을 구할 수 있다.

$$R_{ij}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P_i(\tau) P_j(t + \tau) dt \quad (4)$$

$$S_{ij}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (5)$$

또한 식 (5)로 정의되어진 Cross Spectrum에서의 위상각, Θ_{ij} 는 주파수, f 에 대한 함수로 구해지는데, 이 위상각의 주파수에 대한 기울기와 도달 지연시간의 관계에 의하여 τ_{ij} 를 결정할 수도 있다. 통상적으로 FFT 기반의 주파수 분석에서는 Cross Spectrum을 이용한 방법이 상대적으로 계산량이 작아 주로 사용되고 있지만 이의 경우 노이즈가 섞인 실제 신호에 대한 적용에 있어서 두 신호간의 선형적인 위상관계를 보기 가 힘들기 때문에 지연시간의 측정에 대한 적용에는 어려움이 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 따라서 본 연구에서는 TDOA 기법의 적용을 위하여 두 신호의 Cross Correlation Function을 이용하여 τ_{ij} 를 결정하는 방법을 사용하기로 한다.

2.3 테일러 급수를 이용한 소음원 위치추정

식(1)~(3)의 관계에 의하여 측정된 n 개의 마이크로폰 데이터를 이용할 경우, $\tau_{ij} = -\tau_{ji}$, $\tau_{ii} = 0$ 의 관계에 의하여 $n(n-1)/2$ 개 만의 독립적인 방정식을 얻을 수 있으며, 이의 연립방정식의 해를 통하여 미지의 소음원 위치, (x, y, z) 를 구할 수 있다. 하지만 식(2)의 비선형성에 의하여 직접해를 구할 수는 없기 때문에 참고문헌 (5)에서는 테일러 급수를 이용한 근사해를 구하는 방법을 소개하고 있으며, 본 연구에서

는 이를 활용한 반복계산을 통하여 이를 계산하였다. 다음은 이러한 계산절차를 정리한 것이다.

마이크로폰을 이용하여 측정된 도달 지연시간과 식 (3)에 의하여 측정점과 소음원 사이의 거리의 차이, d_{ij} 가 계산되어지는데 본 계산에서는 이를 항법 측정값 (Navigational Measurement)로 사용하였다. 이에 의하여 n 개의 마이크로폰을 이용하여 $n(n-1)/2=N$ 개의 항법 관계식, f_a 를 구할 수 있으며, i,j 번째 센서에 의한 f_a 는 다음과 같은 관계를 지닌다.

$$f_a(x, y, z, x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j) = u_a = (m_{ij})_a - e_a \quad (6)$$

$$a = 1, 2, \dots, N$$

u_a = Correct value of the Measurement

e_a = Error in the $(m_{ij})_a$ Measurement

이때 N 개의 측정값에 의하여 소음원의 위치를 결정하기 위해서는 각 측정점의 위치와 식 (6)을 이용하게 된다. 이때 오차는 $\langle e_a \rangle = 0$ 으로 가정하고, Noise Covariance Matrix, R 은 다음과 같아진다.

$$R = [r_{ab} RIGHE]e, \quad r_{ab} = \langle e_a e_b \rangle$$

소음원 위치에 대한 초기 가정치를 x_v, y_v, z_v 라 한다면, 실제 위치와는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$x = x_v + \delta_x, y = y_v + \delta_y, z = z_v + \delta_z$$

이를 2차항 이하의 테일러 급수로 정리하면 다음과 같다

$$f_{av} + c_{a1}\delta_x + c_{a2}\delta_y + c_{a3}\delta_z \simeq (m_{ij})_a - e_a$$

where, $f_{av} = f_a(x_v, y_v, z_v, x_i, \dots)$ $\quad (7)$

$$c_{a1} = |\partial f_a / \partial x|_{x_v, y_v, z_v}$$

$$c_{a2} = |\partial f_a / \partial y|_{x_v, y_v, z_v}$$

$$c_{a3} = |\partial f_a / \partial z|_{x_v, y_v, z_v}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{N1} & c_{N2} & c_{N3} \end{bmatrix} RIGHT \quad \delta = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} (m_{ij})_1 - f_{1v} \\ (m_{ij})_2 - f_{2v} \\ \cdot \\ (m_{ij})_N - f_{Nv} \end{bmatrix} \quad e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ e_N \end{bmatrix}$$

이를 행렬식 형태로 표시하면, 식(7)의 근사해는 다음과 같이 정리된다.

$$C\delta \cong z - e \quad (8)$$

여기에서 최소자승법을 적용하여 오차가 최소화되는 δ 를 결정하면,

$$\delta = [C^T R^{-1} A]^{-1} A^T R^{-1} z \quad (9)$$

가 되고, 이렇게 구해진 결과에 대하여 δ 가 0에 가까워질 때까지 반복계산을 수행하게 되며, 수렴조건을 만족시키지 못할 경우 다음 계산단계에서의 소음원 위치에 대한 가정치는 다음과 같이 사용한다.

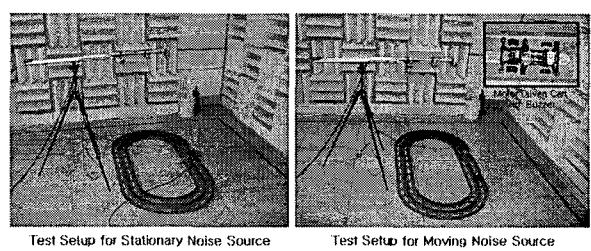
$$\begin{aligned} x_v &\leftarrow x_v + \delta_x \\ y_v &\leftarrow y_v + \delta_y \\ z_v &\leftarrow z_v + \delta_z \end{aligned} \quad (10)$$

본 연구에서의 계산에서는 수렴조건으로 $\delta \leq 10^{-6}$ 을 사용하였으며, R 은 e_a 가 동일 분산에 대해서는 독립적인 것으로 가정하여, $R = \sigma_a^2 I$ 로 사용하였다.

3. 실험을 통한 TDOA 기법의 유용성 검토

3.1 실험장치의 구성

소음원 위치 규명에 대한 TDOA 기법의 유용성을 확인하기 위하여 그림 3과 같이 정지되어 있는 경우와 이동하는 소음원에 대한 실험 장치를 본교 중형 무향풍동의 무향실 내부에 구성하고, 검증실험을 수행 하였다.



Test Setup for Stationary Noise Source Test Setup for Moving Noise Source

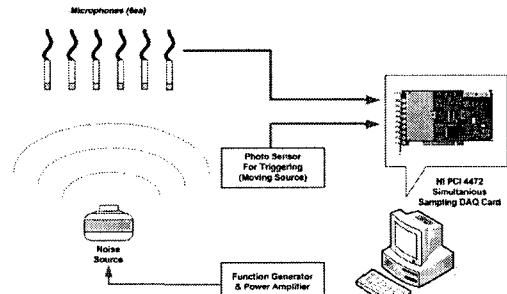


그림 3. Schematic Layout of Test Setup

정지되어 있는 소음원의 경우 특정위치에 함수발생기에 의하여 구동되는 Horn Drive를 위치하고 임의의 소음을 발생시켜 이의 위치를 계산할 수 있도록 하였다. 그리고 해당 시험공간상에서의 위치별 오차의 정도를 보기 위하여 Horn Drive의 위치를 옮겨가며 반복실험을 수행하였다. 또한 소음원이 움직일 경우 위치의 이동을 추적 할 수 있는지를 살펴보기 위하여 소형 모터로 구동되는 대차를 이용하여 일정 궤도상을 주행하도록 하고, 이의 발생소음을 측정하였다. 발생소음의 측정을 위해서는 6개의 압전소자 방식의 마이크로폰 (MG M360, 1/4", Free Field Type)을 사용하였으며 해당 신호는 PC에 설치된 동시 샘플링이 가능한 AD 변환기 (NI PCI-4472)를 활용하였다. 특히 이동하는 소음원 실험의 경우 궤도상에서의 대차의 위치를 파악할 수 있도록 광센서를 사용하여 측정 시 Trigger 신호로 활용하였다.

측정에 사용한 마이크로폰과 소음원의 위치는 동일 평면 상에 배치하여 z축에 대한 거리는 일정거리를 유지하여 위치 추정 시 반복계산에서 이를 상수로 처리하여 반복계산을 단순화 시켰다. 또한 마이크로폰의 배치는 측정되는 거리 차이의 중복을 피하기 위하여 서로 일정한 거리가 되지 않도록 불규칙하게 배열하였다.

또한 데이터의 취득과 데이터 후처리 과정은 손쉬운 데이터 교환을 위하여 NI사의 LabVIEW를 이용하여 측정 및 데이터 분석 프로그램을 제작, 사용하였으며, 측정 프로그램에서 연속적으로 측정/저장된 음압 데이터를 활용하여 필요 연산을 수행하도록 하였다.

3.2 고정된 소음원에서의 위치 파악

Horn Drive를 사용하여 구현한 점음원에 대하여 발생음파를 측정하고, 도달지연 시간 차이에 의하여 이의 위치를 추정하였다. 이때 발생 소음은 White Noise를 사용하였으며, 50 kHz의 측정주파수로 샘플링 하였다. 고정된 소음원에 대한 도달지연 시간의 측정은 측정된 시간별 데이터를 주기 25ms로 분할하여 각 Time Block에서의 도달지연시간

을 Cross Correlation 방법에 의하여 측정하였다. 그리고 실험 시의 대기온도를 이용하여 교정한 음속을 사용하여 거리 차이, d_{ij} 를 구하였다. 각 Time Block 에 대한 반복을 통하여 200회 평균된 평균값과 분산을 구하고 이를 이용한 반복 계산을 통하여 소음원의 위치를 추정하였다.

그림 4의 측정결과를 살펴보면 사각형으로 표시된 실제의 소음원 위치에 대하여 측정결과는 $2m \times 1m$ 의 측정 범위에 대하여 최대 0.036m의 오차를 나타내고 있는데, 이러한 측정 오차는 비교적 만족할 만한 수준으로 보인다. 이때 오차의 원인은 도달 지연시간의 측정에서의 편차가 10^{-6} 수준이었으므로, d_{ij} 의 측정에서의 오차라기보다는 실험장치 설치 과정에서의 마이크로폰과 Horn Drive의 설치 위치의 오차나 반무향설인 측정환경에서의 반사파 등에 의한 영향으로 판단되어 진다.

3.3 움직이는 소음원에서의 위치 파악

고정된 궤도상에서 움직이는 대차를 이용하여 움직이는 소음원에 대한 TDOA 기법에 의한 소음원 위치 파악을 수행하였다. 해당 측정은 고정된 소음원의 경우와 동일한 방법으로 수행하였다. 하지만 이동하는 대차 상에 별도의 소음원을 설치하는데 어려움이 있어 별도의 발생장치 없이 대차 자체에서 발생하는 소음을 이용, 이의 위치를 추적하도록 하였다. 또한 취득 신호의 분석에서는 고정된 경우와는 달리 측정된 도달지연 시간의 평균값을 활용할 수 없으므로 해당 Time Block에 대한 1회 측정값을 바로 사용하였고, 30초간의 주행궤적을 도시하였다. 이때 R 행렬에서의 분산값은 구할 수 없기 때문에 고정된 측정에서 볼 수 있었던 10^{-12} 으로 가정하였다.

그림 5에서 사각형으로 표시된 데이터는 측정된 d_{ij} 를 필터링 없이 바로 사용하여 이의 추적된 궤적을 표시한 것이다. 이를 살펴보면 실선으로 표시된 궤도의 위치에 대하여 어느 정도 이의 위치를 추종하고 있기는 하지만 궤도를 이탈하여 부정확한 위치를 표시하는 부분이 많이 존재한다.

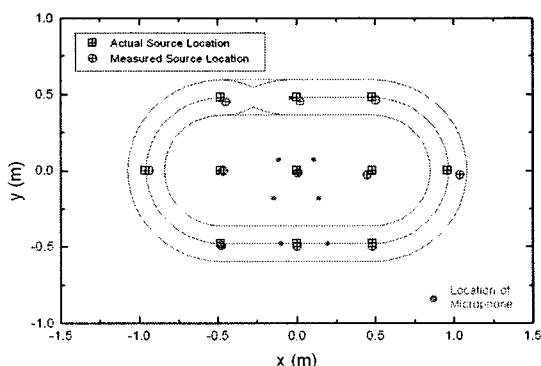


그림 4. Positioning Results in the case of Stationary Sound Source

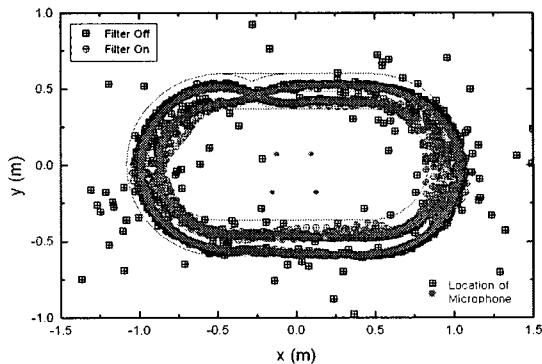


그림 5. Positioning Results in the case of Moving Sound Source

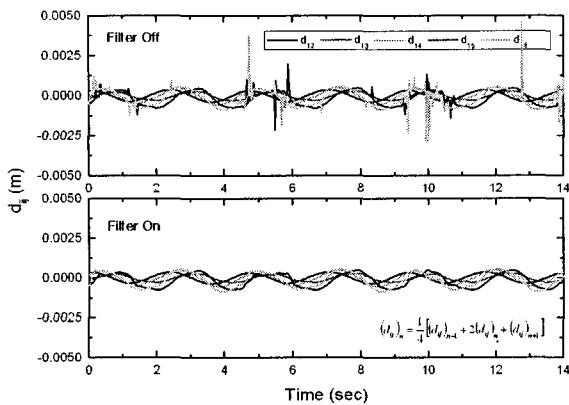


그림 6. The Effect of Filtering on the Navigational Measurement, d_{ij}

이렇게 부정확한 위치를 표시한 경우 중에는 위치추적 과정에서 설정한 반복계산의 최대치 1000을 초과하여 발산한 경우도 있는데, 이는 1200개의 Time Block에 대하여 1.9%에 해당하였다. 그림 6은 이 계산에서의 측정값을 시간에 따라 도시한 것으로 상단의 필터링을 하지 않은 경우를 살펴보면 일정 궤도에 의한 소음원 위치에서의 거리차이가 피크 형태를 보이는 구간을 확인할 수 있다. 따라서 그림 5에서의 추정 위치의 오차는 d_{ij} 의 측정오차에서 기인함을 확인할 수 있으며, 이의 원인은 고정된 소음원의 경우와는 달리 측정값에 대한 평균값을 적용하지 않고 1회 측정값을 적용했기 때문으로 보인다.

따라서, 이러한 d_{ij} 부정확성에 의한 영향을 보기위하여 측정값을 그림에 표시한 것과 같은 방식으로 10회 이동평균을 취하여 필터링한 거리차 데이터를 이용하여 소음원 위치추적을 다시 수행하였다. 그림 5의 원형으로 표시된 이동하는 소음원에 대한 위치추적 결과에서는 필터링을 하지 않은 경우와는 달리 궤도의 위치를 벗어나는 수준의 오류는 현저히 감소하였고, 폭 0.116m의 이중벽에 의한 궤도의 차이까지도 선명하게 확인할 수 있다.

또한 필터링을 사용한 경우 계산에서 발산하는 경우도 찾을 수 없었다. 하지만 반복계산이 수렴한 경우에서도 궤도를 벗어나 부정확한 위치를 추정한 경우도 볼 수 있는데, 이러한 오차의 원인으로는 이동하는 소음원에서의 낮은 소음 수준과 평균회수의 부족에 따른 SN비의 감소, 소음원의 이동에 따른 도플러 효과 등을 고려할 수 있다. 따라서 이의 개선을 위해서는 이동평균이 아닌 다른 방식의 필터링을 활용하여 거리차이의 측정 정확도를 향상시켜야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

TDOA 알고리즘을 적용하여 소음원의 위치를 규명하기

위하여 음파의 전달경로 관계에 의하여 항법식을 구성하고, 복수개의 마이크로폰을 이용하여 측정된 도달 자연시간을 이용한 반복계산을 통하여 소음원의 위치를 추정할 수 있는 방법을 사용하였다.

6개의 마이크로폰을 사용한 실험에서, White Noise 형태의 고정된 소음원에 대해서 측정범위 최대 길이에 대하여 1.6%의 오차를 나타내어 소음원 위치 추적 기법으로 사용이 가능함을 볼 수 있었다. 또한 모터로 구동되는 대차를 이용한 실험을 통하여 이동하는 소음원에 대한 적용성을 확인하였다. 이를 통하여 TDOA 기법의 측정값에 해당하는 도달지연시간에 대한 적절한 필터링을 적용한다면, 움직이는 소음원의 위치추적도 가능함을 볼 수 있었다.

이러한 TDOA 기법의 경우 기존의 마이크로폰레이를 이용한 소음원 가시화 기법에 비하여 소수의 마이크로폰만을 가지고 구현이 가능하기 때문에 소음원 위치추적기법으로서의 충분한 효용성을 지닌다. 또한 측정결과가 소음원의 공간상의 위치만을 나타내 주기 때문에, 해당 소음원의 특성에 대한 분석에는 한계를 지니는데, 이는 본 기법과 Steering 기법에 의한 지향성 마이크로폰을 상호 보완/적용한다면 해당 소음원의 위치와 특성을 파악하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 측정점과 소음원의 위치관계를 완전한 3 차원으로 확장/적용하고, 도달지연 시간의 측정에 적용할 수 있는 최적화된 필터링 기법의 적용을 통하여 현재 후처리로 처리한 연산을 실시간으로 수행할 수 있도록 개선하고자 하며, 확장된 측정기법은 화자 위치추적이나 차량이나 항공기 등의 이동하는 소음원의 특성 규명에 활용할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) Elliot D. Kaplan, 1996, Understanding GPS - Principles and Applications, Artech House Publishers, Boston · London.
- (2) Thomas J. Mueller, 2001, Aeroacoustic Measurements, Springer, Berlin.
- (3) Michael Bradstein, Darren Ward, 2001, Microphone Array - Signal Processing Techniques and Applications, Springer, Berlin.
- (4) Julius S. Bendat, Allan G. Pierson, 2000, Random Data - Analysis and Measurement Procedure, John Wiley & Sons, INC. New York.
- (5) Wade H. Foy, "Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-12, No. 2, Mar. 1976.