

# 서로 다른 주파수를 갖는 두 개의 회전음원의 위치추적에 대한 연구

## A Trajectory Identification Technique for Two Rotating Sound Sources with Different Frequencies

이 종 현\*. 이 재 형\*. 이 욱\*. 최 종 수†

Jong-hyun Lee, Jahyung Lee, Wook Rhee and Jong-soo Choi

(2009년 3월 30일 접수 ; 2009년 6월 8일 심사완료)

**Key Words** : Source Positioning(소음원 위치파악), TDOA(time difference of arrival, 도달지연시간), Cross Spectrum(상호스펙트럼), Measurement of TDOA(도달지연시간 측정), Rotating Noise Source(회전하는 소음원)

### ABSTRACT

The time difference of arrival(TDOA) algorithm is being used widely for identifying the location of a source emanating either electrical or acoustic signal. It's application areas will not be limited to identifying the source at a fixed location, for example the origin of an earthquake, but will also include the trajectory monitoring for a moving source equipped with a GPS sensor. Most of the TDOA algorithm uses time correlation technique to find the time delay between received signals, and therefore difficult to be used for identifying the location of multiple sources. In this paper a TDOA algorithm based on cross-spectrum is developed to find the trajectory of two sound sources with different frequencies. Although its application is limited to for the sources on a disk plane, it can be applied for identifying the locations of more than two sources simultaneously.

### 1. 서 론

소음원에서 발생한 음압신호는 측정하는 측정기의 위치에 따라 서로 다른 위상정보를 가지고 도달하게 된다. 이러한 위상정보는 시간정보로 변환이 가능하며 이를 도달지연시간(time difference of arrival, TDOA)이라고 부른다. 이러한 TDOA기법은 비교적 간단한 시스템과 적은 계산량으로 구현이 가능한 장점을 가지고 있어 많은 분야에서 활용이 가능하다.

이에 대한 연구로는 현재 널리 사용되는 GPS를 이용한 위치추적 알고리즘<sup>(1)</sup>과 휴대전화의 위치추적

과 같은 무선 위치추적기법<sup>(2)</sup>에 대한 연구가 대표적이다. 최근에는 자동 원격회의를 위한 화상 카메라의 화자추적시스템의 구성<sup>(3)</sup>분야와 마이크로폰을 이용한 로봇의 청각인식시스템 구성<sup>(4)</sup>분야에서 연구가 활발하며 이밖에 해양관측장비의 실시간 위치추적 시스템<sup>(5)</sup>과 지진 진앙지 위치추적기법<sup>(6)</sup>에도 사용됨으로써 그 활용범위를 넓히고 있다.

이러한 TDOA기법은 특정한 전파특성을 지니고 방사되는 음파에도 적용할 수 있는데, 이에 대한 기존의 TDOA기법을 이용한 위치추적연구<sup>(8)</sup>는 공간상의 가장 큰 소음원만을 추적함으로써 동시에 여러 소음원이 발생하는 경우 특정 소음 성분에 대한 위치추적에는 적용의 한계를 가지게 된다. 실제로 TDOA기법을 활용하여 동시에 발생하는 소음환경에서 특정소음원의 위치추적에 대한 연구는 아직 국내에 발표된 바가 없다.

† 교신저자; 정회원, 충남대학교 항공우주·선박해양공학부  
E-mail : jchoi@cnu.ac.kr

Tel : (042) 821-6683, Fax : (042) 825-9225

\* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

이 연구에서는 동등한 소음크기를 갖지만 서로 다른 주파수특성을 갖는 두 소음원이 회전체상에서 동시에 발생하는 경우에 대하여 TDOA기법을 통한 소음원 위치추적을 목표로 하였다.

이를 위하여 시뮬레이션을 통해 회전체상에서 발생하는 두 소음원 조건을 모사하고 이에 따른 소음원 위치추적 결과를 분석함으로써 이 연구의 가능성을 확인하였다. 또한 이에 대한 실험적 연구를 통해 각각의 소음원에 대한 위치추적이 가능하였으며, 얻어진 추적결과에 대하여 추적성능 향상을 위한 신호처리적 기법을 적용하여 위치추적성능의 향상 방안을 모색하였다.

이러한 모델은 항공·선박분야의 프로펠러 등과 같이 회전체 상에 존재하는 소음원의 위치추적으로 확장될 수 있을 것이다.

## 2. TDOA 기법을 이용한 소음원 위치추적

### 2.1 TDOA 위치추적기법

소음원의 위치를 규명하기 위한 방법으로 과거에는 인텐시티 프로브를 사용하거나 음향학적 반사판을 부착한 지향성 마이크로폰을 활용한 방법이 전통적으로 활용되어 왔으나, 근래 연구에서는 다수의 마이크로폰을 활용한 빔 형성기법이나 홀로그래피

기법을 활용하는 방법이 일반화 되어있다. 이러한 방법은 음장의 가시화를 통해 음압분포를 시각적으로 보여주기 때문에 사용자가 직관적으로 소음원의 위치와 특성을 파악할 수 있다는 장점을 지니고 있는 반면, 다수의 마이크로폰을 필요로 하므로 고가의 설비비용과 많은 계산시간이 소요된다. 따라서 저가의 시스템이나 적은 계산량을 필요로 하는 임베디드 시스템의 경우 TDOA기법을 이용한 음원 위치 추정 방법이 적용된다.

Fig. 1은 음원 위치추적에 대한 TDOA알고리즘을 설명하는 그림이다. 직교 좌표계에서 소음원의 위치를  $(x,y,z)$ , 측정점의 위치를  $(x_i,y_i,z_i)$ 라고 정의하면 각각의 측정점과의 거리차이를  $r_i$ 로 정의할 수 있다. 이때 임의의 두 측정점에 대하여 각 측정점과 소음원사이의 거리의 차이  $d_{ij}$ 는 식 (1)과 같이 표현되며 두 측정점 사이의 도달 지연시간  $\tau_{ij}$ 는 음속,  $c_0$ 와 식 (2)와 같은 관계를 지니게 된다.

$$d_{ij} = r_i - r_j = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \frac{d_{ij}}{c_0} \quad (2)$$

식 (1)의 측정점의 거리관계로부터 얻어지는  $d_{ij}$ 를  $f_a$ 라고 표시한다. 또한 측정센서로부터 측정되는 신호간의  $\tau_{ij}$ 는 식 (2)와 같이 음속의 곱을 통해 거리로 표현할 수 있으며 이를  $u_a$ 라고 표시하면 식 (3)의 연립방정식을 구성할 수 있다.

$$f_a(x,y,z,x_i,y_i,z_i,x_j,y_j,z_j) = u_a \quad (3)$$

where,  $a = 1, 2, \dots, n$

$n$ 개의 마이크로폰 데이터를 사용할 경우, 식 (3)은  $n(n-1)/2$ 개의 독립방정식이 얻어지며 이 독립방정식을 통해 소음원의 위치  $(x,y,z)$ 를 얻을 수 있다<sup>(2)</sup>. 하지만 식 (1)의 비선형성에 의하여 직접해를 구할 수는 없기 때문에 이를 선형화하는 과정이 필요하다. 소음원의 초기위치값  $(x_v,y_v,z_v)$ 을 식 (4)와 같이 가정한 뒤,

$$x = x_v + \delta_x, y = y_v + \delta_y, z = z_v + \delta_z \quad (4)$$

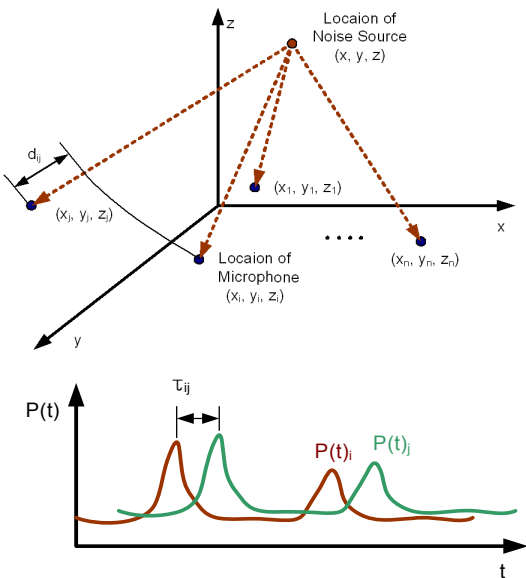


Fig. 1 Application of TDOA on noise source localization

식 (5)처럼 2차항 이하의 테일러급수로 선형화 한다.

$$f_{av} + c_{a1}\delta_x + c_{a2}\delta_y + c_{a3}\delta_z \approx u_a \quad (5)$$

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

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

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

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

이를 행렬식 형태로 표시하면 식 (6)과 같이 정리 할 수 있다.

$$A \delta \approx z \quad (6)$$

where,

$$A = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{n1} & c_{n2} & c_{n3} \end{bmatrix}, \delta = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}, z = \begin{bmatrix} u_1 - f_{1v} \\ u_2 - f_{2v} \\ \cdot \\ u_n - f_{nv} \end{bmatrix}$$

여기에 식(7)의 최소자승법(least square method)을 적용하여 오차가 최소화 되는  $\delta$ 에 대한 반복계산을 수행함으로써 소음원의 위치해 (x,y,z)를 얻을 수 있다<sup>(7,8)</sup>.

$$\delta = [A^T A]^{-1} A^T z \quad (7)$$

### 2.2 도달 지연시간 측정

TDOA알고리즘은 간단한 수학적 관계를 이용하

기 때문에 정확한 도달지연시간만 측정된다면 그 결과 역시 유효한 결과를 얻을 수 있다.

이 연구에서는 음원의 신호를 마이크로폰을 이용해 측정하였으며, 일반적으로 2개의 마이크로폰신호로부터 도달지연시간  $\tau_{ij}$ 를 구하는 방법으로 크게 두 가지 방법이 사용되고 있다.

이는 두 신호의 상호상관함수(cross correlation function),  $R_{ij}(\tau)$ 를 이용하는 방법과 두 신호의 상호스펙트럼(cross spectrum)의 위상각관계,  $\theta_{ij}(f)$ 를 이용하는 방법이다. Fig. 2와 같이 전자의 경우 상호상관함수의 최대치로부터, 후자의 경우는 위상각의 스펙트럼 기울기로부터 도달지연시간을 계산할 수 있다.

일반적으로 넓은 주파수대역의 성분을 갖는 랜덤 신호에 대하여 상호상관함수를 이용한 도달지연시간  $\tau$ 의 추정방법이 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있지만 특정 주파수성분이 강한 신호에 대해서는 도달지연시간의 추정성능이 나빠지는 것으로 알려져 있다<sup>(9)</sup>. 이 경우 GCC(generalized cross correlation)의 PHAT(phase transform)을 사용함으로써 추정성능의 향상 시킬 수 있지만<sup>(10)</sup> 이러한 방법은 소음원의 주파수성분을 고려할 수 없으므로 특정 소음원성분의 위치추적에는 한계를 지니게 된다.

$$S_{ij}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (8)$$

$$= |S_{ij}(f)| e^{-j\theta_{ij}(f)}$$

$$\theta_{ij}(f) = 2\pi f \tau_{ij} \quad (9)$$

식 (8)과 같이 정의된 상호스펙트럼에서 위상각  $\theta_{ij}$ 는 주파수  $f$ 에 대한 함수로 나타난다. 이때 소음원의 주파수특성을 알 수 있다면 이를 통해 소음원의 도달지연시간  $\tau_{ij}$ 를 측정할 수 있다.

하지만 이러한 방법은 잡음신호가 섞인 실제신호에 대하여 두 측정 신호간의 선형적인 위상 관계를 얻기가 힘들기 때문에 정확한  $\tau$ 의 측정에 대한 적용에는 어려움이 존재한다<sup>(11)</sup>. 이 연구에서의 두 소음원은 각각 서로 다른 주파수 특성을 지니도록 구성하였으며, 이에 대한 도달지연시간을 얻기 위해서 주파수영역인 상호스펙트럼의 해당 소음원 주파수에서 위상각을 측정하였고 이를 통해  $\tau_{ij}$ 를 계산하여 사용하였다.

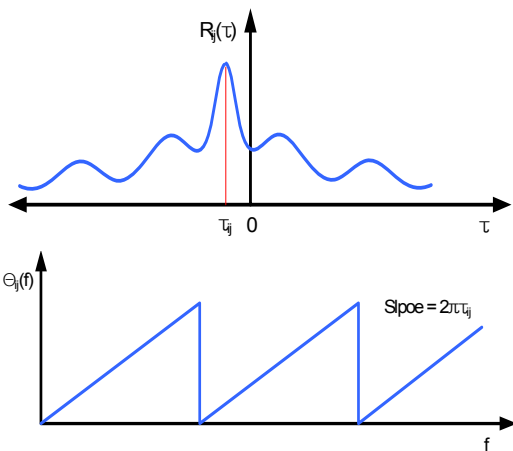


Fig. 2 Measurement of time difference of arrival

### 3. 회전하는 소음원에 대한 TDOA기법 적용

#### 3.1 회전하는 두 소음원 구성

서로 다른 주파수를 갖는 두 소음원을 발생시키기 위하여 알루미늄을 이용해 제작한 공진기(resonator)를 사용하였다. 공진기는 실린더형 알루미늄의 한쪽 면에 폭 3.4 mm의 홈을 높이방향으로 뚫어줌으로써 목재 블레이드에 부착하여 회전시킬 경우 공기력에 의해 실린더 내부의 공간에서 공진이 발생하며, 이는 특정 주파수의 소음원을 발생하게 한다.

특정 선속도로 회전시 서로 다른 공진주파수를 발생시키기 위해 공진기는 식 (10)을 이용해 각각 다른 부피를 갖도록 설계하였으며, 부착 위치를 로터의 서로 다른 반경에 배치시킴으로써 추후 실험 결과를 분석함에 용이하도록 구성하였다.  $S$ 는 목면적,  $L$ 은 특성길이,  $V$ 는 공진기 부피를 의미한다<sup>(12)</sup>.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (10)$$

공진기는 목(unflanged)입구에서 블레이드의 회전에 의한 공기의 가진력으로 소음이 발생하기 때문에 소음원을 부착한 목재 블레이드를 16 rps로 회전시키며 소음원의 특성을 분석하였다. Fig. 3의 마이

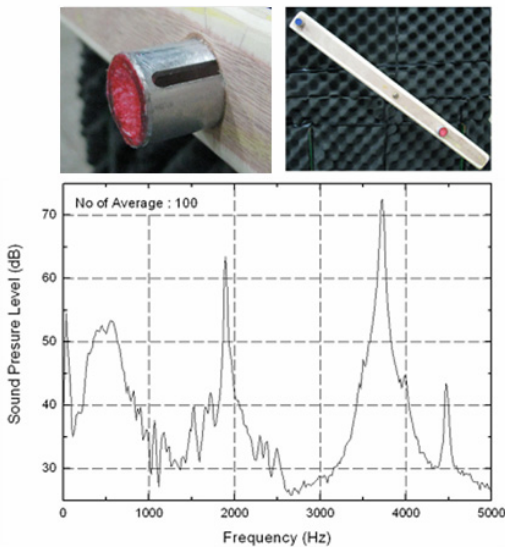


Fig. 3 Analysis of two rotating noise sources

크로폰으로 측정된 신호의 주파수분석을 통해 반경 0.25 m에 부착한 공진기  $S_1$ (small)의 소음특성은 3725 Hz에서 72 dB이며, 반경 0.125 m에 부착한 공진기  $S_2$ (large)의 소음특성은 1895 Hz에서 63 dB 임을 확인하였다.

#### 3.2 Simulation을 통한 측정 위치 결정

마이크로폰간의 배치간격은 음원의 파장에 따라 제한된 도달지연거리를 고려하여 결정되어야 한다. 소음원의 주파수에 따라 음파의 파장( $\lambda$ )이 결정되며 도달지연거리는 음파의 반파장( $\lambda/2$ ) 이내로 제한되어야 함은 위상차를 이용한 계산에서 주요 고려대상이 된다. 실험조건과 동일한 조건에서 마이크로폰의 최적의 배치를 찾기 위해 시뮬레이션을 수행하여 위치추적 결과를 예상해 보았다.

회전하는 소음원에 대하여 이동된 위치에서 각 측정센서에 도달한 음파를 사인파로 시뮬레이션 한 뒤, 상호스펙트럼을 통해 도달지연시간을 측정하고, TDOA알고리즘에 의한 반복계산으로 발생소음원의 위치를 계산하였다. 이때 사인파 형성 시 샘플링 주파수는 100 kHz이며, 10° 간격의 36개의 위치에서 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 4는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 추정된 소음원의 위치는 원( $S_1$ )과 사각형( $S_2$ )으로 표시하였으며, 실제 소음원의 이동 궤적은 검정색 실선으로 표시하였다.

높은 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 위하여 소음원을 마이크로폰으로부터 z방향으로 1 m에

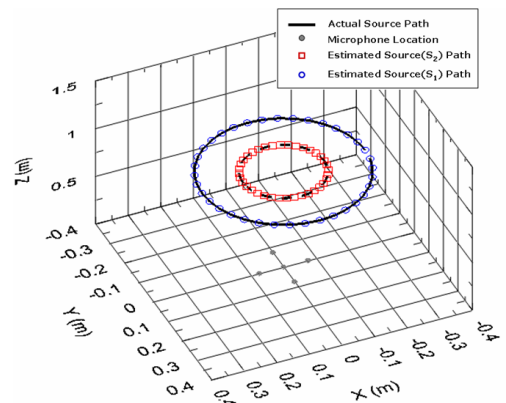


Fig. 4 Simulation result of two rotating noise sources

배치하였으며, 이렇게 고정된 z축의 거리정보를 일정한 상수로 처리하여 위치추정 시 반복계산을 단순화하였다.

마이크로폰은 7.5 cm 간격의 십자형 배치를 통해 발산점이 없는 적절한 범위안의 도달지연시간  $\tau_{ij}$ 를 얻을 수 있음을 확인하였고, 시뮬레이션 결과는 TDOA 알고리즘의 반복계산이 100회 이내에서 수렴한 결과로써 추정된 위치의 최대오차는 실제제적에서 0.2% 범위 안에 존재함을 확인하였다.

### 3.3 실험장치의 구성

회전하는 두 소음원의 위치규명에 대한 TDOA 기법의 성능을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 회전하는 소음원의 시스템을 구현한 뒤 본고 중형 무향 풍동의 무향실 내부에 실험 장치를 구성하였다.

마이크로폰과 회전면과의 거리는 z방향으로 1 m이며, 센서의 중앙 마이크로폰과 회전 중심을 일직선상에 배치하였고, 센서의 배치는 시뮬레이션의 십자형배치와 동일하게 배치하였다.

두 소음원을 발생시키기 위하여 두 개의 공진기를 부착한 목재 블레이드는 speed controller를 사용

하여 16 rps로 회전시켰으며, 5개의 압전소자 방식의 마이크로폰(MG M360, 1/4", free field type)을 사용하였다. 음압신호는 동시 샘플링이 가능하며 샘플링 주파수가 100 kHz까지 가능한 PXI-4472를 사용하였고, 광센서를 사용하여 목재 블레이드의 회전수를 측정하였다.

데이터의 취득과 후처리 과정은 손쉬운 데이터 교환을 위하여 NI사의 LabVIEW를 이용하였다.

### 3.4 회전하는 소음원의 도달지연시간 측정

광센서를 이용한 트리거 신호를 함께 측정하였기 때문에 트리거 신호를 기준으로 소음원의 1회전동안 측정된 데이터를 36개의 frame으로 분할한 뒤 각각의 frame에서 도달지연시간  $\tau_{ij}$ 를 상호스펙트럼을 통해 측정하였다. 따라서 1 frame의 시간은 소음원이 트리거신호를 기점으로 방위각(azimuth angle)

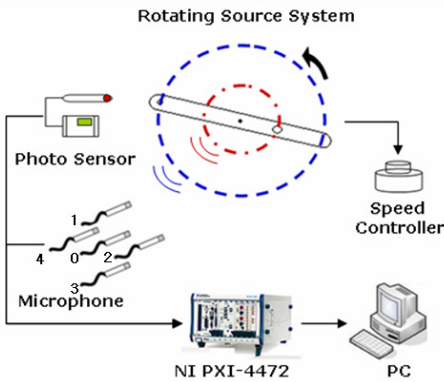
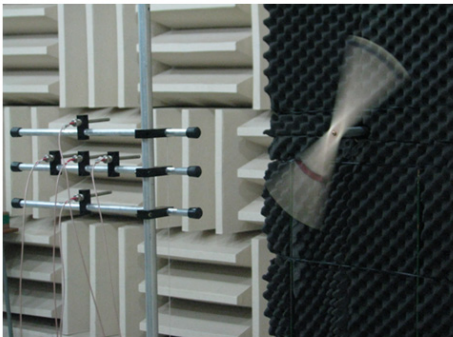
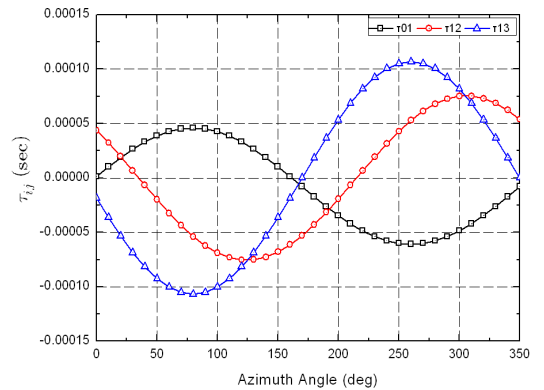
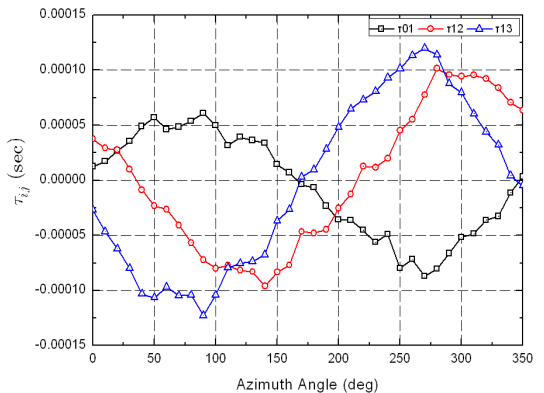


Fig. 5 Experimental schematic



(a)  $\tau_{ij}$ , Simulated time delays



(b)  $\tau_{ij}$ , Measured time delays

Fig. 6 Time delay results of  $S_1(3725 \text{ Hz})$  noise source

10° 회전동안의 시간이 되며, 회전속도가 16 rps인 경우 0.00173초임을 의미한다.

Fig. 6은 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과와 실험을 통해 측정된  $S_1(3725 \text{ Hz})$ 에 대한  $\tau_{ij}$ 를 비교하고 있다. 이때  $\tau_{ij}$ 는 5개 마이크로폰으로 구성되는 10개의 쌍이 존재하지만 분석의 용이성을 위해  $\tau_{01}$ ,  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{13}$ 의 3쌍만을 도시하였다.

측정결과는 시뮬레이션 결과와 유사한 경향을 보여주지만  $\tau_{ij}$  측정의 오차가 존재함을 알 수 있다. 이는 실제 신호의 경우 잡음신호의 간섭과 소음원의 회전속도가 빨라짐에 따라 1 frame당 계산에 이용되는 데이터의 수가 감소하여 상호 스펙트럼의 주파수영역 변환시  $\Delta f$ 가 커져 주파수분해능의 감소가 발생하기 때문이다.

이러한 문제는 샘플링 주파수를 높여 계산에 이용되는 데이터의 수의 증가를 통해 해결이 가능하지만 데이터 취득 장비의 샘플링 주파수에는 한계가 존재하므로 하드웨어적인 부분과 신호처리 부분에서 상충되는 문제이다.

### 3.5 측정된 도달지연시간의 향상 기법

측정된  $\tau_{ij}$ 값은 매우 작은 값이기 때문에 이러한 측정오차는 반복계산 부분에서 발산하는 결과로 나타나며 반복계산이 수렴한 경우에도 잘못된 위치추적 결과로 수렴하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제를 피하기 위해 측정된  $\tau_{ij}$ 값의 오차를 줄이는 두 가지 방법을 수행하였다.

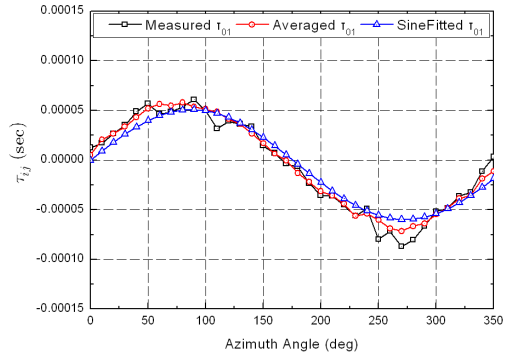
첫 번째 방법은 20초 동안의 측정을 통해 1회전당 측정되는  $\tau_{ij}$ 에 대한 ensemble average를 적용하는 방법이다. 실제 20초 동안의 데이터를 통해 트리거 신호를 기점으로 1회전시 데이터를 구성하여 300회의 ensemble average를 수행할 수 있었다.

두 번째 방법은 측정된  $\tau_{ij}$ 를 회전하는 소음원인 경우에 한하여 사인파로 모델링하는 방법이다. 20초 동안 측정된 긴 주기의  $\tau_{ij}$ 에 대한 주파수분석을 통해 사인파 모델링한 뒤,  $\tau_{ij}$ 를 재구성 할 수 있다. 이는 회전하는 소음원의  $\tau_{ij}$ 특성을 이용한 제한적 방법이다.

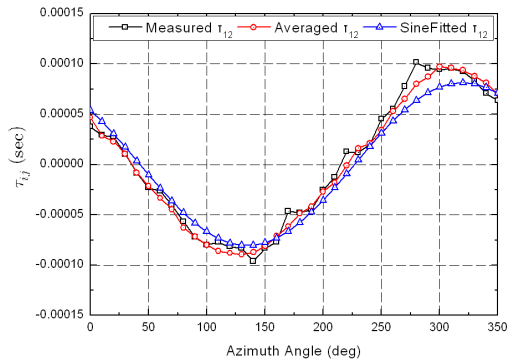
Fig. 7은 제안된 두 방법과 측정된 도달지연시간을 비교한 그림이다. 그림은 분석의 용이성을 위해  $\tau_{01}$ ,  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{13}$ 의 각각의 경우를 따로 도시하고, 1회전

시 측정데이터를 measured  $\tau_{ij}$ , 1회전시 측정데이터를 이용한 300회 ensemble average 데이터를 averaged  $\tau_{ij}$ , 20초 동안의 측정데이터를 사인파로 모델링한 데이터를 sine fitted  $\tau_{ij}$ 로 표기하였다.

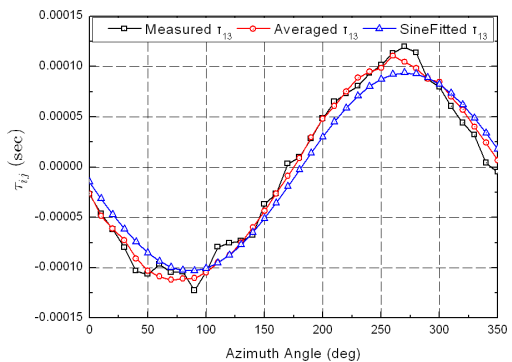
1회전의 측정데이터(사각형)는 잡음신호로 인한 불연속적 오차를 가지는 점들이 존재하며, 이는 위



(a) Comparison  $\tau_{01}$



(b) Comparison  $\tau_{12}$



(c) Comparison  $\tau_{13}$

Fig. 7 Comparison of time delay of  $S_1(3725 \text{ Hz})$  noise source

치추적 반복계산에서 발산의 원인이 되거나 잘못된 수렴결과가 발생하는 원인이 되는 점들이다. 1회전 측정데이터의 300회 ensemble average(원)의 수행 결과 이러한 불연속 오차점들이 크게 감소하여 부드러운 곡선이 된다. 이는 궁극적으로 회전하는 소음원에 한하여 특정 반경에서 소음원이 발생하는 경우에  $\tau_{ij}$ 의 분포특성이 사인파형임을 추측할 수 있다. 실제로 앞서 수행한 시뮬레이션을 통해 얻어진 이상적인  $\tau_{ij}$ [Fig. 6(a)]는 각 센서조합에 따라 DC값의 차이를 갖는 사인파형임을 확인할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 20초 동안의 측정데이터를 주파수분석을 통해 사인파로 모델링할 수 있으며 이를 통해 재구성한 sine fitting(삼각형)은 Fig. 7(c)와 같이 명확한 사인파의  $\tau_{ij}$ 분포를 갖게 된다.

### 3.6 측정된 도달지연시간의 위치추적 결과

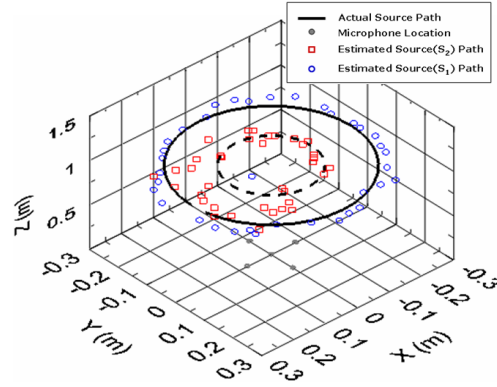
앞서 측정된 도달지연시간을 통해 TDOA 알고리즘을 이용한 반복계산에 적용하면 소음원의 위치를 얻을 수 있다. 추정 결과는 Fig. 8과 같으며, 이때 실선은 실제 각 소음원의 궤적이며 원은 소음원  $S_1$  (3725 Hz)의 추정결과, 사각형은 소음원  $S_2$  (1895 Hz)의 추정결과를 보여준다.

결과를 통해 실선 궤적을 벗어나 최대 오차를 갖는 점에 대해 실선(궤적)의 반경으로 정규화한 오차율은  $S_1$ 의 경우 (a) 74%, (b) 19%, (c) 7.9%이며,  $S_2$ 에 대해서는 (a) 121%, (b) 61%, (c) 11%임을 확인할 수 있다. 오차율뿐만 아니라 전체적으로 궤적을 벗어난 정도가 (a)와 비교하여 (b)와 (c)의 경우에 상당히 개선되었음을 확인할 수 있다.

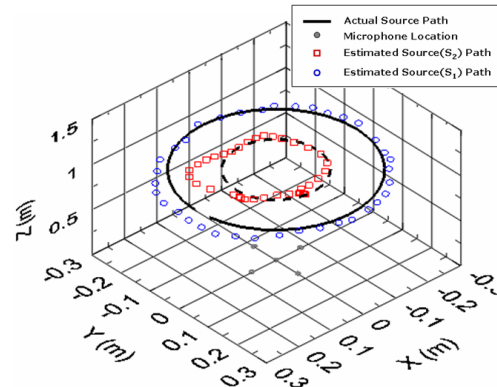
$S_2$ 의 경우 최대 오차율이 큰 이유는  $S_1$ 에 비해 신호대 잡음비가 작으며, 짧은 회전반경으로 인해  $\tau_{ij}$ 값의 변동 폭이 작은 영향으로 예상할 수 있다.

Fig. 8(b)의 결과는 (a)의 결과와 비교하여 비교적 개선된 추적결과를 얻지만 (a)의 오차가 크게 측정된 점들 근처에서 마찬가지로 추적결과가 저하됨을 알 수 있으며, 이는 (a)에서 발생한 오차점들이 (b)의 결과에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이를 극복하기 위해 긴 시간 동안의 측정데이터를 이용한 sine fitting의 결과가 (c)이다. 위치추적결과가 실제 궤적에 상당히 근접하게 되며 이는 회전하는 소음원에 대하여  $\tau_{ij}$ 의 사인파로 모델링의 타당성을 보여준다.

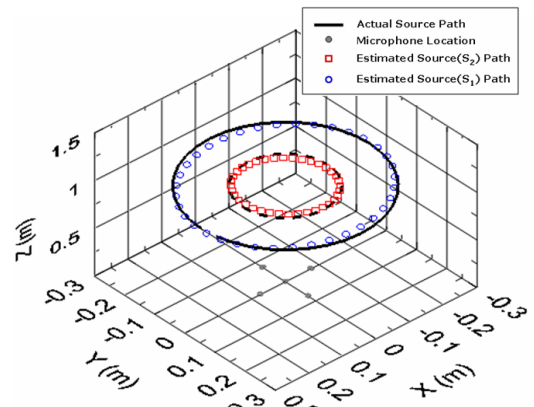
이와같이 TDOA기법을 이용하여 동시에 회전하는 두 소음원의 궤적을 명확히 구분할 수 있었다.



(a) Source locations for 1 revolution



(b) Source locations for 1 revolution, ensemble averaged, 300 revolutions



(c) Source locations for 1 revolution, sine fitting, 20 sec data

Fig. 8 Estimation of source location of  $S_1$ (3725 Hz) &  $S_2$ (1895 Hz) noise sources

#### 4. 결 론

TDOA기법은 현재 상용화된 빔포밍기법이나 홀로그래피기법에 비해 소수의 마이크로폰만을 이용하여 구현이 가능하므로 소음원의 위치추적기법으로써 강점을 가진다. 이러한 TDOA기법을 이용한 소음원 위치추적에 대한 적용범위를 확장하여 회전하는 물체에서 소음원이 발생하며, 발생한 소음원이 두 개의 다른 주파수성분을 갖는 경우에 대하여 시뮬레이션과 실험적 연구를 통하여 각각의 소음원에 대한 위치추적 가능성과 추적 성능을 검증하였다.

이를 위하여 이 연구는 상호스펙트럼 함수를 이용, 주파수영역에서 동시에 발생하는 두 소음원 중 특정 소음원의 위상정보를 통해 도달지연시간을 측정할 수 있었으며, 이 측정값을 TDOA알고리즘에 적용하여 소음원의 위치정보를 얻을 수 있었다.

실험적 연구를 수행하기 이전에 시뮬레이션을 통해 이러한 방법의 적용가능성과 추정결과의 정확성을 확인할 수 있었으며, TDOA기법에서 주요 고려사항인 마이크로폰의 배치와 소음원 주파수의 반과장 문제(spatial aliasing)를 사전에 고려할 수 있었다. 하지만 실제 실험조건에서는 잡음의 간섭과 회전속도로 인한 데이터 처리과정의  $\Delta f$ 감소로 인해 도달지연시간  $\tau_{ij}$  측정의 분해능 저하가 피할 수 없는 문제임을 확인하였다.

도달지연시간 측정의 정확도는 TDOA기법의 위치추적성능에 직결되는 문제임은 앞서 언급한 바 있다. 따라서 도달지연시간 측정의 향상 방안으로 두 가지 방안을 제시하였으며, 이는 측정시간을 늘려 ensemble average 데이터를 활용하는 방법과 회전하는 소음원에서  $\tau_{ij}$ 의 특성을 사인파로 모델링하여 측정된  $\tau_{ij}$ 로부터 sine fitting을 적용한 재구성된 도달지연시간을 이용하는 방법이다.

이러한 ensemble average와 sine fitting을 적용하였을 경우, 최대오차를 갖는 오차점들의 정규화 된 오차율이 상당히 개선됨을 확인할 수 있었으며 전체적인 계산결과의 분포가 실제 회전궤적에 상당히 근접함으로써 소음원의 궤적을 결정하는데 있어서 좀 더 정확성을 높일 수 있었다.

이 연구를 통해 TDOA기법을 이용하여 회전하는 소음원에서의 동시발생 소음원에 대한 위치추적의

유용성을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 TDOA관련 연구의 방법인 시간영역에서 측정방법이 아닌 주파수영역의 도달지연시간 측정방법을 사용함으로써 소음원의 주파수특성을 고려한 소음원의 도달지연시간 측정이 가능할 수 있었다. 단 시간영역의 측정방법이 주파수영역의 측정방법에 비해 측정에 부적합하다는 의미는 아니며, 이는 단지 이 연구와 같이 소음원의 주파수특성이 주요 고려사항인 경우에 주파수영역의 측정방법을 사용하는 것이 적합함을 의미한다. 이 두 가지 방법의 도달지연시간 측정 정확도에 대해서는 향후 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

또한 이렇게 측정된 도달지연시간의 오차를 줄이기 위한 노력으로 신호처리적 기법을 제안하였는데, 이는 회전하는 소음원에 대하여 적용의 한계를 갖게 된다. 하지만 회전하는 경우와 같이 도달지연시간의 측정값이 주기성을 갖는 경우 이 연구에서 제안하는바와 같이 주기함수를 이용하여 측정된 도달지연시간을 모델링함으로써 도달지연시간 측정에서의 필연적으로 수반되는 오차의 영향을 감소시킬 수 있다.

#### 후 기

이 논문의 내용은 과학기술부 기초과학연구사업(R01-2007-000-20376-0)의 일부로 수행되었으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kaplan, E. D., 1996, "Understanding GPS - Principles and Applications," Artech House Publishers, Boston · London.
- (2) Chen, C.-H., Feng, K.-T., Chen, C.-L. and Tseng, P.-H., 2009, "Wireless Location Estimation with the Assistance of Virtual Base Station," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, pp. 93~106.
- (3) Wang, H. and Chu, P., 1997, "Voice Source Localization for Automatic Camera Pointing System in Videoconferencing," Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-97, Vol. 1, pp. 187~190.



(4) Kwon, B. H., Park, Y. J. and Park, Y. S., 2007, "Sound Source Localization Method Applied to Robot System," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, KSNVE07A-03-02.

(5) Baumgartner, M. F., Freitag, L., Partan, J., Ball, K. R. and Prada, K. E., 2008, "Tracking Large Marine Predators in Three Dimensions: The Real-time Acoustic Tracking System," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 33, pp. 146~157.

(6) de Perez, T. A., Juanatey, M., Stefanelli, M. C., Abondano of M, Vilorio A, 1998, "Earthquake Epicenter Location Using Time-frequency Representations," IEEE International Caracas Conference, pp. 217~221.

(7) Wade H. Foy, "Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-12, No. 2, pp. 187~194.

(8) Rhee, W., Choi, J. S., 2006 "Experimental Studies for Noise Source Positioning Using TDOA Algorithm," Proceeding of the 2006 KSAS Fall Conference, pp. 138~142.

(9) Kwon, B. H., Park, Y. J., Park, Y. S., 2008 "Factors for Speech Signal Time Delay Estimation," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 823~831.

(10) Knapp, C. H. and Carter, G. C., 1976, "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay," IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. AS-24, No. 4, pp. 320~327.

(11) Julius S. Bendat, Allan G. Pierson, 2000, Random Data - Analysis and Measurement Procedure, John Wiley & Sons, INC. New York.

(12) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 2000, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, INC. New York.