

# 빔형성방법을 이용한 회전하는 음원의 위치 판별에 관한 연구

## Localization of Rotating Sound Sources Using Beamforming Method

이 재 형\* · 홍 석 호\*\* · 최 종 수†

Jaehyung Lee, Suk-Ho Hong and Jong-Soo Choi

(2004년 9월 7일 접수 : 2004년 11월 12일 심사완료)

**Key Words** : Rotating Sound Source(회전하는 음원), Doppler Effect(도플러효과), Microphone Array(마이크로폰 어레이), Beamforming Method(빔형성방법), Forward Propagation Method(발신시각추출법), Backward Propagation Method(수신시각추출법)

### ABSTRACT

The positions of rotating sound sources have been localized by experiments with the Doppler effects removed. In order to de-Dopplerize the sound signals emitted from moving sources, two kinds of signal reconstruction methods were applied. One is the forward propagation method and the other is the backward propagation method. Forward propagation method analyze the source emission time based on the instantaneous distance between sensors and the assumed source position, then the signals are reconstructed with respect to the emission time. On the other hand, the backward method uses time delay to de-Dopplerize the acquired data for the received time of reference. In both techniques, the reconstructed signal data were processed using beamforming algorithm to produce power distributions at the frequencies of interest. Experiments have been carried out for varying frequencies, rotating speeds and the object distances. It is shown that the forward propagation method gives better performance in locating source position than the backward propagation method.

### 1. 서 론

움직이는 음원에 대한 소음계측 시 음원의 위치 변화에 따라 정지한 관찰자는 실제 발생하는 신호를 왜곡된 상태로 해석하게 된다. 이를 도플러 효과라 하며 이것은 음원의 속도와 관찰자와의 거리에 의하여 영향을 받게 된다. 이런 효과는 자동차나 항공기와 같이 움직이는 소음원에서 발생하는 소음을 측정할시

발생하며, 실제 음원에서 발생하는 소음을 정확히 파악하기 위해서는 이 영향을 제거해야 할 필요가 있다. 도플러 효과를 제거하여 정확한 소음원의 위치를 측정하기 위해서는 센서에서 측정된 신호를 시간영역에서 소음발생시각에 따라 재구성함으로써 해결할 수 있다. 이 과정에서 발생시각에 대한 원래의 신호를 추출하기 위하여 음원의 정확한 위치와 속도를 아는 것이 필요하다. 이 위치와 속도 정보로부터 신호를 재구성하는 방법에는 발신시각추출법(forward propagation method)과 수신시각추출법(backward propagation method)이 있다. 이 연구에서는 이 두 가지 방법을 이용하여 일정한 속도로 회전하는 점음원의 신호를 재구성하여 비교하였다. 각 방법으로 재구성된 음압 신호는 빔형성 방법을 이용하여 음원의 위치를 판별하는데 사용되었고 결과의 차이를 확인할 수 있었다.

† 책임저자 : 정회원, 충남대학교 항공우주공학과  
E-mail : jchoi@cnu.ac.kr  
Tel : (042) 821-66834, Fax : (042) 825-9225

\* Pennsylvania State University

\*\* 충남대학교 항공우주공학과

# 이 논문은 2004 춘계학술대회 우수발표논문으로 추천되었음.

## 2. 빔형성 방법

하나의 점음원에 대하여 다수의 센서로 구성된 어레이로 측정하였을 때, 각 센서의 신호는 음원과 상대적인 거리 차에 의하여 위상차를 갖게 된다. 이 위상차 정보로부터 음원의 위치나 발생 방향을 파워의 분포로 알 수 있는 것이 빔형성 방법이다. 각 센서에서 발생하는 위상차는 상호상관함수는 행렬  $G$ 의 형태로 표현된다. 모델링된 음장은 가상음원의 위치와 센서 간의 거리에 의하여 가중벡터  $E$ 로 계산된다. 상호상관함수행렬로부터 발생된 위상차는 센서와 음원의 거리와 관심주파수의 파수로 보상되어 다음과 같이 파워  $P$ 로 계산된다.

$$P = E^*GE \quad (1)$$

음원의 발생하는 위치에 대하여 큰 파워를 갖게 되고 음원이 없는 곳은 낮은 값을 갖게 되어 이로부터 구성된 파워 분포에서 음원 위치를 찾을 수 있다.<sup>(1,2)</sup>

## 3. 회전하는 음원에 대한 신호재구성

일정한 속도로 회전하는 음원으로부터 발생된 음향 신호를 측정된 신호로부터 복원하는 방법으로 발신 시각추출법과 수신시각추출법을 사용하여 비교하였다.

Fig. 1은 중심으로부터 반지름  $r$ 의 거리에서  $\omega$ 의 속도로 회전하는 음원과 일정한 거리만큼 떨어진 위치에 설치된 마이크로폰과의 상대적 거리차가 시간에

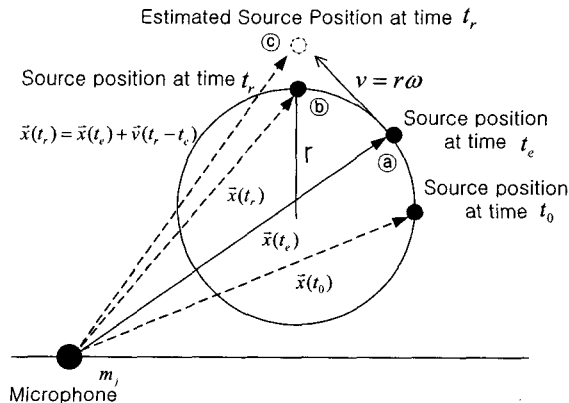


Fig. 1 Rotating source position at constant angular speed

따라 어떻게 바뀌는지를 보여주고 있다. 여기서  $t_e$ 는 음원에서 신호가 발생된 시간을 나타내며,  $t_r$ 은 발생된 신호가 마이크로폰에 도달할 때의 시간을 나타낸다.  $\vec{x}(t)$ 는 시간에 따른 음원과 마이크로폰 사이의 상대적 거리를,  $\vec{v}$ 는 회전음원의 접선 속도이다.

발신시각추출방법은 시간  $t_e$ 에 마이크로폰으로부터  $\vec{x}$ 만큼 떨어진 위치에 있는 음원으로부터 발생된 신호가 음파의 속도로 전파되어 시간  $t_r$ 에 도달하였을 때, 이론적으로 계산된 지연시간(time delay)을 계산하여 각 센서에서 측정된 음압 신호를 재구성하는 방법이다. 음원에서 일정한 시간 간격으로 신호가 발생하는 것으로 가정할 때 발생된 음압신호는 각 센서까지 도달하는데 걸리는 시간이 음원의 위치에 따라 변화하고 이를 매 시간마다 음원의 위치와 센서의 거리를 계산하여 음파가 전파되는 지연시간을 계산할 수 있다. 따라서 발생시간  $t_e$ 와 계산된 지연 시간을 더하여 구하여진 시간  $t_r$ 에 측정된 신호를 추정하여 해당하는 음압을 구하고 이를 일정한 시간간격에 대한 신호로 재구성하면 된다.

반면, 수신시각추출방법은 측정 시각을 기준하여, 측정된 음파가 전달된 경로의 거리를 계산하여 발생 시간  $t_e$ 에 대하여 음압을 재구성하는 방법으로서, 일정한 간격으로 계측한 시간  $t_r$ 로부터 신호가 발생된 시간을 전파된 거리와 음원의 속도로부터 역 계산하여  $t_e$ 에 대한 음압 신호를 재구성한다.

이들 사이의 관계는 아래 식 (2)와 같이 계산되며,  $c_0$ 는 음파의 전파속도이다.

$$t_r - t_e = \frac{\sqrt{[(\vec{x} \cdot \vec{v})^2 + (c_0^2 - v^2)x^2]} - \vec{x} \cdot \vec{v}}{(c_0^2 - v^2)} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여  $t_r$ 에 측정된 신호를  $t_e$ 에 발생된 신호로 재구성할 수 있다.<sup>(3)~(7)</sup>

## 4. 실험 장치 구성

회전음원 시험 장치는 충남대학교 항공우주공학과 의 반무향실에 Fig. 2, 3과 같이 설치되었다. 혼드라이버(horn driver)로부터 발생된 음파는 T자로 분리되어 반경 300 mm인 두 개의 파이로 연결되며, 이 파

이프의 양 끝이 개방된 경우 두 개의 동일 주파수 음원이 존재하도록 제작되었다. 파이프의 양쪽 끝단은 볼트를 사용하여 개폐가 가능하여 한 개 또는 두 개의 음원이 동시에 존재하도록 제작하였다. T자 파이프와 혼드라이버 사이를 베어링으로 연결하고 파이프

는 벨트를 사용하여 모터에 연결함으로써 회전수를 조절할 수 있도록 하였으며, 또한 어레이평면과 음원의 회전평면 사이의 거리( $d$ )를 조절할 수 있도록 구

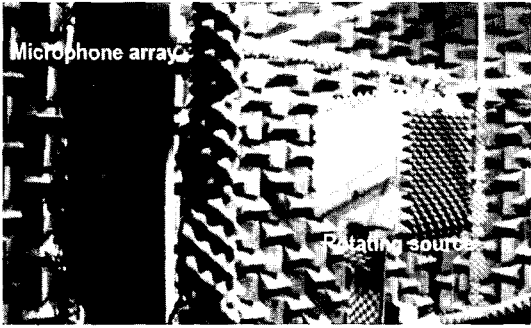


Fig. 2 Microphone array and rotating sources

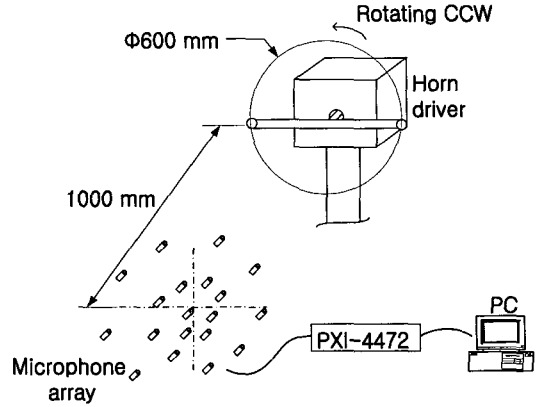


Fig. 3 Experimental set-up

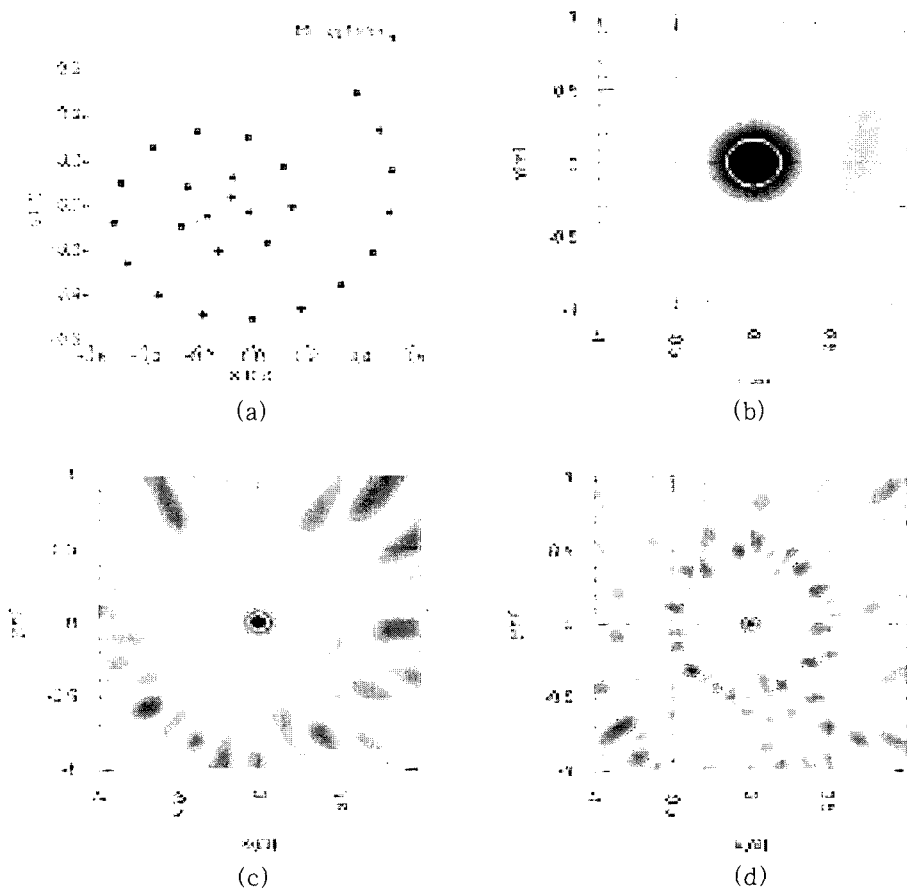


Fig. 4 (a) Microphone positions for the array, and beam patterns at frequencies of (b) 1 kHz, (c) 3 kHz and (d) 5 kHz ( $d=1.0$  m)

성하였다. 차음상자를 이용하여 모터, 베어링 등의 구동부 주위를 차음시켜 배경소음을 현저히 감소시켰다. 광센서를 이용하여 회전하는 음원이 12시 방향에 위치하였을 때 트리거 신호가 발생하도록 설정하였다. Fig. 4는 26개의 마이크로폰을 사용하여 나선형으로 배치한 어레이의 형상 설계를 보여주고 있으며, 이를 사용하였을 경우에 대한 이론적으로 예측된 각 주파수에서의 어레이의 응답특성을 보여주고 있다. 고주파수의 음원에 대한 분해능은 점차 좋아지나 사이드롭의 영향이 저주파수 음원에 비해 증가함을 알 수 있다.<sup>(1)</sup>

### 5. 실험 결과 및 고찰

정지한 음원과 회전하는 음원에 대한 스펙트럼을 Fig. 5에서 보여주고 있다. 3 kHz의 정현파 신호를 발생하는 음원의 회전수가 150 rpm에서 399 rpm으로 증가함에 따라 도플러 영향에 의하여 주변 주파수로 확산되는(broadening) 현상을 확인할 수 있다. 정지시 3 kHz 전후의 주파수 성분은 음원이 파이프를 지나면서 발생하는 공명현상으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 각각의 분석 방법의 정확도를 확인하기 위하여, 정지음원에 대하여 기존의 도플러 효과를 고려하지 않는 방법을 이용한 빔형성 결과(STASI, stationary source identifier)와 수신시각추출법에 의한 회전음원 빔형성 결과(BROSI, backward propagation rotating source identifier) 그리고 발신시각추출법에

의한 결과(FROSI, forward propagation rotating source identifier)를 비교하여 보았다.

Fig. 6은 거리  $d=1\text{m}$ 에서 파이프를 정지시키고 파이프의 한 단을 막은 후, 5 kHz의 정현파 음원에 대하여 분석한 결과이다. 이 결과로부터 정지음원의 경우, STASI, BROSI와 FROSI의 결과가 유사하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 400 rpm으로 회전할 때 3 kHz와 5 kHz의 음원에 대한 STASI의 결과를 보여주고 있다. 도플러 영향을 제거하지 않음으로써 음원의 범위가 넓게 퍼져서 찌그러진 타원의 형태를 보여주고 있으며, 이는 데이터 샘플링 시간이 길어지면 길어질수록 도우넛 형태로 넓게 분포되어 것을 확인할 수 있었다. 또한

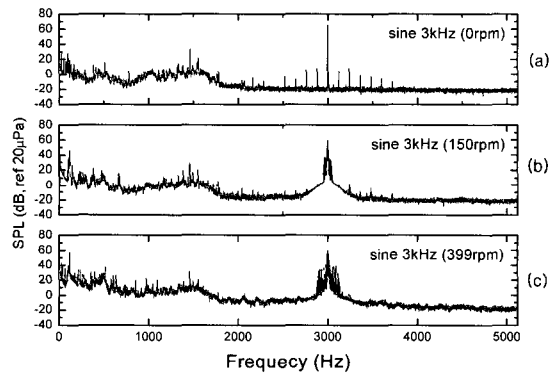


Fig. 5 Autospectrum of point source generating sine 3 kHz when rotating at (a) 0 rpm, (b) 150 rpm and (c) 399 rpm

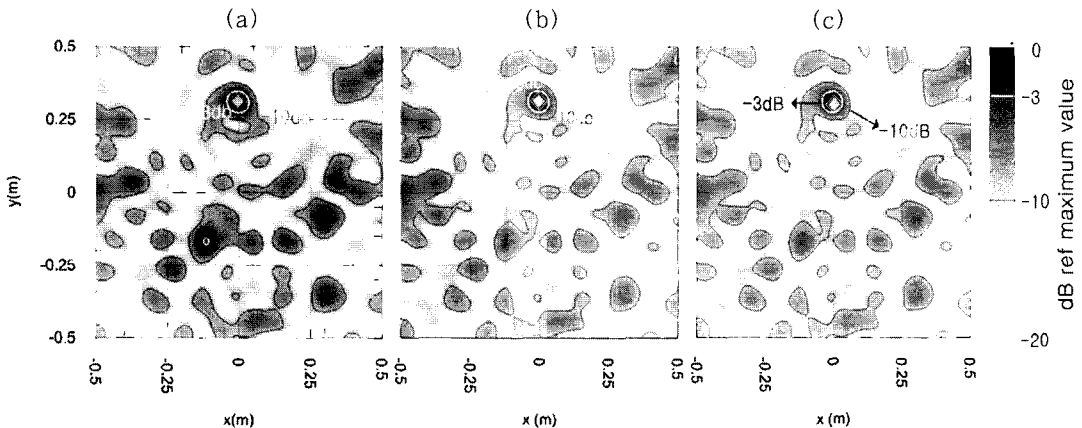


Fig. 6 Beamforming results for a stationary source [5 kHz, 0 rpm] located at (0.0 m, 0.3 m) using (a) STASI, (b) BROSI and (c) FROSI. Distance between array and source is 1.0 m

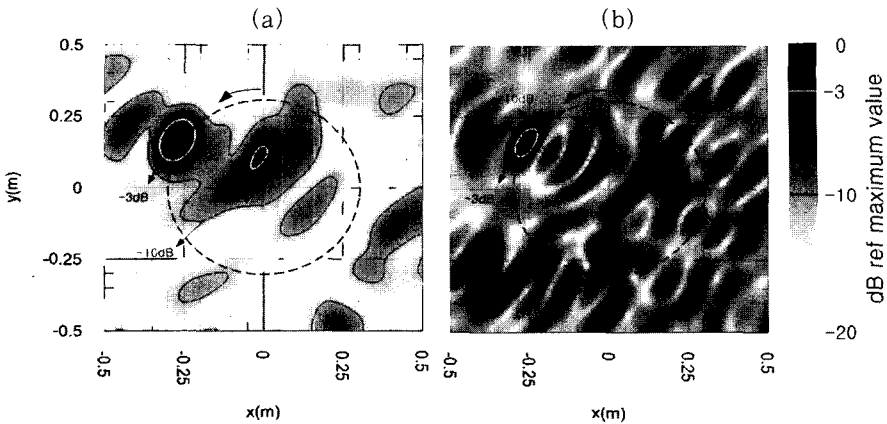


Fig. 7 Beamforming results by application of STASI on rotating(400 rpm) source (a) 3 kHz, (b) 5 kHz. Distance is 1.0 m

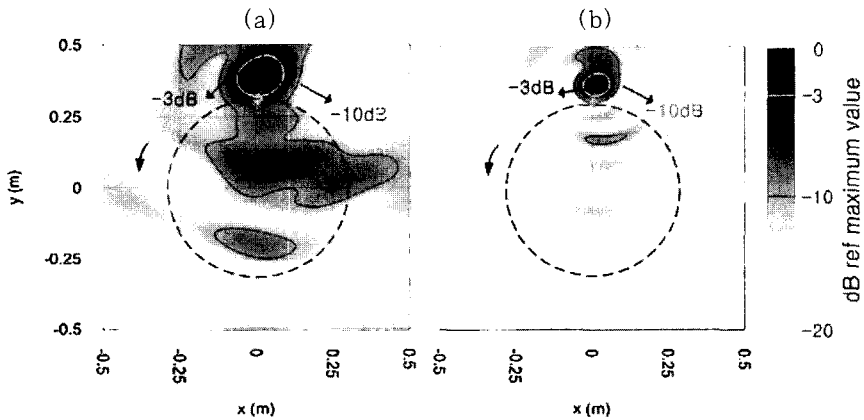


Fig. 8 Beamforming results by application of BROSI on rotating(400 rpm) source (a) 3 kHz, (b) 5 kHz. Distance is 1.0 m

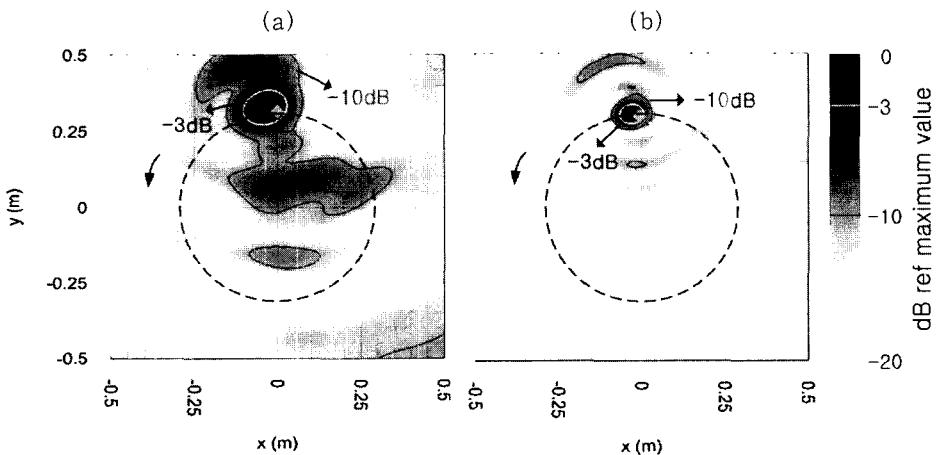


Fig. 9 Beamforming results by application of FROSI on rotating(400 rpm) source (a) 3 kHz, (b) 5 kHz. Distance is 1.0 m

도플러 효과를 제거되지 않음으로 해서 사이드롭의 효과가 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 동일한 실험 조건에서의 BROSI와 FROSI의 결과를 보여주고 있다. FROSI의 경우는 트리거 신호의 위치(12시 방향)에서 음원이 존재함을 정확히 보여주고 있으나, BROSI의 결과에서는 음원이 궤적을 반경방향으로 약간 벗어나 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 7에서의 결과와는 달리 도플러 효과가 제거됨에 따라 두 가지 경우 공통적으로 사이드롭의 영향이 많이 감소하였음을 확인할 수 있다.

FROSI의 경우와 달리 BROSI의 경우 소음원의 위치가 궤적에서 벗어나 있는 것으로 측정되는 이유는, 도플러 효과를 고려하기 위하여 사용된 알고리즘의

차이에 원인이 있다.

BROSI의 경우 신호가 측정된 시간으로부터 음원까지의 거리를 이용, 음파가 음원에서 발생된 시간을 역으로 추정하는데, 이때 소음원이 궤적을 따라 회전운동 하는 것이 아닌 매 순간마다 직선운동을 하는 것으로 가정하기 때문이다. Fig. 1에서 음원이 ㉓지점에 있을 때를 시간  $t_e$ 라 하고 이때 음원을 출발한 음파가 마이크로폰에 도달한 시간  $t_r$ 에 실제 음원은 회전운동을 하여 ㉔의 위치에 도달하게 되나, 식 (2)에서는 소음원이 매 순간 직선운동을 하는 것으로 보고 ㉓의 위치에 도달하는 것으로 가정하기 때문이다. BROSI 알고리즘은 1차원 직선운동을 하는 자동차나 기차와 같은 소음원에 대하여 적용되어 왔으나, 회전하는 소음원인 경우에는 적용이 어려움을 알 수 있다.

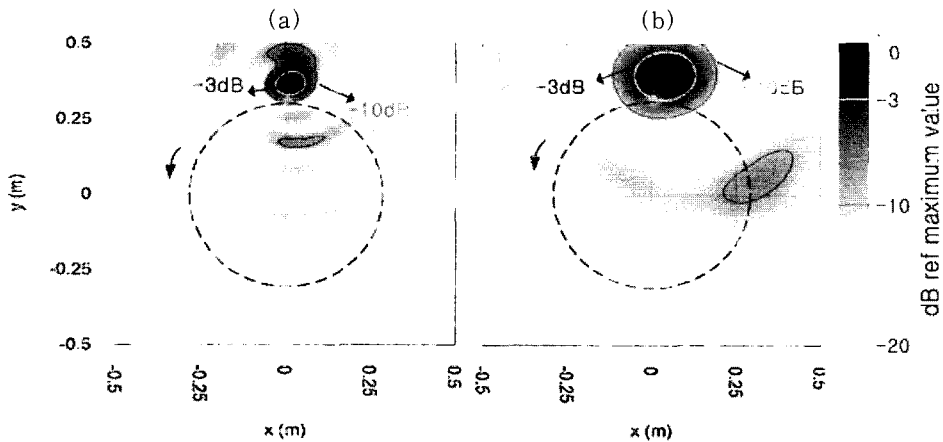


Fig. 10 Beamforming results by application of BROSI on rotating(400 rpm) source of 5 kHz. Distances is (a) 1.0 m and (b) 2.0 m

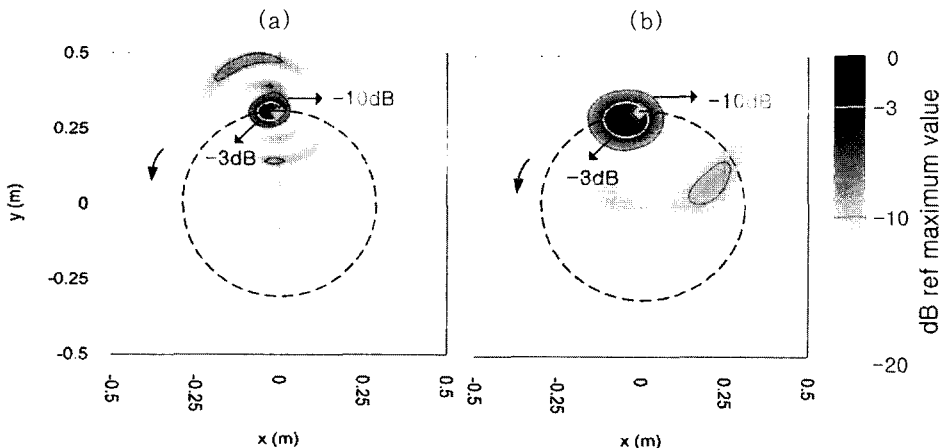


Fig. 11 Beamforming results by application of FROSI on rotating(400 rpm) source of 5 kHz. (a)  $d=1.0$  m and (b)  $d=2.0$  m

Fig. 10과 Fig. 11은 음원과 어레이까지의 거리를 1 m와 2 m로 변화시켜 측정된 경우로서 이때 주파수 5 kHz, 회전수 400 rpm인 동일한 소음원의 경우에 대하여 BROSI와 FROSI를 적용한 결과를 각각 비교하였다. BROSI의 해석결과에서는 측정거리가 멀어질수록 공간분해능도 떨어지고, 음원의 위치도 반경방향으로 좀 더 많이 벗어남을 보여주고 있으나, FROSI의 결과에서는 거리에 따라 분해능은 감소하나 음원의 위치는 거리에 관계없이 정확하게 계측됨을 알 수 있다. 이는 BROSI의 경우 음원으로부터 마이크로폰까지 거리가 길어지면 음파가 도달하는 시간도 길어지고, 따라서 이 시간 동안 음원이 직선 운동한 것으로 가정하는 BROSI의 경우는 오차가 더 커지기 때

문이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 관심 주파수 5 kHz에 대한 음원으로부터의 거리를 1 m로 고정한 뒤, 회전속도를 150 rpm과 400 rpm으로 한 경우에 대해 BROSI와 FROSI의 결과를 비교한 것이다. 두 경우의 결과가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있고 회전속도가 400 rpm인 경우 FROSI의 결과가 더 정확히 음원의 위치를 가리키고 있다. 또한, BROSI의 결과는 저회전수보다 고회전수에서 소음원의 위치가 궤적에서 보다 많이 벗어나는 것을 알 수 있으며, 이는 동일한 시간차에 대하여 회전속도가 빨라짐에 따라 소음원이 직선 이동한 거리가 더 크기 때문이다.

Fig. 14는 두 개의 같은 주파수 음원이 400 rpm으

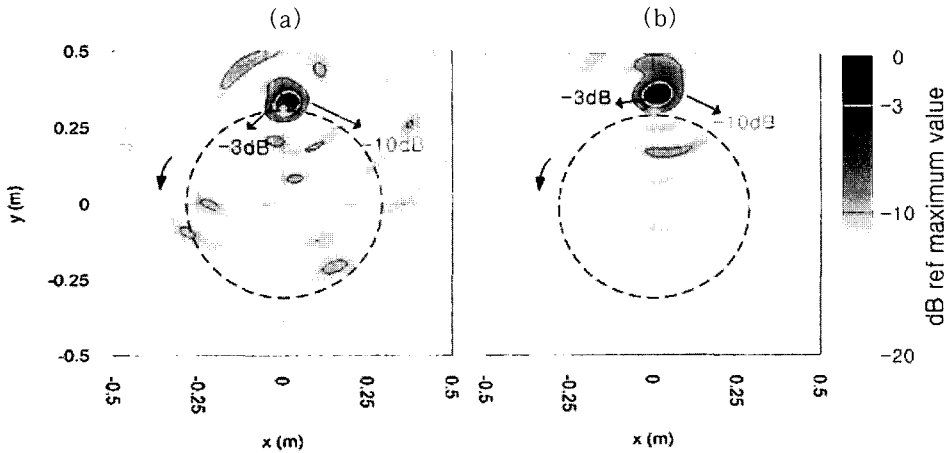


Fig. 12 Beamforming results by application of BROSI on rotating source of 5 kHz at (a) 151 rpm and (b) 399 rpm ( $d=1$  m)

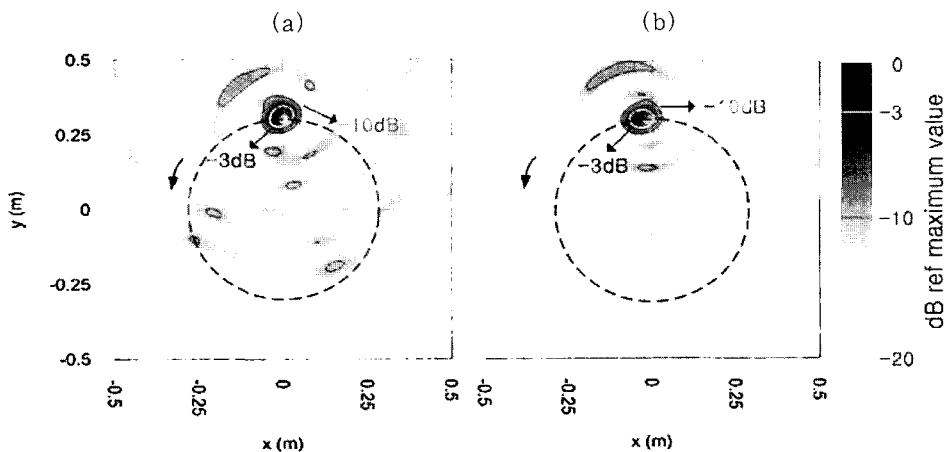


Fig. 13 Beamforming results by application of FROSI on rotating source of 5 kHz. (a) 151 rpm and (b) 399 rpm ( $d=1$  m)

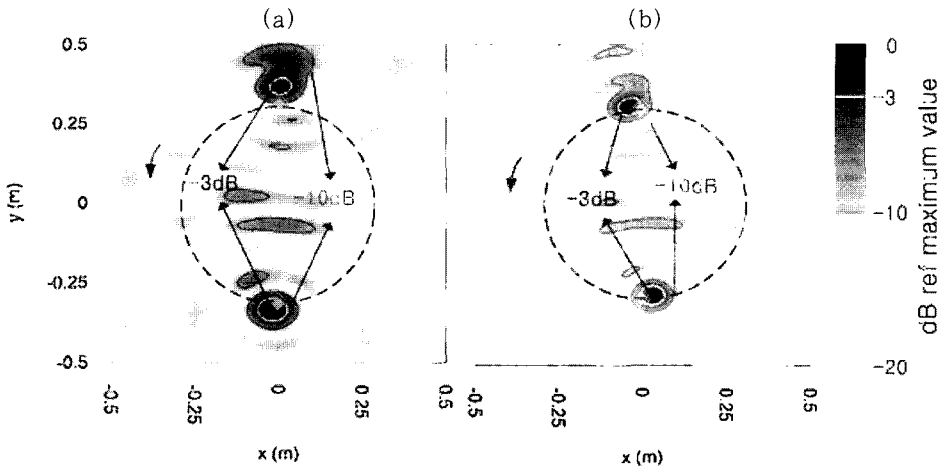


Fig. 14 Beamforming results by application of (a) BROSI and (b) FROSI on rotating(400 rpm) two sources of 5 kHz. Distances is 1.0 m

로 회전하는 경우에 BROSI와 FROSI의 결과를 비교하여 보여주고 있다. 이경우도 역시 FROSI의 결과가 더 정확한 음원의 위치를 보이고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

회전하는 소음원으로부터 측정된 신호의 스펙트럼으로부터 도플러 효과를 확인할 수 있었으며, 회전하는 음원에 대한 빔형성기법(STASI)을 적용하면 정확한 위치판별이 어려움을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 도플러 효과를 제거한 후, 빔형성법을 이용하여 회전하는 소음원의 위치판별에 적용하기위하여 사용된 FROSI 방법과 BROSI 방법의 장단점을 비교하였다. 이 과정에서 계산에 필요한 정보로는 음원의 회전속도와 마이크로폰 좌표의 좌표, 회전면과 어레이평면과의 상대적인 거리에 대한 정확한 정보가 필요하다.

이 연구를 통해 기존에 직선 운동하는 물체에 적용되던 BROSI 방법은 회전하는 음원에 대하여 적용하는 경우 음원이 직선운동 하는 것으로 가정하는 이유로 오차가 발생하였으며, 이는 회전속도나 거리에 의해서도 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 반면 FROSI의 경우는 회전속도와 거리에 관계없이 만족할 만한 성능을 보였으며, 두 개의 동일주파수 소음원에 대한 실험에서도 각각의 위치를 정확히 분별할 수 있음을 확인하였다.

또한, FROSI의 경우 도플러효과를 제거하는 과정

에 필요한 계산 시간이 BROSI의 경우보다 훨씬 짧은 장점을 가지고 있으며, 회전하는 음원의 위치를 트리거 위치로부터 직접 확인할 수 있는 장점이 있다. 그러나 BROSI의 경우는 측정시간을 기준으로 함으로서 트리거 신호와 회전체의 상대적 위치를 정확히 파악하기 어렵다.

## 후 기

이 연구(논문)는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트무인기기술개발)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, Array Signal Processing: Concepts and Techniques, Prentice-Hall.
- (2) Thomas J. M., Aeroacoustic Measurements, pp.104~113.
- (3) Dowling, A. P. and Ffowcs Williams, J. E., Sound and Sources of Sound, 1983, Ellis Horwood, Chichester, England UK, Chap.9, pp.187~192
- (4) Takata, H., Nishi, T., Kook, H., Moebis, G., Davies, P. and Bolton, J S., 2000, Visualization Techniques to Identify and Quantify Sources and Paths of Exterior Noise Radiated from Stationary



and Nonstationary Vehicles, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress.

(5) Sijtsma, P., Oerlemans, S. and Holthusen, H., 2001, Location of Rotating Sources by Phased Array Measurements, 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Maastricht, The Netherlands, on 28~30.

(6) Howeel, A. J., Bradley, M. A., McCormick, M. A. and Brown, J. D., 1986, De-Dopplerization

and Acoustic Imaging of Aircraft Flyover Noise Measurements, Journal of Sound and Vibration, Vol. 105, No. 1, pp. 151~167.

(7) Kook, H., Moebs, G. B., Davies, P. and Bolton, J. S., An Efficient Procedure for Visualizing the Sound Field Radiated by Vehicles During Standardized Passby Tests, Accepted for Publication in the Journal of Sound and Vibration.