한국소음진동공학회논문집 제 16 권 제 6 호, pp. 565~573, 2006.

# 마이크로폰 어레이를 이용한 회전하는 소음원 가시화에 관한 연구#

# Study for Visualization of Rotating Sound Source Using Microphone Array

이 욱* · 박 성** · 이 재 형*** · 최 종 수† · 김 재 무****

Wook Rhee, Sung Park, Jahyung Lee, Jong-soo Choi and Jaimoo Kim

(2005년 11월 2일 접수 ; 2006년 5월 12일 심사완료)

Key Words : Rotating Source(회전하는 음원), Doppler Effect(도플러 효과), Signal Reconstruction(신호 재구성), Time Domain Beamforming(시간영역 빔형성기법), Source Localization(소음원 위치규명)

## ABSTRACT

Acoustic analysis of a moving sound source required that the measured sound signals be de-Dopplerized and restored as of the original emission signals. The purpose of this research is development of beamforming technique can be applied to the rotor noise source identification. For the de-Dopplerization and reconstruction of emitted sound wave, Forward Propagation Method is applied to the time domain beamforming technique. And validation test were performed using rotating sound source constructed by bended pipe and horn driver. In the validation test using sinusoidal sound wave, sufficient performance of signal processing can be seen, and the effect of measuring duration for accuracy was compared. In the prop-rotor measurements, the acoustic source locations were successfully verified in varying positions for different frequencies and collective pitch angle, in hover condition.

## 1. 서 론

운송수단의 정숙성 요구 증대에 따라 개발단계에서의 공력음향학적 연구의 중요성이 증대되고 있으며 이에 따라 소음원의 가시화와 이의 제어를 통한 소음의 저감이 대표적인 연구기법으로 사용되고 있다. 마이크로폰 어레이를 이용한 빔형성 기법은 공력음향학 연구에서 중요한 실험 기법으로 자리잡고 있으며, 빔형성 기법의 경우 다양한 분야의 공력음향학적 실험에서 좋은 성과를 내어 이제는 표준화되고 있는 추세이다.[1]

이러한 소음원 가시화 기법을 이동하는 소음원에 적용하기 위해서는 해당 조건에서 발생하는 도플러 효과에 대한 적절한 보정방법을 필요로 하게 된다. 회전하는 소음원을 단일 소음원으로 간주할 경우 도플러 효과에 대한 고려는 불필요하나 이를 회전면상의 별도의 소음원으로 가정하고, 이의 발생 위치를 규명하기 위해서는 수신된 음향학적 신호에 대한 처리를 통하여 도플러 효과에 의한 주파수 교란등의 현상을 보상해 주어야 한다.

도플러 효과 제거기법은 항공기나 자동차, 고속전철 등의 통과소음 연구 분야에서 도입되어져 사용되고 왔으며, Sijtsma 등은 헬리콥터나 풍력발전 설비

† 책임저자 ; 정회원, 충남대학교 항공우주공학과
E-mail : jchoi@cnu.ac.kr
Tel : (042) 821-6683, Fax : (042) 825-9225
* 정회원, 충남대학교 대학원 항공우주공학과
** 넥스원퓨처(주)
*** 정회원, 팬실배니아주립대 대학원 항공우주공학과
**** 한국항공우주연구원

# 이 논문은 2005년 추계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

등의 회전하는 로터 블레이드상의 회전원의 위치 가시화를 위하여 도플러 효과 제거기법을 도입하였다.[2] 이러한 연구에서 데이터의 처리는 주파수 영역에서의 보상방법을 주로 사용하고 있다. 본 연구에서는 도플러 효과를 제거하여 신호의 위상과 진폭을 보상하기 위하여 다른 연구에서와는 달리 시간영역에 대한 신호처리 기법을 적용하였다. 개발된 빔형성기법에 대한 검증을 위하여 회전하는 단극자 모델을 제작하여 검증 실험을 수행하였으며 이를 축소 프롭로터 모형에 대한 소음원 분포를 가시화에 적용하였다. 해당 실험은 충남대학교 소형 공력무향풍동의 무향실에서 수행하였으며 프롭로터 실험의 경우 정지비행 조건에 대하여 수행하였다.

## 2. 빔형성기법에서의 도플러효과 제거

움직이는 음원이 형성하는 음장의 경우 도플러 효과의 제거를 위한 신호 재구성이 필요하게 된다. 즉, 수신된 마이크로폰의 신호를 음원의 운동을 따라 변화하는 발신 위치와의 거리관계에 의하여 보정하여 위상과 진폭을 수정하는 방법을 적용할 수 있다. 이와 같은 보정을 통하여 수신된 신호는 정지된 음원에서 측정된 것과 같은 결과로 수정되게 된다.

### 2.1 회전하는 음원의 모델링

Fig. 1은 회전하는 소음원에서 발생하는 음파의 전달 경로를 나타내고 있다. 반경, $\vec{r}$의 위치에 존재하는 소음원이 각속도, $\omega$로 회전할 경우, 특정 시간, $t$에서의 가상 소음원의 위치, $\vec{x}_s$는 다음과 같이 표현할 수 있다. 이때 $\vec{x}_0$는 초기 소음원 위치이다.

$$\vec{x}_s = \vec{x}_0 + \vec{r}\omega t \tag{1}$$

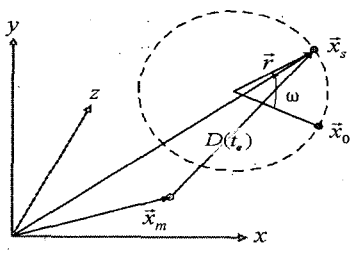



Fig. 1 A microphone is measuring a rotating sound source

발신시각, $t_e$ 에 발생한 음파의 이동거리는 $\vec{x}_s$와 $m$번째 마이크로폰의 위치인 $\vec{x}_m$ 로부터 계산할 수 있는데, 여기에서 도달시각, $t_r$과의 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다. 이때 $c_0$는 음속이다.

$$t_r - t_e = \frac{|\vec{x}_s - \vec{x}_m|}{c_0} = \frac{D(t_e)}{c_0} \tag{2}$$

이를 통하여 음원의 운동이 주어져 있을 때 이동거리와 시간을 계산할 수 있으며, 발신시간과 수신시간간의 관계를 각 수신 신호점에 대하여 계산 할 수 있다. 이러한 음원 모델링 방법을 전방 전파 방법(forward propagation method)라 부르며 이에 대하여 다음절에서 설명 하도록 한다.

### 2.2 Signal Reconstruction

수신 신호의 재구성 방법은 이동 거리 계산의 방향에 따라서 전방 전파법(forward propagation method)과 후방 전파법(backward propagation method)로 구분할 수 있다.[3]

전방 전파법의 경우 발신 시간벡터상의 시간 스텝을 기준으로 수신 신호를 발신 신호로 재구성 하는 방법이다. 이를 적용하기 위하여 각 발신 시간스텝에 대한 음파의 전파거리를 계산하는데, 이러한 보상은 Fig. 2의 (a)와 같이 특정위치의 마이크로폰에서 일정 시간간격으로 측정된 음압데이터를 활용한다. 빔형성기법에 의하여 소음원의 분포를 계산할 가상음장을 회전하는 소음의 운동에 따라 동일한 속

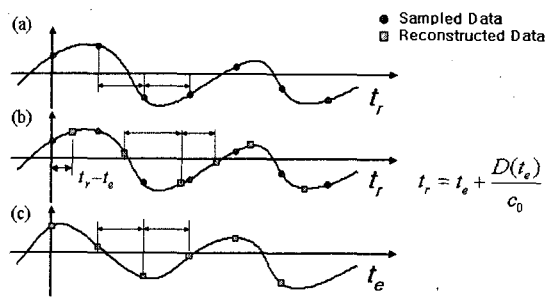



Fig. 2 The forward propagation method of signals from a moving sound source : (a) measured acoustic signal in $t_r$ (equally spaced), (b) reconstructed signal in $t_r$ (non-equally spaced), (c) reconstructed signal in te (equally spaced)

도로 회전하는 것으로 간주할 경우, 특정 시각의 가상음장상의 한 점과 마이크로폰 사이의 거리를 계산할 수 있다. 이러한 거리차이와 음속을 이용하면, 발신시각과 수신시각의 차이를 계산할 수 있다. $t_e$에 발생한 $t_r$로부터 위에서 계산된 거리차이에 의한 지연시간 후 도달하게 되므로, 특정 시각에 발생된 음압신호는 Fig. 2(b)에서와 같이 측정된 데이터의 내삽에 의하여 구해질 수 있다. 하지만 이렇게 내삽으로 계산된 데이터는 수신 시간축에 대해서는 도플러 효과에 의하여 동일 시간간격이 되지 못하여 바로 FFT 등 후처리 연산에 적용될 수 없다. 하지만 Fig. 2(c)와 같이 발신 시간축에 대하여는 일정 시간간격을 이루게 되므로 발신 시간축을 기준으로 하여 후처리에 사용될 수 있다. 또한 이때 발신 신호에 대한 수신신호의 진폭 차이는 구면파 가정을 적용하여, 거리의 차이에 반비례하는 것으로 생각하고, 이를 보상해 주었다.

후방 전파방법은 수신 시간벡터상의 시간스텝을 기준으로 발신신호를 수신신호로 재구성 하는 방법이다. 수신 시간벡터는 자료 취득 시간과 같이 일정 시간간격을 지닌다. 이때 해당 수신 시간에 마이크로폰에 도달한 음파의 발신 시간 벡터는 이동 거리에 의하여 계산할 수 있다. 계산된 수신 시간벡터는 일정하지 않은 간격으로 계산되며, 이에 대하여도 마찬가지로, 등간격으로의 재구성을 필요로 하게 되며 앞서서와 같이 내삽법을 활용한다.

후방 전파법을 회전하는 소음원에 대하여 적용하기 위해서는 추가적인 고려사항이 있다. 이 경우 음원의 운동은 이동 경로에 대한 접선방향 벡터로 가정되는데 이는 해당음파가 다음 시간 스텝에서는 음원의 이동경로를 이탈하게 됨을 의미한다. 이러한 음원운동의 가정은 통과소음과 같이 직선운동을 하는 소음원의 적용에는 타당하나 이 연구와 같이 회전하는 음원의 경우에 대해서는 적용 시 소음원 추정의 정확도가 감소하게 된다.[4]

이러한 재구성 방법의 적용을 위해서는 음원의 운동은 일정 평면상에서 이루어지는 것으로 가정하는 것이 필요로 한데, 음원을 따라 이동하는 가상 소음원이 위치한 평면을 재구성 평면이라 부른다. 또한 마이크로폰이 설치된 평면, 즉 측정 평면의 경우 시간에 따라 변화하지 않는 고정면으로 간주 한다. 이러한 측정 평면과 재구성 평면의 공간상의 관계에 의하여 음원의 위치를 표현할 수 있으며 이러한 신호의 재구성 방법을 통하여 빔형성 기법을 적용할 수 있다.

### 2.3 주파수 영역과 시간영역에서의 빔형성기법

시간영역에서의 빔형성 기법은 아날로그 방식에 의하여 위상보정과 수신신호의 합을 시간축 상에서 수행하는 것이다. 과거 레이더 신호처리 등에 활용되던 이 방식은 회로적 방법에 의하여 구현될 수도 있으나 이 연구에서는 시간축 상에서의 신호처리를 통하여 이를 구현 하였다. 수신된 음압 신호는 이동시간 정보를 활용하여 재구성 한다. 시간축 상에서의 위상차와 진폭 보상을 수행하고, 모든 마이크로폰의 보정된 신호를 합하여 가상 음원의 파형을 구성하고 이에 대한 주파수 분석을 통하여 특정 주파수에서의 빔파워맵을 형성하게 된다. 이러한 신호 재구성를 통하여 실제 음원이 존재하는 위치에 대해서는 정확한 위상각 보정이 이루어져 해당 신호가 증폭, 높은 빔파워를 나타내게 되며, 소음원이 존재하지 않는 점에 대해서는 위상각 차이에 의한 상쇄에 따라 낮은 빔파워를 나타내고 이로 부터 실제 소음원의 위치를 추정하게 된다.[5]

주파수 영역에서의 빔형성 기법은 각 마이크로폰 수신신호로부터 구해진 교차상관함수 행렬, $G$로부터 계산하게 되는데 다음은 일반적인 빔형성 기법을 행렬식으로 표현한 것이다. 이 경우 빔파워, $P$는 측정평면과 재구성 평면의 공간상의 상관관계에 의하여 정의되어지는 조향 행렬, $E$에 대한 식 (3)과 같은 행렬계산을 통하여 얻어지게 되며, 회전하는 음장에 대한 가정 등은 조향행렬의 모델링 방법에 따라 다르게 적용할 수 있다.

$$P = E^{*}GE \tag{3}$$

참고문헌 (1)에는 이러한 빔형성 기법을 기술하고 있는데, 이 논문에서는 2.2절에서 설명한 방식의 신호 재구성기법을 적용한 시간영역에서의 빔형성기법을 적용하였으므로 이에 대한 상세한 내용은 생략하도록 한다.

## 3. 개발 코드의 검증

이 연구에서는 회전하는 소음원에 대한 빔형성 기

법의 적용을 위해서 시간 영역에서의 전방 전파법을 활용한 마이크로폰 어레이 측정 프로그램을 개발하였다. 개발 코드에 대한 검증을 위하여 스피커를 이용하여 구현한 점음원에 대한 빔파워맵을 시간 영역 방법과 기존의 주파수 영역 방법을 이용하여 계산, 비교하였다. 관련 실험은 충남대 항공우주공학과 보유 소형 공력음향풍동의 무향실에서 수행하였으며 마이크로폰 어레이의 형상은 크기 1.6 m의 2차원 나선형 어레이 형상을 적용하였다. 이때 2차원 나선형 어레이의 경우 Dougherty에 의하여 제안되었으며 한정된 수량의 마이크로폰에 대하여 거리차이에 대한 중복성을 배제하여 부엽저감능력을 향상 시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.[1] 31개의 1/4″ 피에조 타입 마이크로폰(MG M360)을 사용한 어레이의 출력 신호는 32 Ch 동시 샘플링이 가능한 자료취득 장치 (NI PXI-4472)와 LabVIEW 7을 이용, 구성하였으며 각 신호에 대한 후처리 프로그램 역시 LabVIEW를 이용, 구현하였다.

제작된 시간영역에서의 빔형성기법의 정확성을 검증하기 위하여 고정된 소음원에 대한 측정결과를 주파수영역기법을 이용한 경우와 비교하였다. 이때 현재 본교에서 개발된 주파수 영역기법의 경우 회전하는 음원에 대한 적용이 불가능하기 때문에 고정된 음원조건에 대하여 이를 비교하였다. 어레이 측정에서 음원의 위치는 측정 평면에서 0.65 m 만큼 이격 시키고 주파수 2 kHz의 사인파를 인가하여 그 계산 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3의 시간영역과 주파수 영역 방법을 통한 계산 결과를 살펴보면 서로 다른 음원위치에 대한 계산결과에서 빔파워 맵상에서의 최대 음압치의 위치로 추정할 수 있는 소음원의 위치가 주파수 및 시간영역 방법 모두 동일한 결과를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 또한 어레이 측정의 성능을 의미하는 빔폭과 부엽 저감능력도 2 kHz의 주파수에 대하여 만족할 만한 수준임을 확인 하였다.

## 4. 개발 코드의 적용

### 4.1 회전하는 점음원에 대한 빔형성

개발한 시간 영역에서의 빔형성 기법을 회전하는

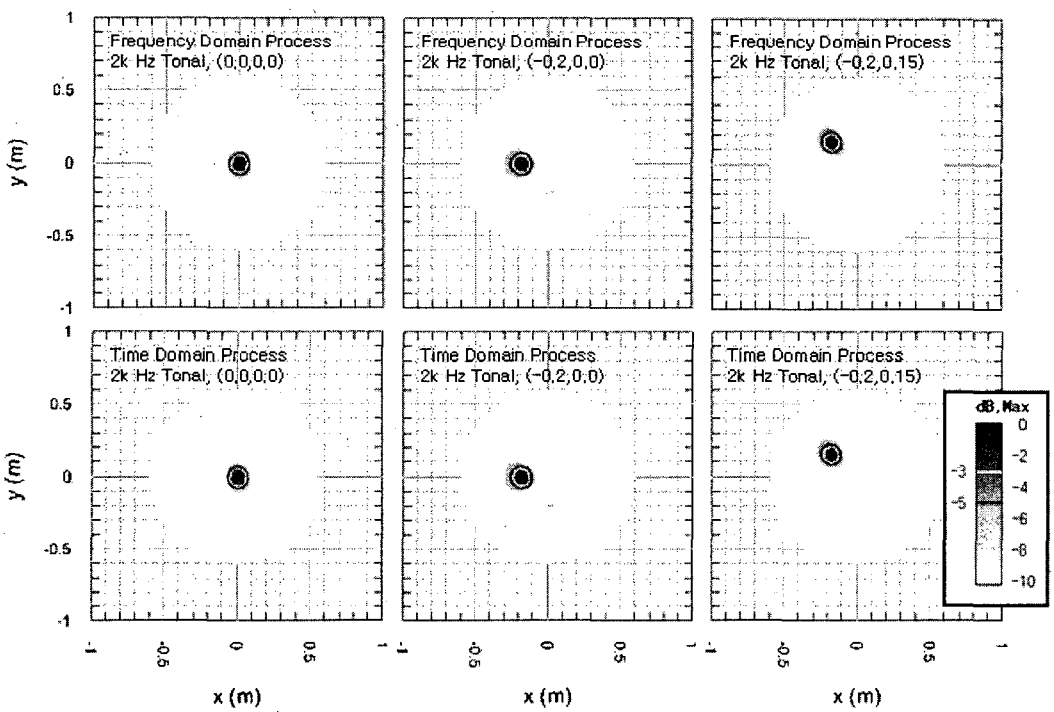
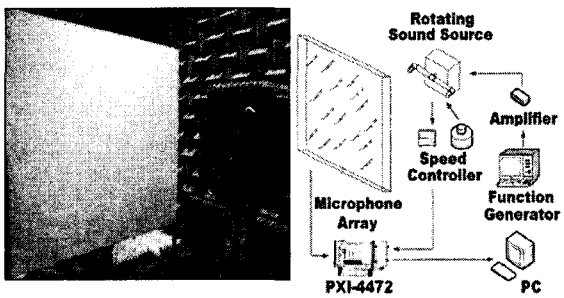
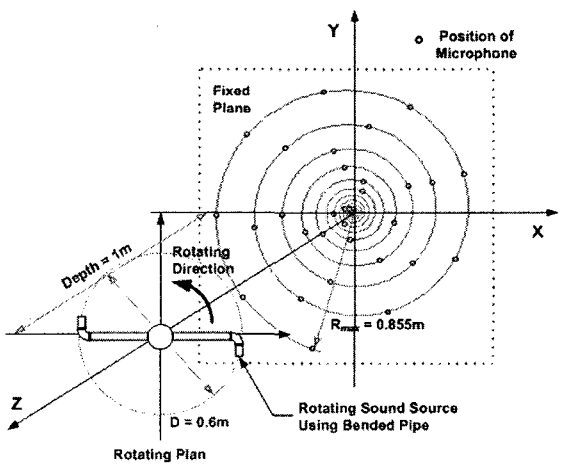



Fig. 3 Results of time domain beamforming (lower row) & frequency domain beamforming (upper row). The frequency of interest was 2 kHz and source locations were changed

음원에 대하여 적용하여 보았다. 회전하는 점음원의 구현을 위해서 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 스피커와 모터에 의하여 구동되는 파이프를 활용하여 구현한 음원 모델에 대한 실험을 수행 하였다. 음원 모델에서 스피커에서 발생한 음파는 L자로 성형한 파이프를 따라 전파되며 원하는 반경상의 위치에서 음장 중으로 노출 되도록 하고, AC 모터에 의하여 파이프 구조물을 회전시켜 이의 회전수를 조절할 수 있도록 구현하였다. 장치의 관련 부품들은 잡음 방지를 위하여 흡음처리 된 상자 내부로 수납하였으며, 상자 벽면에서의 음파 반사를 막기 위하여 흡음재를 활용하였다. 이때 회전하는 음원의 직경은 0.6m 이며, 고정된 마이크로폰의 측정 평면과 재구성 평면인 음원의 회전면 사이의 거리는 1 m 로 하였다.




(a) The array measurement of the rotating sound sources (left) and the experimental schematic (right)




(b) Layout of rotating sound source and arrangement of microphones

Fig. 4 Arrangement of test setup

각 마이크로폰의 수신 데이터는 16,384 Hz로 샘플링 하였으며 102400개의 데이터를 연속 측정/저장 하였다. 저장 데이터에 대한 분석에서, FFT 연산은 회전축에 설치된 트리거 신호를 기준으로 하여 20회 조화 평균 처리 하였다.

Fig. 5는 개발된 빔형성 기법에서 도플러 효과 제거 사용 여부에 따른 빔파워맵의 차이를 도시한 것이다. 음원의 회전에 따른 도플러 효과를 제거하지 않을 경우의 빔파워 맵은 회전면 상에 존재하는 점음원의 위치를 추정하지 못하고 회전면 상에 고르게 분포하는 것처럼 계산되고 있다. 하지만 전방 전파법을 활용한 계산 결과에서는 장치에 설치된 2개의 소음원의 위치를 정확하게 추정하고 있다. 발생 주파수에 따라 낮은 주파수에 대해서는 빔폭이 크고 주파수 증가에 따라 현저히 작아지며 부엽의 경우 주파수에 따라 서서히 증가함을 볼 수 있는데, 이는 고정된 음원에서의 빔형성에서도 볼 수 있는 마이크로폰 어레이 형상에 의한 특성이다.

Fig. 6은 신호 재구성에 사용한 데이터의 트리거와의 상대 위치 차이에 따른 빔형성 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 서로 다른 트리거 위치에서 계산된 결과는 동일 소음원에 대하여 서로 다른 빔파워맵을 나타내고 있다. 이러한 특성은 계산에 사용한 시간열 데이터의 회전면 상에서의 위치차이에 의한 것으로 보이는데, 그림의 좌측 4개의 경우는 사용 시간열 데이터는 512개로 약 1/4회전에 해당하는 시간의 값을 사용한 것이다. 1회전 보다 작은 시간의 데이터를 활용하는 경우 회전면 상에서 측정면과의 상대 위치의 차이에 따라 서로 다른 빔파워맵을 나타내는 것으로 판단되며, 이러한 특성은 그림 우측의 약 1회전에 해당하는 시간 값을 사용한 결과에서 개선됨을 볼 수 있다. 우측 그림의 각각은 다른 샘플링 속도와 데이터 개수를 사용하여 1회전에 해당하는 시간 데이터를 활용, 계산한 결과를 나타내고 있는데, 이를 통하여 회전하는 소음원의 경우 1회전에 해당하는 시간열 데이터를 사용하여야 함을 확인할 수 있다.

어레이 계산에서 가상 소음원과 각 마이크로폰 사이의 거리에 대한 공간상의 반복성은 빔폭을 증가시키는 특성을 보이는데, 이러한 반복성에 의한 영향은 입사각의 조절을 통해 개선될 수 있다. 측정 평

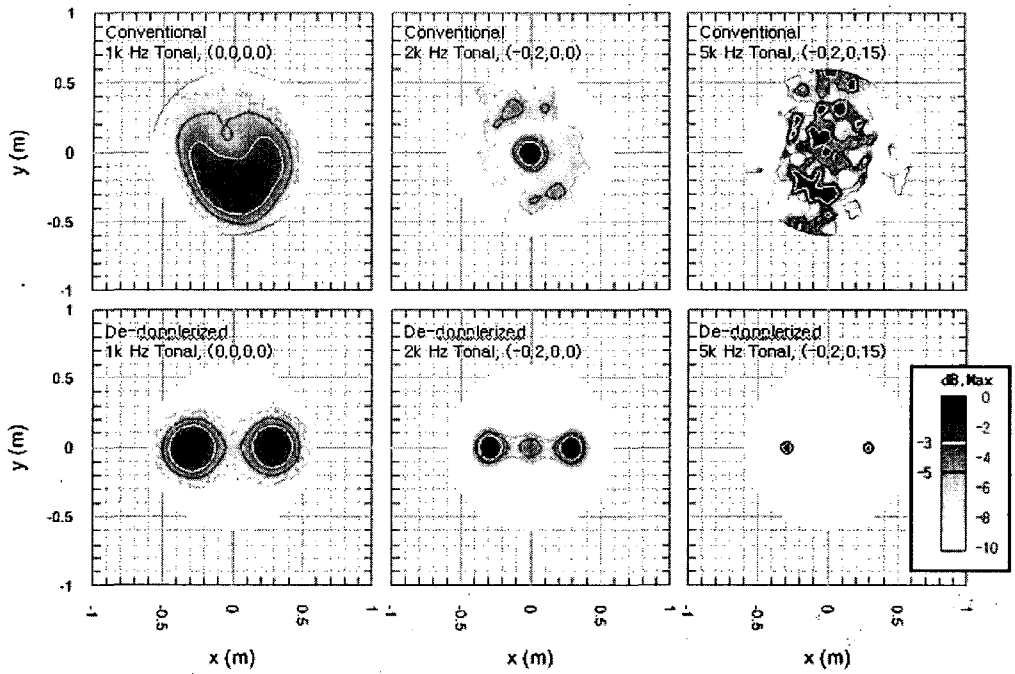



Fig. 5 Comparisons of power distributions of the time domain beamforming without (upper) and with the signal reconstruction (lower) on the rotating sources (540 rpm) : 1 kHz (left column), 2 kHz and 5 kHz

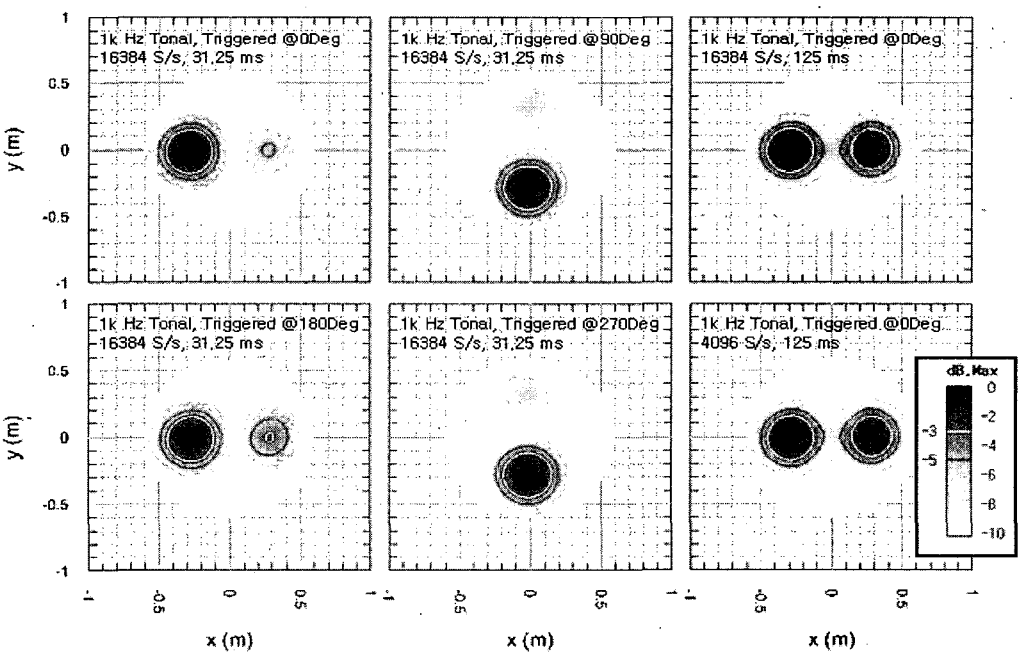



Fig. 6 The 1 kHz sound source power distribution under the conditions of varying trigger locations and the processed data sizes : from upper left, clockwise (a) trigger location=3 o'clock, Ndata=512, (b) 6 o'clock, Ndata=512, (c) 3 o'clock, Ndata=2048, (d) 3 o'clock, Ndata=512, (e) 12 o'clock, Ndata=512, (f) 9 o'clock, Ndata=512

면과 회전면 사이의 각으로 정의 되는 입사각을 증가시킬 경우 각 마이크로폰과 가상음원 사이의 거리의 반복성은 감소하게 되는데, 회전면(재구성 평면)을 고정한 상태에서 0, 30, 60, 90도로 변화하며 실험을 수행하고 계산 빔파워맵을 비교하여 입사각에 의한 특성을 확인 하였다.

Fig. 7의 입사각 변화에 따른 측정 결과에서 각 주파수에서의 빔폭은 입사각 증가에 따라서 좁아지는 결과를 볼 수 있다. 측정 평면과 회전면이 평행인 0도의 경우 센서와 음원사이의 거리는 상대적으로 유사한 값을 지니게 되지만, 입사각의 증가에 따라 이러한 반복성이 감소하여 빔폭 특성이 개선됨을 확인할 수 있다. 하지만 상대적으로 부엽특성의 경우 나빠지는 경향이 있으므로 측정 조건에 따라 적절한 입사각의 설정을 통해서 측정 정밀도를 최적화하는 방법을 사용하여야 할 것이다.

### 4.2 프롭로터 모델에서의 빔형성 기법 적용

이 연구에서의 프롭로터 모델에 대한 실험은 한국항공우주연구원에서 진행 중인 스마트 무인기 개발과 관련하여 수행하였으며, 개발 무인기의 프롭로터의 소음특성 측정에 마이크로폰 어레이 기법을 적용

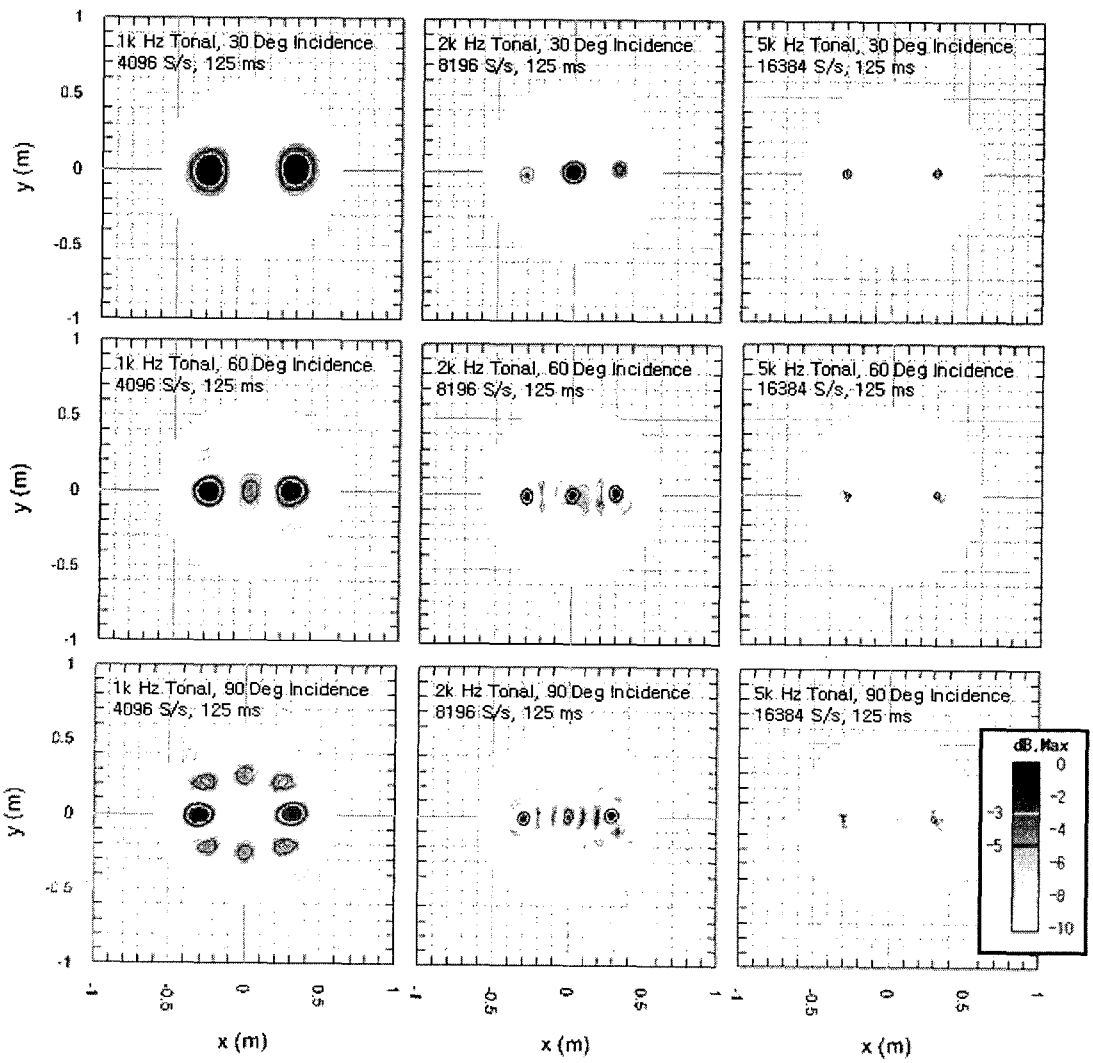



Fig. 7 Power distributions of the rotating 1 kHz sinusoidal sound source with varying incidence angle, $\theta = 30^{\circ}$ (1st row), $\theta = 60^{\circ}$ (2nd row) and $\theta = 90^{\circ}$ (3rd row)

하기 위한 목적으로 수행하였다. 이를 위하여 개발 로터 형상에 대한 25 % 축소모델을 제작하였다. 관련 소음특성 측정은 정지비행 상태에서 수행하였고, 로터의 회전속도는 2000 rpm 이며, 일괄 피치각 조건은 0, 6, 12도의 결과를 비교하였다.

프롭로터 모델에 대하여 측정에서 로터 깃통과 주파수(blade passage frequency)인 100 Hz에 대하여 10,20, 50배 하모닉 성분의 주파수에 대한 관찰하였다. 그림에서 3개의 로터 깃에서 발생하는 소음원의 위치를 보여주고는 있으나 낮은 주파수에 대하여는 회전면 상에서의 소음원 위치 차이를 구분

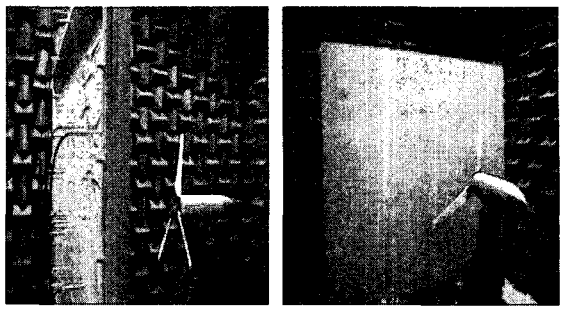


Fig. 8 The array measurement on a scale-down prop-rotor was done in CNU semi-anechoic chamber

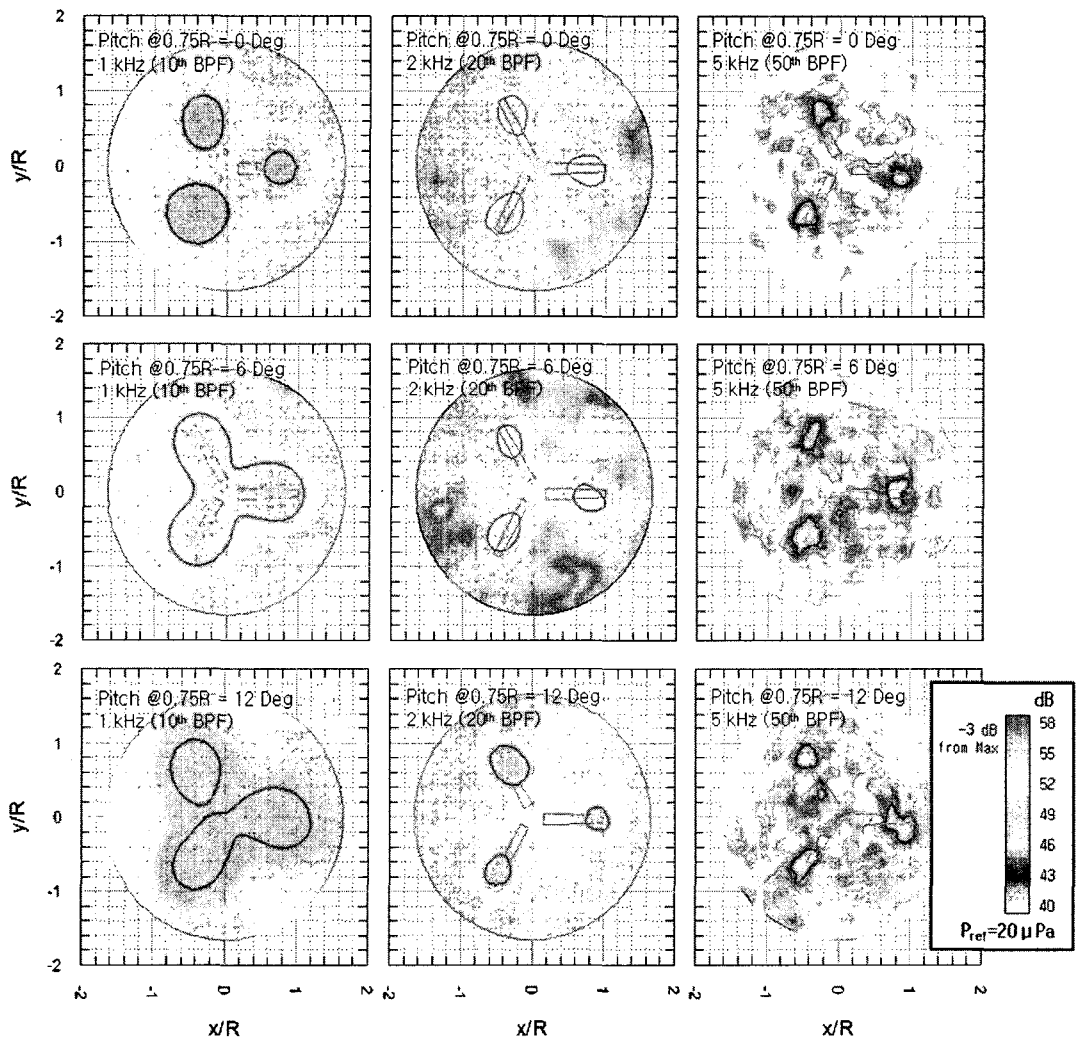



Fig. 9 The power distribution of scale-down prop-rotor. Pitch angles are 0 (upper), 6 and 12 degrees. Interesting frequencies are the 10th (1 kHz), 20th (2 kHz) and 50th harmonics (5 kHz) of BPF

할 수 있는 수준은 되지 못한다. 하지만 높은 주파수에 대해서는 만족한 만한 수준으로 소음원의 위치를 표시하고 있음을 볼 수 있다. 측정 빔파워 맵에서, 발생 소음의 레벨은 피치각 증가에 따라 증가함을 볼 수 있으며, 주파수에 따라 발생 소음의 위치와 크기가 변화하는 것으로 추정될 수 있다.

## 5. 결 론

시간영역에서의 도플러 효과 제거를 통한 빔형성 기법을 적용하여 마이크로폰 어레이 측정방법을 개발하고 회전하는 소음원의 위치추정에 적용하였다. 스피커와 파이프를 이용하여 구성한 모델에 대한 실험을 통하여 개발 측정 기법의 정확성을 검증하였으며 빔폭과 부엽특성등의 어레이 성능을 개선할 수 있는 어레이 형상 인자를 실험적 방법을 통하여 조사하고, 이를 프롭로터의 소음특성 측정에 활용하였다.

회전하는 단극자에 대한 실험을 통하여 측정된 시간열 데이터에 대하여 1회전에 해당하는 시간데이터를 사용할 경우 보다 안정적인 빔파워 맵을 얻을 수 있음을 볼 수 있었다. 하지만 이러한 측정 기법은 발생 소음특성이 회전에 따라 일정한 경우에만 적용가능하며, 소음특성이 회전면의 방위각에 따라 달라지는 경우에 대해서는 보다 신중한 적용을 필요로 할 것으로 판단된다. 입사각의 변화에 따른 빔파워 맵 비교를 통하여 적절한 입사각의 적용에 따라 어레이 성능은 개선될 수 있음을 확인하였으며 이는 측정 대상의 관심 주파수 등의 특성에 따른 어레이 형상의 최적화에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

틸트로터 개념의 무인기에 적용되는 프롭로터에 대한 축소모형 실험을 통하여 개발된 마이크로폰 어레이 측정기법의 활용 가능성을 볼 수 있었다. 하지만 발생 소음원의 주파수 특성에 따른 빔패턴의 형상 등에 대한 고려를 통하여 어레이 성능에 대한 추가적인 개선이 해당 모델에 대한 소음특성 분석을 위해서는 요구되리라 판단되며 추후 연구를 통하여 마이크로폰의 공간상의 배치나 입사각 등에 대한 최적화를 통하여 이를 개선하고자 한다.

## 후기

이 연구는 산업자원부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구 사업(스마트 무인기 기술개발)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) Thomas J. Mueller, 2002, Aeroacoustics Measure- ments, Springer, New York

(2) Sijtsma, P., Oerlemans, S. and Holthusen, H., 2001, "Location of Rotating Sources by Phased Array Measurements," Proc. of the 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf., Maastricht, The Netherlands.

(3) Kook, H. and Moebs, G. B., 1999, An Efficient Procedure for Visualizing the Sound Field Radiated by Vehicle During Standardized Passby Test. Kookmin Univ. Seoul.

(4) Lee, J. H., Hong, S.-H. and Choi, J.-S., 2004, "Localization of Rotating Sound Sources Using Beamforming Method," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1338~1346.

(5) Robert P. 2004, Dougherty, "Advanced Time-domain Beamforming Techniques," 10th AIAA/CEAS Aero-acoustics Conference, Man- chester, UK.