

# 마이크로폰 어레이 측정에서의 도플러 효과와 자체소음 제거에 관한 실험적 연구

## Elimination of Self Noise & Doppler Effects from the Microphone Array Measurement

이 옥\* · 박 성\*\* · 최 종 수† · 김 재 무\*\*\*

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

(2005년 11월 2일 접수 ; 2006년 6월 22일 심사완료)

Key Words : Microphone Array(마이크로폰 어레이), Beamforming(빔형성기법), Windtunnel Test(풍동실험), Source Localization(소음원 위치추정), De-Dopplerization(도플러 효과 제거), Self Noise(자체소음)

### ABSTRACT

In the case of aeroacoustic test in windtunnel, measurement accuracy is reduced by not only Doppler effects but also by the microphone self noise due to airflow and high turbulence in the wall boundary layer. Microphone array measurements can be easily utilized for the solutions of these problems. In this paper, geometrical optics approach and diagonal term elimination of cross spectral matrix was introduced to the de-dopplerization and self noise reduction methods for the microphone array measurement. For the validation, beamforming tests for sinusoidal point source were performed in the closed type test section of windtunnel, and their performances of beam width and sidelobe rejection were significantly improved.

### 1. 서 론

각종 운송체의 이동속도 증가에 따라 소음 발생의 주요 원인은 구조 진동적 요인에서 운송체 주위의 비정상유동에서 기인하는 공력 소음적 요인으로 변화하고 있으며, 이러한 소음특성의 파악을 위하여 공력소음학적 관점에서의 풍동실험의 중요성이 증가하고 있다. 이러한 조건의 소음특성 측정을 위해서는 무향실을 갖추고 풍동 웬소음에 대한 흡음처리가 되어있는 공력 무향 풍동을 사용하여야 하며, 소음 특성의 측정에서도 마이크로폰 자체소음과 전파특성

에 대한 보정 등 복잡한 절차를 필요로 하게 된다.

과거 레이더 분야 등에 활용 되던 빔 형성기법을 소음측정 분야에 적용한 마이크로폰 어레이 측정 기법을 사용할 경우 위와 같은 풍동실험에서의 문제점 등을 보다 손쉬운 방법으로 해결할 수 있다. 빔 형성기법에서는 수신 신호의 위상차를 이용하여 특정 위치에서 발생한 신호만을 분리하여 재구성 할 수 있으며, 시험 대상에서 발생하는 소음만을 측정 할 수 있다. 또한 신호처리 과정에서 소음 전파특성에 대한 적절한 보정을 통하여 풍속에 의한 도플러 효과를 제거하고, 수신 신호의 잡음 성분을 제거할 수 있다.

이 논문에서는 한국항공우주연구원에서 진행 중인 스마트 무인기 개발과 관련하여 프롭로터의 풍동실험에 마이크로폰 어레이 측정기법을 적용하기 위하여 수행한 연구 내용을 정리하였다.

† 책임저자; 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

E-mail : jchoi@cnu.ac.kr

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

\* 정회원, 충남대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

\*\*\* 한국항공우주연구원

## 2. 풍동실험에서의 마이크로폰 어레이 측정

### 2.1 마이크로폰 어레이 측정

Fig. 1은 마이크로폰 어레이 측정에서의 빔형성 기법의 적용 절차를 나타내고 있다. 공간상의 임의의 위치에서 발생한 소음은 서로 다른 위치의 각 마이크로폰에 거리차이에 의한 위상과 진폭의 차이를 가지는 신호로 수신되게 된다. 해당 신호의 전파특성에 대한 적절한 모델링을 통하여 이러한 위상과 진폭의 차이를 보정한 뒤 수신신호를 합하면 수신 신호에 포함된 잡음성분은 제거되고, 발생 신호는 증폭되게 되는데, 이렇게 계산된 빔파위의 공간상의 분포로부터 소음원의 위치를 추정할 수 있고, 해당 위치에서의 발생 신호를 재구성할 수 있다.

마이크로폰 어레이 측정에서의 계산절차를 정리하면 다음과 같다.  $N$ 개의 마이크로폰 중  $n$ 번째에서 수신된 비정상 협대역 신호의 스펙트럼,  $X_n(f)$ 에 대하여 소음원이 존재할 것으로 예상되는 공간상에  $M$ 개의 가상 소음원을 가정하면, 가상 소음원  $m$ 에서의 빔파위,  $b(m)$ 은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$b(m) = \vec{C}(m)^\dagger A \vec{C}(m) \quad (1)$$

이때  $A$ 는 식 (2)와 같은 수신된 마이크로폰 신호 간의 상호상관행렬(cross spectral matrix)의 시간 축에 대한 조화평균값이다. 또한  $\vec{C}_m$ 은 조향 벡터(steering vector)이고  $\vec{C}_m^\dagger$ 는 조향벡터의 에르미트 공액(hermitian conjugate)이다. 이때 조향벡터의 경우 음장 모델링 방법에 따라 다르게 정의할 수 있

는데, 이 연구에서는 식 (3)과 같이 적용하였다.

$$A_{ij} = X_i^*(f) X_j(f) \quad (2)$$

$$C_{nm} = a \frac{e^{jk_0 r_{nm}}}{r_{nm}}$$

where,  $a = \frac{1}{\sqrt{\sum_{n=1}^N r_{nm}^2}}$  (3)

$$k_0 = 2\pi f / c$$

$r_{nm}$  : Distance from grid point to  $n$ -th microphone

### 2.2 풍동실험에서의 도플러 효과의 제거

풍동실험에서와 같이 일정 속도를 지닌 유동장 내에서 전파되는 음파는 음원과 수신점 사이의 직선경로를 따라 전파되지 못하고 Fig. 2와 같이 매질의 이동에 따라 멀어진 경로를 따라 전파되게 된다. 이러한

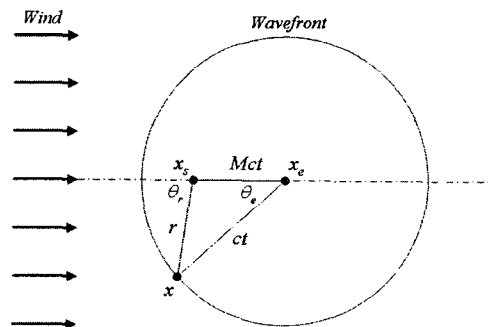


Fig. 2 Acoustic propagation by geometrical optics<sup>(1)</sup>

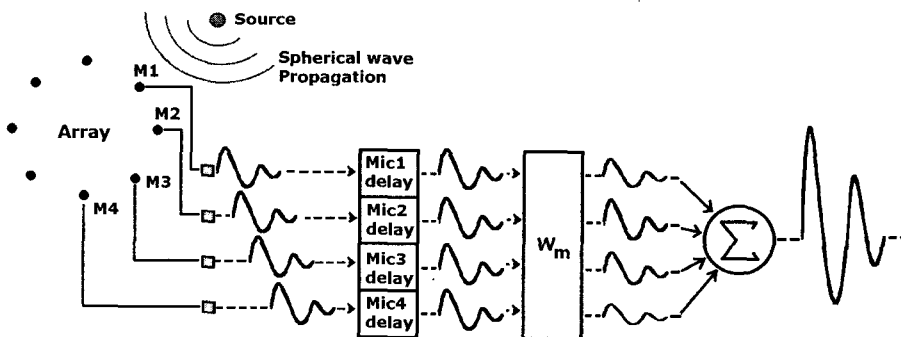


Fig. 1 Schematics of phased array beamforming

도플러 효과는 마이크로폰 어레이 측정에서 각 마이크로폰 수신 신호간의 위상차에 영향을 주므로 정확한 소음원의 위치추정을 위해서는 이를 보정하여야 한다.

참고문헌 (1)에서는 이러한 유동에 의한 효과를 보정하기 위하여 기하학적 방법에 의하여 전파 경로를 보정하는 방법을 소개하고 있다. 그림에서와 같이 시간  $t$ 에 마이크로폰 위치,  $x$ 에 도달한 음파의 파면 중심은 마하수,  $M$ 의 유동에 의하여 원래의 발생 위치  $x_s$ 에 대하여  $Mct$  만큼 이동하게 되므로 실제 음파의 전달경로는  $ct$ 와 같게 된다. 따라서 발생 음파의 도달 시간,  $\sigma$ 는 삼각함수 관계에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{c\sigma}{r} = \frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_e}$$

$$\frac{\sigma}{r/c} = M \cos \theta_r + \frac{\sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta_r}}{1 - M^2} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{1}{c} \frac{R - Mx}{1 - M^2}$$

where,  $R = \sqrt{1 - M^2} \sqrt{r^2 - \frac{M^2}{1 - M^2} x^2}$

따라서 식 (1)을 마하수  $M$ 의 유동장에 적용시키기 위해서는 식 (3)의 조향벡터에서 가상 소음원과 마이크로폰 사이의 거리를  $c\sigma$ 로 대치할 경우 유동에 의한 효과를 제거할 수 있다.

### 2.3 대각항 제거를 통한 자체소음의 저감

폐쇄형 시험부를 지나는 풍동에서 마이크로폰 어레이 측정기법을 사용하는 경우 일반적으로 마이크로폰을 시험부 벽면에 일치하게 부착시키는 방법 (flush mounting)을 사용하게 된다. 이 경우 마이크로폰은 풍동 벽면의 경계층 내부의 난류성분의 영향을 받아 매우 높은 유체소음 신호를 같이 측정하게 되는데 이를 자체소음이라 한다. 빔형성 기법에서 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 빔파워 계산에서 상대적으로 높은 자체소음에 대한 민감도를 나타내는 대각항을 제거하는 방법을 사용할 수 있다.

특정 가상 소음원 위치  $x_0$ 에 대한 식 (1)의 빔파워를 상호상관행렬,  $A$ 의 대각항에 의한 성분과 비대각항에 의한 성분으로 구분, 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$b(m) = \sum_{i=1}^N |C(m)|^2 A + \sum_{i \neq j} C^+(m) A C(m) \quad (5)$$

이때  $A$ 의 비대각항 만을 가지고 있는 우측항의 경우 조향벡터 연산을 통하여 각 마이크로폰의 거리 차이에 의한 위상각 보정이 이루어지고, 이 과정을 통하여 각 마이크로폰에 대하여 동일 위상각을 지나는 자체소음 성분은 상쇄되고, 발신 신호는 증폭되게 된다. 하지만 좌측항의 대각항의 경우 신호에 대한 위상각 차이가 없는 항이기 때문에 자체소음 성분까지도 같이 증폭되는 역할을 하게 된다. 따라서 자체소음 성분이 상쇄된 우측항만을 빔파워로 사용할 경우 자체소음에 의한 영향을 최소화 할 수 있다.

## 3. 도플러 효과와 자체소음 제거방법의 검증

### 3.1 실험장치의 구성

풍동 조건의 빔형성 기법에서 도플러 효과와 마이크로폰 자체소음의 제거방법의 검증을 위하여 Fig. 3과 같이 실험장치를 구성하였다.

본교 보유 중형 공력무항풍동의 폐쇄형 측정부 환경에 대하여 풍동 중심에 스피커와 파이프를 이용하여 구성된 점음원 모델을 설치하고, 좌측 벽면에 마이크로폰 어레이를 설치하여 발생 음파를 측정하였다. 이때 풍속조건은 0, 10, 20, 30 m/s로 하고, 사인파 형태의 발생음파의 주파수는 1, 2, 5 kHz로 하여 조건별 결과의 차이를 비교 하였다.

실험에 사용한 마이크로폰 어레이는 31개의 1/4" 피에조 방식 마이크로폰(MG M360)을 사용하여, Dougherty<sup>(3)</sup> 등이 제안한 나선형 어레이 형태로 구성하였다. 사용한 마이크로폰 어레이의 상세 특성은

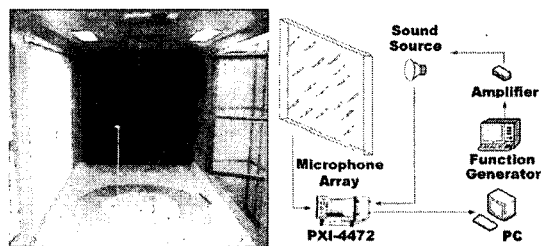


Fig. 3 Test setup & layout of DAQ system

참고문헌 (5)에 정리되어 있다. 각 마이크로폰 출력 신호는 동시 샘플링이 가능한 32채널의 자료 취득 장치 (NI PXI-4472)를 활용하여 16384 Hz로 시간열 데이터를 저장하고, 4096개 데이터를 이용한 FFT연산을 통하여 100회 조화평균을 취한 각 마이크로폰 데이터 간의 교차상관함수행렬을 계산한 후 이의 행렬 연산을 통하여 인가한 점음원의 주파수에 서 빔파워맵을 계산, 비교하였다.

### 3.2 보정방법에 따른 빔파워맵

Fig. 4는 실험을 통하여 얻어진 각 조건에서의 빔파워맵을 나타내고 있다. 빔파워의 계산을 위하여 앞서 언급한 도플러 효과와 자체소음에 대한 보정을 실시한 결과이다. 계산 결과는 최대값을 기준으로 무차원화 하였다. (0,0)위치에 존재하는 단극자 소음원에 대하여 주파수 및 풍속조건 변화에 따라 3 dB 이상의 차이를 나타내며 소음원의 위치를 보여주고 있음을 볼 수 있는데, 인가 주파수에 따라 마이크로폰 어레이 형상 자체의 특성과 관계하여 서로 다른 빔폭과 부엽 저감 특성을 나타낸다. 또한 0 dB의 최대값을 나타내는 점을 표시하여 추정한 소음원의 위치는 주파수가 낮은 경우 부정확한 특성을 나타내지만 어레이 형상의 빔폭 범위 내의 오차를 나타내고 있다. 따라서 관심 주파수에 따라 적절한 마이크로폰 어레이 형상을 사용하여 빔폭을 조절할 경우 낮은 신호대 잡음비와 강한 잔향특성을 지니는 폐쇄형 풍

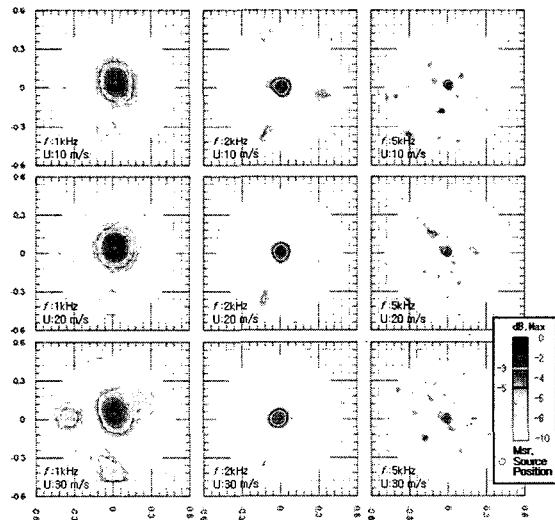
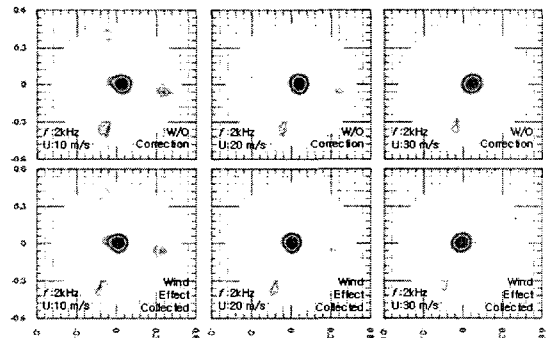


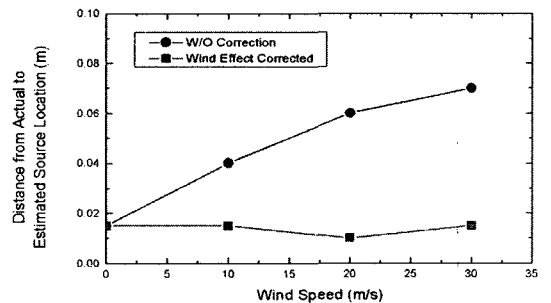
Fig. 4 Collected beamform map of sinusoidal sources

동 시험부 조건에서 충분한 정밀도의 소음원 위치 추정이 가능함을 알 수 있다.

Figs. 5, 6은 각 보정방법의 효과를 확인하기 위하여 이를 적용하지 않은 경우를 적용한 경우와 비교한 것이다. Fig. 5의 도플러 효과의 경우를 살펴보면 보정을 하지 않은 빔파워맵에 대하여 보정기법의 사용에 따라 비교적 정확한 위치를 추정함을 확인할 수 있다. 보정에 의한 측정 정확도의 향상을 비교해 보기 위하여 빔파워맵에서의 최대치의 위치로 추정된 소음원의 위치와 실제 위치와의 거리차이를 Fig. 5(b)에 도시하였다. 이를 살펴보면 풍동속도의 증가에 따라 증가하는 소음원 위치추정의 오차는 보정방법의 적용에 따라 현저히 감소함을 볼 수 있다. 또한 Fig. 6의 대각향 제거기법의 경우는 보정을 통하여 빔파워맵의 빔폭과 부엽 특성이 개선됨을 확인할 수 있다. 이때 도시된 이론적 결과는 마이크로폰 어레이 형상의 마이크로폰 좌표 정보만을 이용하여 계산한 빔패턴에서의 빔폭과 부엽 저감치이다. 이를 살펴보면 측정된 결과는 측정 과정중의 노이즈 등에

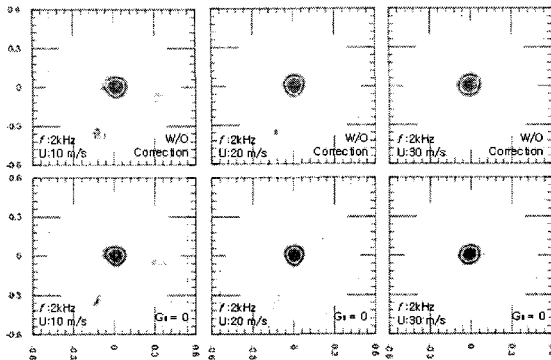


(a) Beamform map

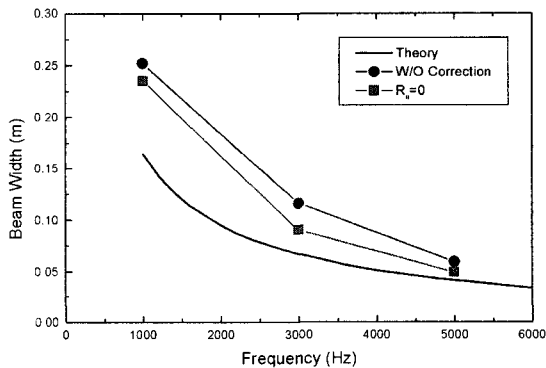


(b) De-Dopplerization effects of source localization error for various wind speed

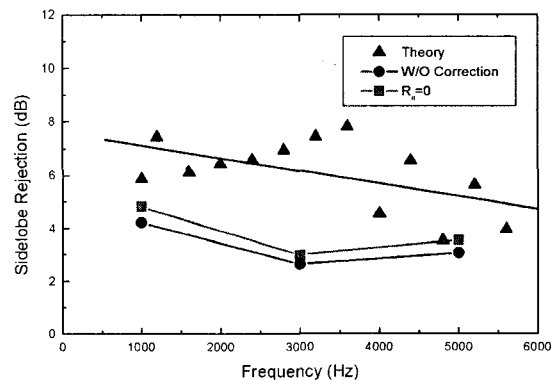
Fig. 5 De-Dopplerization effects on beamform map



(a) Beamform map



(b) Effects of diagonal term elimination of beam width for various source frequency



(c) Effects of diagonal term elimination of sidelobe rejection for various source frequency

Fig. 6 Effects of diagonal term elimination

의한 영향으로 이론적인 값 보다는 안좋은 특성을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 또한 보정 결과의 적용 여부에 따라 각 특성치가 개선되었음을 확인할 수 있다.

이러한 대각항 제거에 의한 효과는 Fig. 7의 교차

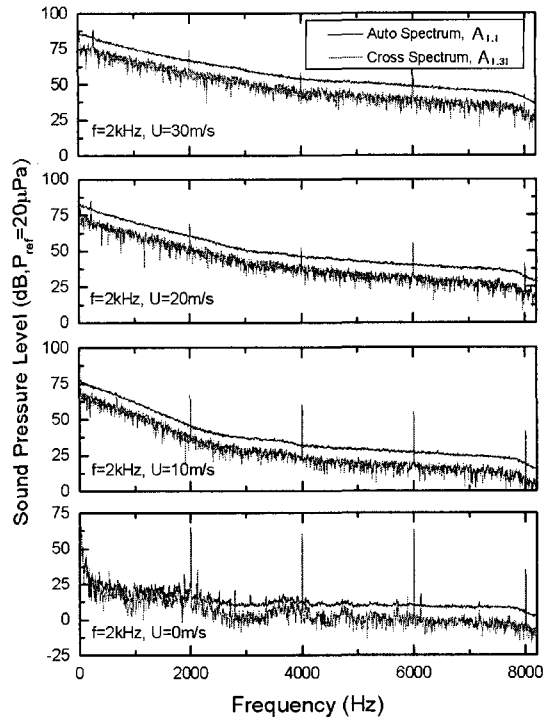


Fig. 7 Diagonal & off-diagonal term of cross spectral matrix

상관함수행렬에서도 확인할 수 있는데, 풍속조건에 따라 도시한 스펙트럼을 살펴보면 풍속이 증가할수록 자체소음 증가에 따라 음원 주파수 이외의 주파수에서 음압레벨이 고르게 증가함을 볼 수 있고, 이러한 자체소음은 대각항인  $A_{1,1}$ 의 경우가  $A_{1,31}$ 에 비하여 더 높음을 볼 수 있다. 따라서 자체소음의 영향이 높은 자체소음관함수행렬의 대각항을 제거함에 따라 빔파워 맵의 정확도는 향상 되는 것으로 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

폐쇄형 풍동 측정부 환경에서의 소음원 위치 추정을 위하여 빔 형성기법을 이용한 마이크로폰 어레이 측정 방법을 풍동실험에 적용하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 해당 시험조건에서 발생할 수 있는 시험 조건상의 문제점을 보완하기 위하여 음파 전달 경로에 대한 유동의 영향을 보정하는 방법으로 도플러 효과를 제거하였으며, 풍동 벽면 경계층의 난류 유동에 의한 마이크로폰 자체소음 저감을 위해서 빔 형성 과정에서 자체소음에 대하여 높은 민감도를 가

지는 교차상관함수행렬의 대각항을 제거하는 방법을 사용하였다.

스피커와 파이프를 이용하여 구성된 점음원 모델에 대한 풍동실험을 통하여 제시한 마이크로폰 어레이 측정기법에서의 보정기법의 타당성을 확인하였다. 서로 다른 풍속 조건에 대한 도플러 효과 제거 기법의 경우 보정 적용에 따라 추정 소음원의 위치를 보다 정확하게 측정함을 볼 수 있었으며 자체상관함수행렬 대각항 제거를 통하여 마이크로폰 자체 소음의 영향을 최소화 할 경우 빔파워맵의 부엽특성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

이러한 빔형성 기법을 최종 시험대상인 프로토타입 발생소음원의 규명에 활용하기 위해서는 마이크로폰 어레이 형상 최적화를 통하여 시험 시 관심주파수에서의 어레이의 성능을 나타내는 빔폭과 부엽저감 능력을 증대시키는 노력이 필요하리라 생각되며, 로터 회전면 상에서 소음원 위치 추정을 위해서 회전하는 소음원에 대한 추가적인 보정 기법의 적용을 필요로 할 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 산업자원부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(스마트무인기기술개발사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Thomas J. Mueller, 2002, *Aeroacoustics Measurements*, 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) Robert P. Dougherty, 2003, "Phased Array Beamforming for Aeroacoustics", AIAA Professional Development Short Course, AIAA, Reston, VA.
- (4) Robert P. Dougherty, 2004, "Advanced Time-domain Beamforming Techniques", 10th AIAA/CEAS Aero-acoustics Conference, Manchester, UK.
- (5) Park, S., 2005, *Aerodynamic & Aeroacoustic Characteristics Measurement for Prop-rotor*, Master Degree Thesis, Chungnam National University.
- (6) 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.