

# 빔형성방법에서의 분해능 향상 기법에 관한 연구

## Array Resolution Improving Methods for Beamforming Algorithm

황선길\* · 이욱\*\* · 최종수\*\*\*

Seongil Hwang, Wook Rhee and Jong-Soo Choi

**Key Words** : Microphone Array(마이크로폰 어레이), Beamforming Method(빔형성 방법), Array Resolution(어레이 분해능) Sidelobe reduction(부엽 저감), Robust Adaptive Beamforming, CLEAN algorithm

### ABSTRACT

Microphone array techniques are being used widely in wind tunnel measurements for identification of the distributed aerodynamic noise sources on the model being tested. Depending on the frequencies and sound levels, conventional beamforming algorithm has limitation in separating two adjacent sources. Several modifications to the classical beamforming have been developed to enhance array resolution and reduce sidelobe levels. In this paper the robust adaptive beamforming and the CLEAN algorithm are used to compare to the result of conventional beamforming method. It is found that the CLEAN algorithm is capable of pin-pointing locations of multiple sources nearby, while these sources are unidentifiable with robust adaptive or conventional beamforming techniques.

### 1. 서론

마이크로폰 어레이(microphone array)를 이용한 빔형성(beamforming) 방법에서 어레이의 성능에 영향을 주는 요소는 여러 가지가 있는데, 이를 평가하는 방법은 크게 두 가지로 어레이 분해능(array resolution)과 공간 엘리어싱(spatial aliasing)이 있다. 어레이 분해능은 다수의 소음원 위치를 정확히 판별하는 능력을 의미하는데 사이드롭(sidelobe)과 빔폭(beamwidth)의 크기를 통해 평가할 수 있다. 공간 엘리어싱은 실제 소음이 발생하는 위치가 아닌 부분에 소음원이 나타나는 현상을 말하는 것으로 사이드롭과는 달리 원래 음원의 위치가 아닌 곳에 그 음원에 의한 출력이 생기는 것을 의미한다.<sup>(1)</sup>

실제는 존재하지 않는 음원이 존재하는 것처럼 나타나는 사이드롭은 두 가지 유형으로 고려할 수 있는데, 첫째로 마이크로폰의 수가 너무 적거나 어레이의

전체 크기나 형상에 의해 발생하는 경우가 있고, 둘째는 마이크로폰의 배치 형태와 같이 어레이의 설계에서 발생하는 것이다. 설계된 어레이에서 두 마이크로폰 사이의 거리가 같은 경우가 여러 쌍의 마이크로폰에서 이 경우에 각각의 위상차가 같아지거나, 두 마이크로폰 사이의 거리가 파장(wave length)의 반보다 클 경우에도 같은 위상차를 가진다. 이 경우, 사이드롭이 발생하게 된다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 두 가지 사이드롭의 유형 중에서 후자와 같은 원인으로 발생하는 사이드롭을 감소시켜 소음원의 위치 추정 정확도를 향상시킬 수 있는 방법을 도입하였다. 전통적인 빔형성 기법(conventional beamforming)의 수정을 통해 Robust adaptive beamforming과 CLEAN algorithm을 사용하여 전통적인 빔형성 방법과 비교하였다. 이를 통하여 사이드롭의 저감을 통한 분해능 향상을 확인하였다.

\* 충남대학교 항공우주공학과  
E-mail : kloude@korea.com  
Tel : (042)821-7774, Fax : (042) 825-9225

\*\* 충남대학교 항공우주공학과, 박사과정

\*\*\* 정희원, 충남대학교 항공우주공학과

### 2. 빔형성 방법

점음원을 가정하고 다수의 센서로 구성된 마이크로폰 어레이로 측정하였을 때, 각 센서의 신호는 음원

과의 상대적인 거리 차이에 의하여 다른 진폭과 위상을 갖게 된다. 이 진폭과 위상의 차이로부터 음원의 위치나 발생 방향을 파워의 분포로 알 수 있는 것이 빔형성 방법이다. 각 센서에서 발생하는 진폭과 위상의 차이는 상호상관함수행렬(Cross Spectral Matrix, CSM),  $R$ 의 형태로 표현된다. 모델링된 음장은 가상 음원의 위치와 센서 간의 거리에 의하여 가중벡터  $d$ 로 계산된다.

$$d_n = \frac{1}{r_n} e^{jkr_n} \quad (1)$$

여기서  $r_n$ 은 음원으로부터  $n$ 번째 마이크로폰까지의 거리이고,  $k$ 는 파수(wave number)이다.

상호상관함수행렬로부터 얻어진 진폭과 위상의 차이는 식 (1)에서 구해진 가중벡터를 이용하여 보상, 다음과 같이 파워  $P$ 로 계산된다.<sup>(1)</sup>

$$P = d^H R d \quad (2)$$

여기서 윗첨자  $H$ 는 Hermitian transpose(or complex conjugate transpose)를 나타낸다.

이 계산으로부터 모델링된 음장에서 음원이 존재하는 위치에서는 큰 파워를 갖게 되고, 음원이 없는 곳은 작은 값을 갖게 되어 이로부터 구성된 파워 분포에서 음원의 위치를 찾을 수 있다.

### 3. 분해능 향상 기법

빔형성 방법에서 마이크로폰 어레이의 분해능 향상을 위한 두 가지 방법을 사용하였다. 하나는 Robust Adaptive Beamforming(RBF) 이고, 다른 하나는 CLEAN algorithm(CLEAN) 이다.

#### 3.1 Robust Adaptive Beamforming

Adaptive beamforming(ABF)은 상호상관함수행렬에 포함된 정보를 이용하여 가중벡터를 조정하게 되는데, 원하는 위치(실제 음원의 위치)의 값은 일정하게 유지시키면서 어레이의 출력을 최소화시킨다. 이 내용은 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$\min(w^H R w) \text{ subject to } w^H d = 1$$

이것을 풀어서 정리하면 식 (3)의 형태로 주어진다.

$$w = \frac{R^{-1}d}{d^H R^{-1}d} \quad (3)$$

이것은 Minimum Variance Distortionless Response(MVDR)로 알려져 있는데, 음원이 있는 위치에서는 일정한 값을 주고 나머지 어레이의 출력은 감소시키면 자동적으로 사이드롭과 빔폭은 감소하게 된다. 이상적인 상황에서는 좋은 결과를 얻을 수 있지만 이 방법은 오차(error)에 대한 감도(sensitivity)가 상당히 크기 때문에 가정과 계산과정에서 생기는 작은 오차들에 의하여 결과는 급격히 나빠지게 된다. 이런 감도의 문제는 굉장히 심각하기 때문에 실제에 적용하는 것에는 많은 어려움이 있다.

MVDR의 치명적 단점인 큰 감도를 줄이는 방법 중의 하나가 Robust adaptive beamforming(RBF)이다. ABF white noise gain<sup>(6)</sup>을 일정하게 만드는 것으로 MVDR에서 다음의 한 가지 조건이 더 붙게 된다.

$$\delta \leq G_w \leq N$$

여기에서  $G_w$ 는 beamformer white noise gain 이고,  $N$ 은 마이크로폰 어레이의 센서 수이다. 원하는 위치에서 일정한 응답을 갖는 beamformer white noise gain 은 다음과 같이 정의한다.

$$G_w = \frac{1}{w^H w} \quad (4)$$

식 (3)의 형태로 정리하면 식 (5)와 같이 된다.

$$w = \frac{(R + \epsilon I)^{-1}d}{d^H (R + \epsilon I)^{-1}d} \quad (5)$$

여기서  $\epsilon$ 은 Lagrange multiplier 로 그 값은 상호상관함수행렬에 추가되어서 white noise gain constraint(WNC)를 만족시킨다. 원래의 상호상관함수행렬에 백색잡음(white noise)을 더하여 새로운 상호상관함수행렬,  $(R + \epsilon I)$ 을 만들게 된다. 식 (5)에서 구해진 가중벡터는 식 (2)의 가중벡터를 대체하여 계산한다. WNC는 quadratic constraint이기 때문에 명백하게 풀 수 없게 된다. 그러므로 가중벡터가 WNC를 만족하지 않는다면, 만족시키는 값을 얻을 수 있

도록 더하여지는  $\epsilon$ 의 값은 반복을 통하여 구해야만 한다.

### 3.2 CLEAN Algorithm

빔형성 방법에 의한 파워 분포는 어레이 위치 함수 (array point spread function)와 소스의 분포 함수 (source distribution function)가 혼합되어진 결과로 볼 수 있다. 어레이 위치에 의하여 사이드롭은 파워 분포에서 광범위하게 흩어져 위치하게 된다. 어레이 위치 함수와 소스의 분포에 대한 함수를 알게 되면 파워 분포에서 두 가지의 요소를 분리할 수 있다. 분리를 통하여 사이드롭을 감소시키는 방법이 CLEAN algorithm(CLEAN)<sup>(7)</sup>이다. CLEAN은 파워 분포에서 가장 큰 값을 찾아내고, 그 위치에서 소스의 레벨에 대한 point spread function(PSF)을 계산한다. 구해진 PSF에 작은 값을 곱하여 파워 분포에서 빼는 과정을 반복한다.

CLEAN은 전통적인 빔형성 방법으로부터 계산된 파워 분포와 어레이의 형상으로부터 얻어진 가중벡터를 이용한다. 빔형성 방법에서 계산된 파워 분포를 dirty map( $b_{res}$ )의 초기값으로 하고 clean map( $b_c$ )은 0으로 초기화한다. 아래에 보인 1부터 4까지의 과정을 통하여 계산되는데, 감소된  $b_{res}$ 이 유효한 피크를 갖고 있지 않으면 계산이 끝나게 된다.

1.  $b_{res}$ 에서 최대값의 위치를 찾는다. 최대값의 위치는  $x_p$  크기는  $b_p$ 로 정의한다.
2.  $ab_p$ 를 clean map의  $x_p$ 에 더한다. 여기서  $\alpha$ 는 loop gain으로, 보통 0.1에서 0.5의 범위에서 정한다.
3. 크기가  $ab_p$ 인 위치  $x_p$ 에서의 소음원의 어레이 형태(pattern)를 계산하여  $b_{res}$ 에서 뺀다.

$$(b_{res} - ab_p |d^H(x)d(x_p)|^2)$$

4. 위의 과정을  $b_{res}$ 의 최대값과 최소값의 합이 0이 될 때까지 계산한다.

그림 (1)에서 간략하게 나타낸 CLEAN의 계산 과정을 볼 수 있다.

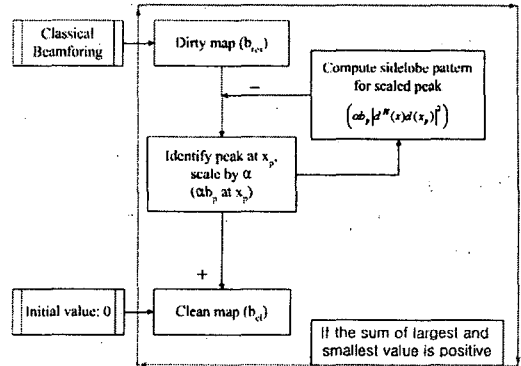


그림 (1) Procedure of CLEAN algorithm.

### 4. 실험 결과

시뮬레이션에는 두 가지 형태의 어레이를 설계하여 사용하였는데, 이는 사각형과 나선형 어레이이다. 어레이의 모습은 아래의 그림 (2)에서 볼 수 있다. 사각형 어레이는 1m 크기의 정방형에 마이크로폰의 수는 36개이며, 나선형 어레이는 바깥쪽 반경이 0.8m이고 마이크로폰의 수는 32개로 디자인 하였다.

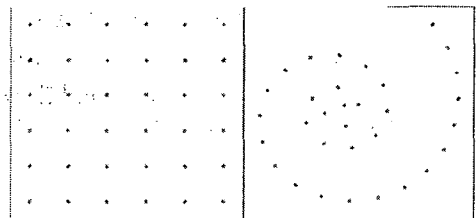


그림 (2) Two arrays used in simulations.

점음원으로 가정한 가상의 음원은 어레이의 중심으로부터 1m 떨어진 곳에 위치시켰고, 음원의 주파수범위는 1kHz에서 10kHz를 사용하였다. 파워 분포를 그리기 위한 격자는 1m의 정방형에 101개의 점을 갖게 하였고 음원은 격자의 중심이나 중심에서 일정거리 떨어진 곳에 위치시켰다.

RBF에서 Lagrange multiplier( $\rho$ )는 0.1로 설정하여 사용하였고, CLEAN에서의 loop gain( $\rho$ )는 0.2로 고정하여 측정하였다. 그리고 CLEAN의 경우 파워 분포에서 값이 0인 점이 발생하는데 dB로 표시할 경우 발산하는 문제 때문에 출력에 0이 되지 않게 미세한 값을 더하여 표시하는데 문제가 없도록 하였다.

첫 번째로, RBF의 성능 향상을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 음원의 위치는 중심에서 일정거리

떨어진 곳(0.3m, 0.3m)에 위치시켰다. 어레이 형상은 사각형과 나선형 어레이를 이용하고, 음원의 주파수는 5kHz와 10kHz의 경우에 대하여 살펴보았다. 그림 (3) - 그림 (6)에 결과를 비교하였다. 그림 (3)과 그림 (4)에서 보인 사각형 어레이를 살펴보면 CBF에서는 두 가지 관심주파수 모두에서 높은 레벨의 사이드롭이 존재하는데, 특히 주파수가 5kHz인 그림 (3)의 경우에는 -3dB이내의 사이드롭이 존재하는 것을 확인할 수 있다. -3dB이내의 레벨이 존재할 경우에는 음원이 있을 수 있다고 볼 수 있는데, 실제 음원은 하나이지만 파워 분포에서는 음원이 2개라고 추정할 수 있다. 같은 조건에서 RBF를 이용하여 얻은 결과에서 높은 값을 갖는 사이드롭의 레벨이 줄어들거나 사라진 것을 확인할 수 있다. 그림 (3)에서 가짜 음원으로 추정된 위치의 레벨이 줄어들어 피크와 3dB이상 차이나게 되어 비교적 더 정확하게 실제 음원의 위치를 판별할 수 있게 되었다. 그림 (5)와 그림 (6)에서 보인 나선형 어레이의 경우 CBF에서 최대치와의 차이가 10dB이상으로서 사각형 어레이의 경우보다는 사이드롭의 레벨이 훨씬 낮은 것을 볼 수 있다. RBF를 이용하였을 경우에는 역시 사이드롭의 레벨이 줄어들거나 사라진 것을 확인할 수 있다.

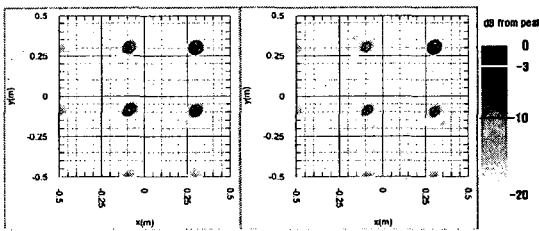


그림 (3) CBF(left) and RBF(right) results of filled square array with 36 elements. (f=5kHz)

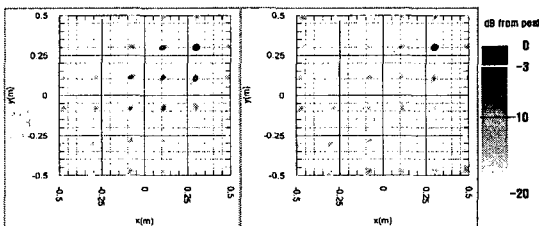


그림 (4) CBF(left) and RBF(right) results of filled square array with 36 elements. (f=10kHz)

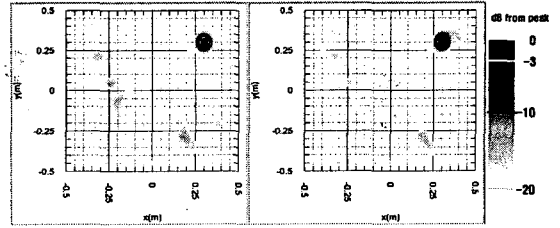


그림 (5) CBF(left) and RBF(right) results of spiral array with 32 elements. (f=5kHz)

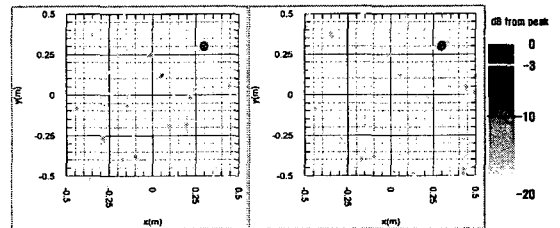
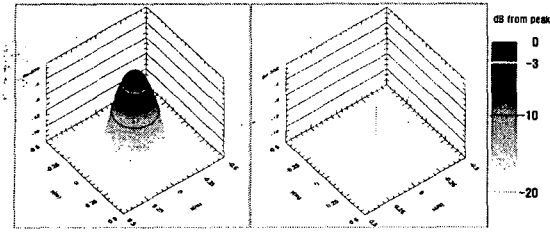
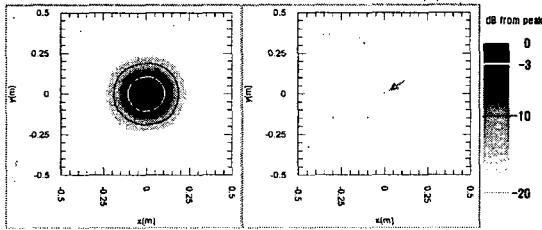


그림 (6) CBF(left) and RBF(right) results of spiral array with 32 elements. (f=10kHz)

두 번째로, CLEAN의 성능 향상을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 사각형 어레이를 이용하여 음원의 주파수를 변화시키면서 관찰하였는데, 그림 (7) - 그림 (10)에서 결과를 볼 수 있다. 먼저, 그림 (6)의 (a)에서 보는 것과 같이 CLEAN의 결과에서는 빔폭의 크기가 너무 작아서 확인에 어려움이 있어서, 그림 (b)에서와 같이 CLEAN에서 추정된 음원의 위치 (-3dB이내)에 화살표로 표시하여 위치의 확인을 용이하게 하였다. 이후의 모든 CLEAN의 결과에도 작은 점으로 표시되는 음원의 위치를 화살표로 표기하였다. CBF에서는 주파수에 따라 빔폭이 크거나 많은 사이드롭을 보이는 반면, CLEAN을 적용하였을 경우에는 빔폭의 크기가 아주 작게 줄어들고 -20dB이상인 사이드롭은 모두 사라진 것을 볼 수 있다. 그림 (10)에서의 CBF의 결과는 그림 (3)과 같은 것이다. -3dB이내의 사이드롭, 즉 존재하지 않는 음원이 예측될 경우에도 CLEAN을 사용할 경우 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 (7) CBF(left) and CLEAN(right) results of filled square array with 36 elements. ( $f=1\text{kHz}$ ) (a) perspective view (b) plane view

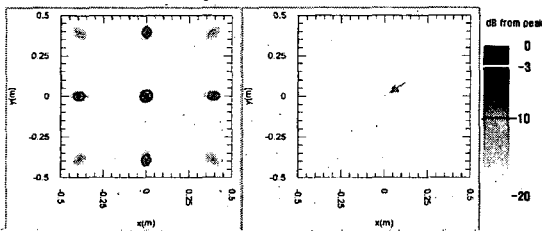


그림 (8) CBF(left) and CLEAN(right) results of filled square array with 36 elements. ( $f=5\text{kHz}$ )

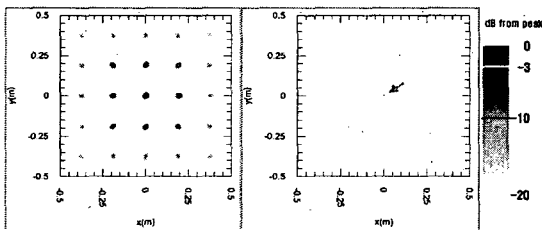


그림 (9) CBF(left) and CLEAN(right) results of filled square array with 36 elements. ( $f=10\text{kHz}$ )

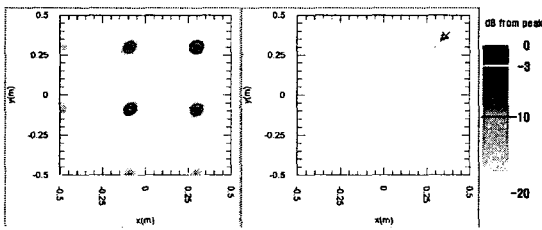


그림 (10) CBF(left) and CLEAN(right) results of filled square array with 36 elements. ( $f=5\text{kHz}$ )

CLEAN의 성능 향상을 확인하기 위한 다른 한 가지 방법으로 동일한 크기를 갖는 세 개의 음원이 있을 경우에 대하여 살펴보았다. 32개의 마이크로폰으로 구성된 나선형 어레이를 사용하여, 가상 음원의 주파수를 1kHz, 3kHz 그리고 5kHz로 증가시켰을 때의 결과를 그림 (11) - 그림 (13)에 보였다. 1kHz에서는 여러 개의 음원들을 CBF와 CLEAN 모두 찾지 못하지만 3kHz에서는 CBF에서 보여주지 못한 음원들을 나타내주고 있다. 5kHz에서는 세 개의 음원의 위치를 정확하게 보여줄 뿐 아니라, 앞서 보인 것과 마찬가지로 빔폭의 크기와 사이드롭이 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

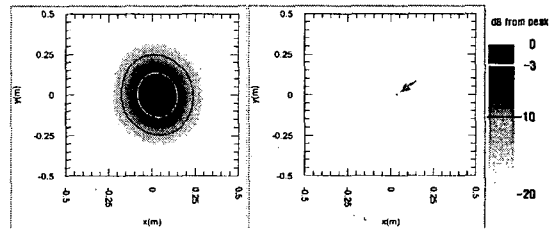


그림 (11) CBF(left) and CLEAN(right) results for three distributed sources with identical strengths and frequencies. (1kHz)

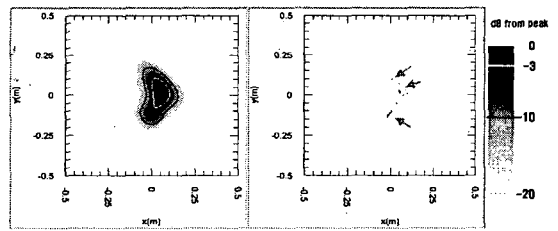


그림 (12) CBF(left) and CLEAN(right) results for three distributed sources with identical strengths and frequencies. (3kHz)

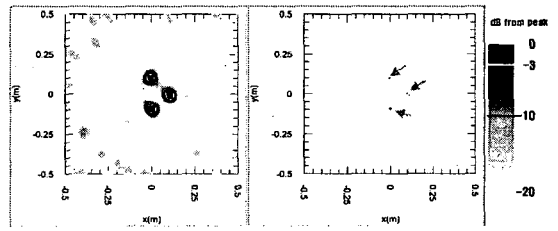


그림 (13) CBF(left) and CLEAN(right) results for three distributed sources with identical strengths and frequencies. (5kHz)

## 5. 결 론

전통적인 빔형성 방법(CBF)에서 수정되어진 Robust adaptive beamforming(RBF)과 CLEAN algorithm(CLEAN)을 통하여 사이드롭이 저감되고, 빔폭의 크기가 줄어드는 것을 확인하였다. 또한, 사이드롭의 저감과 빔폭의 감소로부터 어레이의 분해능이 향상됨을 보였다. 음원의 위치는 일정한 값을 유지하면서 어레이의 출력을 최소화시키는 RBF나 혼합된 어레이 형태 함수와 음원 분포 함수를 분리하여 성능을 향상시키는 CLEAN은 CBF에 비하여 계산시간이 길어지지만 시간의 증가에 비해 상당히 좋은 결과를 보여준다. 여러 제한에 의하여 최적화되어 설계된 어레이를 사용하지 못할 경우에도 RBF와 CLEAN과 같은 성능 향상 기법들을 통하여 분해능의 향상이 있음을 확인하였다.

본 연구에서 사용된 두 가지의 성능 향상 기법 중에서는 CLEAN이 가장 우수하다고 말할 수 있다. CLEAN의 경우 본 연구에 사용된 사각형과 나선형 어레이 모두에서 확연하게 좋은 결과를 보였다. 사이드롭의 저감에서도 대단히 좋은 성능을 보였지만 특히 빔폭의 크기가 현저하게 줄어든 것을 확인할 수 있었다. RBF는 빔폭의 크기는 크게 변하지 않았지만 사이드롭의 저감에서 좋은 결과를 보였다.

## 후기

이 연구(논문)는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트무인기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Mueller, T. J.(Ed.), 2002, Aeroacoustic Measurements, Springer-Verlag, Berlin.
- (2) Robert P. Dougherty and Robert W. Stoker, 1998, Sidelobe Suppression for Phased Array Aeroacoustic Measurements, AIAA-98-2242
- (3) Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, Array Signal Processing - Concepts and Techniques, Prentice-Hall, NJ
- (4) Underbrink, J. R. and Dougherty, R. P., 1996, Array design for non-intrusive measurements of noise sources, Noise-Con 96, Seattle, WA (USA)
- (5) Gramann, R. A., and Mocio, J., 1993, Aero-acoustic Measurements in Wind Tunnels Using Conventional and Adaptive Beamforming Methods, AIAA-93-4341
- (6) Cox, H., R. M. Zeskind and M. M. Owen, 1987, Robust Adaptive Beamforming, IEEE Trans., Acoustics, Speech, and Signal Processing ASSP-35(10)
- (7) Hogbom, J. A., 1974, Aperture Synthesis with a Non-regular Distribution of Interferometer Baselines., Astron Astrophys. Suppl. 15, 417-426
- (8) Skofronick-Jackson, G. M. and Gasiewski, A. J., 1995, A CLEAN-Based Iterative Nonlinear Statistical Rain Rate Retrieval Algorithm, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pl. 1898-1900