

# 지면반사효과를 이용한 폭발 소음원의 위치 추정 정밀도 향상법

## An Accuracy Improvement Method on Acoustic Source Localization Using Ground Reflection Effect

고 영 주\* · 최 동 훈\* · 이 재 형\* · 최 종 수† · 하 재 현\*\* · 나 태 흠\*\*  
Yeong-Ju Go, Donghun Choi, Jaehyung Lee, Jong-Soo Choi,  
Jae-Hyoun Ha and Taeheum Na

(Received November 17, 2015 ; Revised December 22, 2015 ; Accepted December 22, 2015)

**Key Words** : Acoustic Source Localization(소음원 위치 추정), Time Difference of Arrival(도달지연시간), Cepstrum(캡스트럼), Ground Reflection(지면 반사)

### ABSTRACT

A technique for improving estimation accuracy is introduced in order to locate the impact position of artillery shell during the weapon scoring test. Study on localization of impacts using acoustic measurement has been conducted and the usability of sensor array is verified with experiments. When the blast occurs above the ground in the firing range, the acoustic sensor above the ground can measure the directly propagated sound with the ground-reflected one. In this study, a method for reducing estimation error by using the reflection signal measurements based on the time difference of arrival method. Considering the reflection sound works as same as placing a virtual sensor symmetrically through the ground. This idea enables a virtual three-dimensional array configuration with a two-dimensional plane array above the ground as such. The time difference between the direct and the reflected propagations can be estimated using cepstrum analysis. Performance test has been made in the simulation experiment in the football size area.

$n$  : 마이크로폰의 개수  
 $\tau_{ij}$  :  $i$ 와  $j$  마이크로폰 신호의 지연시간

### 기 호 설 명

$C$  :  $M_i$ 에서 측정된 신호의 파워 캡스트럼 함수  
 $M_i$  :  $i$ 번째 마이크로폰 위치  
 $T_{air}$  : 대기 온도  
 $d_i$  : 소음원으로부터  $i$  마이크로폰 까지 거리  
 $d_{ij}$  :  $i$ 와  $j$  마이크로폰 까지 거리  
 $k$  : 지면반사 신호의 개수

### 1. 서 론

무기체계 개발에서 폭발에 대한 위치 측정은 시험평가 항목 중 중요한 지표이다. 정확한 폭발 위치를 측정하는 것은 폭발물이 정확히 작동하는지 여부를 판단할 수 있기 때문에 정확한 측정이 요구된다. 음향 센서를 이용한 소음원 위치 추적 시

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam National University  
E-mail : jchoi@cnu.ac.kr  
\* Dept of Aerospace Engineering, Chungnam National University  
\*\* Agency of Defense Development

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

시스템은 넓은 범위의 무기 시험장에 사용하기 적합하여 다양한 선행 연구가 이루어지고 있다. 폭발물이 작동하면 강한 충격음을 발생하는데 신호가 명확하여 신호 획득이 용이하고 음향 센서로 사용하는 마이크로폰은 영상이나 레이더와 같은 장비에 비하여 소형이고 비용이 저렴하기 때문에 실용적인 측면에서 적용연구가 많이 이루어지고 있다. 마이크로폰 배열을 이용한 소음원 위치 추적 방법은 소음원의 특징, 실험 환경 등에 따라 다양한 알고리즘이 개발되어 있다.

이 연구에서는 공중에서 폭발하는 충격음을 측정하는 것을 목적으로 하고 있으며 도달지연 시간을 이용한 충격음의 위치를 추정하는 연구를 수행하였다. 도달지연 시간을 이용한 소음원 위치 추정 방법은 이론적으로 3개 이상 마이크로폰을 사용하는 것으로 공간상의 소음원의 위치 추정이 가능하다. 하지만 측정 환경이나 배열 방법에 따라 측정 결과에 직접적인 영향을 주기 때문에 개수를 늘리거나 다양한 배열 방법 등에 의하여 추정 정확도를 높이는 연구가 필수적이다<sup>(1-4)</sup>.

넓은 범위의 폭발물 시험장에서는 일반적으로 지면 위에 마이크로폰을 설치하여 소음을 측정한다. 공중 폭발에 의하여 발생한 충격음은 공기 중으로 전파되어 지면위에 있는 마이크로폰에 수신된다. 지면 위 특정 높이에 고정되어 있는 마이크로폰의 경우 지면에 반사된 음압 신호가 추가되어 측정되는 현상이 발생하며 이를 지면반사효과라고 한다. 지면에 반사된 음향신호는 직접 수신되는 신호와 전파 경로 차이가 발생하며 일정 시간 후에 측정이 된다. 캡스트럼 분석 방법은 단일 마이크로폰에서 측정된 직접신호와 지면반사신호를 분리하여 지연 시간을 계산하여 준다. 그리고 지면반사신호의 전달 경로는 기하학적으로 지면에 대칭인 위치와 같기 때문에 가상의 측정 지점으로 적용 할 수 있다.

2.1절은 도달지연 시간을 이용한 소음원 위치 추정 방법에 대한 기본 원리, 2.2절에서는 지면 반사신호에 의한 위치 추정 향상 방법에 대하여 기술하였다. 그리고 제안된 알고리즘의 성능 검증을 위한 실험 방법과 결과를 2.3절에 기술하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 도달지연시간에 의한 소음원 위치 추정 방법

점소음원에서 구형 파면으로 방사되는 소음을 가정하였을 때 소음원과 각각의 마이크로폰의 기하학적 위치 관계는 상대적인 거리차이를 가지며 동일한 시간으로 비교하였을 때 위상이 다른 신호로 측정된다. 두 개 마이크로폰에서 각각 측정된 신호의 위상은 각각의 도달 거리  $d_i$ 의 차이에 의하여 발생한다. 실제 신호를 측정하게 되면 도달지연시간  $\tau_{ij}$ 에 의하여 위상차이가 발생하고 식 (1)에 의하여 도달지연거리  $d_{ij}$ 와 음속  $c$ 의 관계로 계산된다. 도달지연시간은 식 (3)에 의하여 상호상관함수  $R_{xy}$ 에 의하여 계산하였다.

소음원의 위치는 최소 3개 이상의 마이크로폰에서 신호를 측정하였을 때 추정될 수 있다.  $n$ 개의 마이크로폰을 사용하였을 경우 도달지연 시간을 계산할 수 있는 쌍의 개수는  $n(n-1)/2$ 개 이다. 계산된 각각의 도달지연거리는 Fig. 2와 같이 쌍곡선 형태로 나타나며 이 쌍곡선들의 교점이 소음원의 위치 추정 결과이다. 이 연구에서는 쌍곡선에 의한 기하학적 교점을 찾는 추정 방법 대신에 테일러급수를 이용하여 수렴 오차가 최소인 지점을 찾는 수치적 방법<sup>(5)</sup>을 통하여 위치를 추정하도록 하였다. 수렴 오차는 직교좌표계의 각 축방향으로  $10^{-6}$  m가 되도록 하였다.

$$d_{ij} = d_i - d_j = c\tau_{ij} \tag{1}$$

$$c = 331.3 + 0.606T_{air} \tag{2}$$

$$\tau_{ij} = \tau \text{ at } \max(R_{xy}(\tau)) \tag{3}$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t)y(t+\tau)dt \tag{4}$$

### 2.2 지면반사효과와 캡스트럼 분석

지면 위 일정 높이에 고정되어 있는 마이크로폰은 공기 중 직선 경로로 입사되는 직접신호와 지면에 반사된 신호가 입사되는 반사신호가 합쳐져 측정된다. Fig. 3은 마이크로폰에 입사되는 직접신

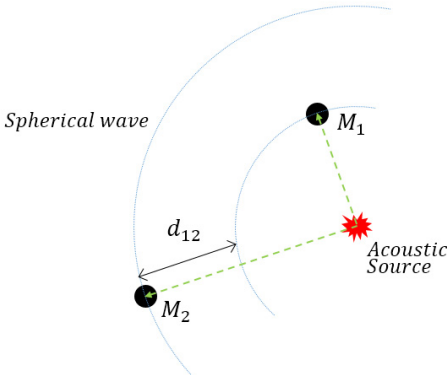


Fig. 1 Time difference of arrival caused by noise source and microphone location

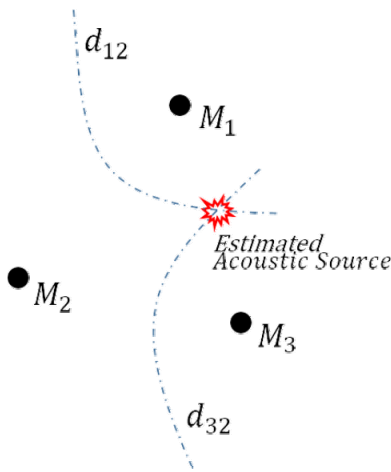


Fig. 2 Acoustic source estimation method using time difference of arrival

호와 반사신호의 경로를 나타낸 것이다. 신호의 반사는 지면에서 입사각과 반사각이 같은 지점에서 발생한다. 반사신호의 도달거리  $d_i$ 는 지면을 기준으로 실제 마이크로폰 위치  $M_i$ 와 대칭인 위치  $M_i^*$ 에 대한 도달거리  $d_{i^*}$ 와 같다. 지면반사효과에 의하여 측정되는 직접신호와 반사신호는 Fig. 4와 같이 나타난다. 직접신호와 반사신호의 경로차이에서 나타나는 지연시간  $\tau_{ii^*}$ 는 식 (5)의 캡스트럼<sup>(6)</sup>에 의해서 측정된다.

$$\tau_{ii^*} = \tau \text{ at } \max(C(\tau)) \quad (\tau \neq 0) \tag{5}$$

$$C(\tau) = |IFFT\{\log(|FFT\{x(t)\}|^2)\}^2 \tag{6}$$

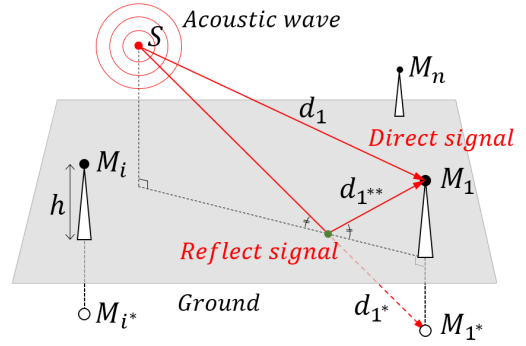


Fig. 3 Ground reflection signal and real and virtual microphone position

### 2.3 지면반사효과를 이용한 위치 추정 정확도 향상 방법

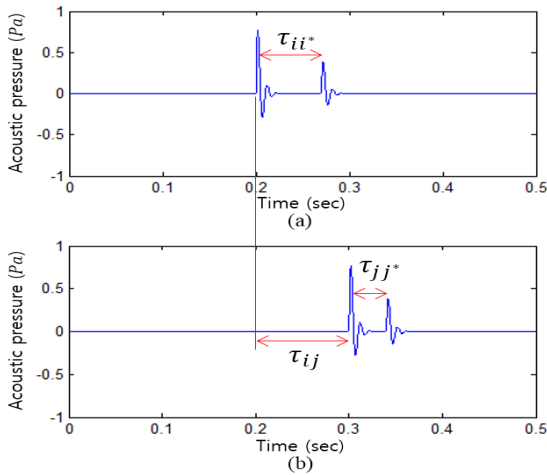
캡스트럼에 의해서 측정된 지면반사신호의 지연시간은 Fig. 3에서 나타내는 것과 같이 측정된 마이크로폰 위치와 가상의 마이크로폰 위치  $M_i^*$  사이의 도달지연시간으로 가정할 수 있다. 한 쌍의 마이크로폰  $M_i, M_j$ 에 대한 상호상관함수로부터  $\tau_{ij}$ , 각 마이크의 캡스트럼으로부터  $\tau_{ii^*}, \tau_{jj^*}$ 가 각각 계산되어 Table 1과 같은 계산 조합에 의해서 가상 마이크로폰  $M_i^*, M_j^*$ 을 포함하는 도달지연시간을 구할 수 있다.

가상 마이크로폰에 의한 도달지연시간 계산은 센서의 조합 개수를 늘려 정확도를 향상하는 장점도 있지만 3차원 배열로 확장되어 공간 위치 추정 성능을 향상시키는 효과가 크다. 평면 배열은 높이 방향에 대한 위치 추정 오차가 크기 때문에 3차원 배열을 구성하는 것으로 위치에 대한 오차 감소 효과가 나타난다. 가상 마이크로폰은 지면반사신호가 캡스트럼 방법에 의하여 구분되어 반사신호의 지연시간이 측정되는 경우에 가능하다. 즉, 지면에 의한 음향 반사 환경이 잘 갖추어져야한다. 모든 마이크로폰에서 지면반사신호가 측정되는 것은 아니기 때문에 선택적으로 적용 가능하며 실제 측정에 사용한 마이크로폰의 개수  $n$ 과 지면반사신호의 개수  $k$ 에 의해서 위치 추정 계산에 이용되는 도달지연시간 쌍의 개수  $(n+k)\{(n+k)-1\}/2$ 가 정해진다.

### 2.4 위치추정 성능 확인

#### (1) 실험 방법

Fig. 5에 도달지연시간을 측정하기 위한 실험 구



**Fig. 4** Time difference of arrival from (a)  $i$ th to (b)  $j$ th microphone and echo delay at each microphone

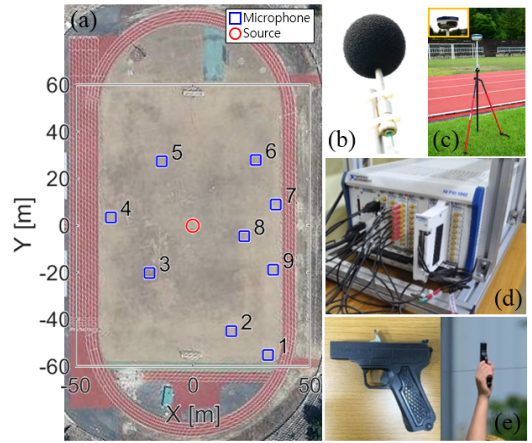
**Table 1** TDOA pair with direct and reflected signal

Pair	$\tau$ calculation
$i, j$	$\tau_{ij}$
$i, i^*$	$\tau_{ii^*}$
$i, j^*$	$\tau_{ij^*} = \tau_{ij} + \tau_{jj^*}$
$j, i^*$	$\tau_{ji^*} = \tau_{ji} + \tau_{ii^*}$
$j, j^*$	$\tau_{jj^*}$
$i^*, j^*$	$\tau_{i^*j^*} = \tau_{ij} + \tau_{jj^*} - \tau_{ii^*}$

성을 나타내었다. 9개의 분산된 지점에 지면에서 2 m 위에 삼각대를 이용하여 마이크로폰을 설치하였다. 음향신호는 National Instrument사의 PXI-4472를 사용하여 유선으로 9개 마이크로폰이 측정 주파수 50 kHz로 시간 동기화하여 수집하였다. 소음원은 마이크로폰과 같은 높이에 설치된 경기용 신호총을 사용하였으며 화약이 폭발하는 음향신호를 모사하였다. 실험은 국제 규격의 축구장에서 수행되었으며 소음원과 마이크로폰의 위치는 측정오차가 수직 방향 2 cm, 수평 방향 1 cm인 측량용 GPS 장비를 사용하여 계측하였다(Table 2).

(2) 실험 결과

Fig. 6과 Fig. 7은 지면반사신호를 적용한 소음원의 위치 추정 결과를 나타낸다. (a), (b), (c)는 3회 폭



**Fig. 5** (a) Microphone and source position on ground, (b) microphone, (c) GPS device, (d) data acquisition system, (e) start gun

**Table 2** Microphone and start gun position

Position	X(m)	Y(m)
Mic.1	32.32	-55.27
Mic.2	16.62	-44.10
Mic.3	-18.43	-20.32
Mic.4	-34.97	3.41
Mic.5	-13.16	27.48
Mic.6	26.98	28.03
Mic.7	35.39	9.00
Mic.8	21.99	-4.55
Mic.9	34.36	-18.82
Source	0.00	0.00

발음을 측정된 실험에 대한 결과이다. 지면반사신호는 Mic. 7 하나를 적용했을 경우와 Mic. 7, 8 두 개를 적용했을 때 각각의 위치 추정 변화를 확인하였다. 지면반사신호를 적용하지 않고 9개 마이크로폰에서 측정된 직접 신호만을 사용하였을 때, 평면상 거리오차는 최대 0.26 m로 추정되었으나 높이 방향의 오차가 최소 5 m 이상 차이가 났다. 지면반사신호를 1개 이상 적용했을 때 평면상 오차는 비슷한 추정 오차를 보였으나 높이 오차가 많이 줄어든 것을 확인하였다. 반사신호 2개를 적용하였을 경우 높이 오차는 최대 0.7 m 이내로 줄었다.

지면반사신호의 적용 개수와 조합에 대한 상대적

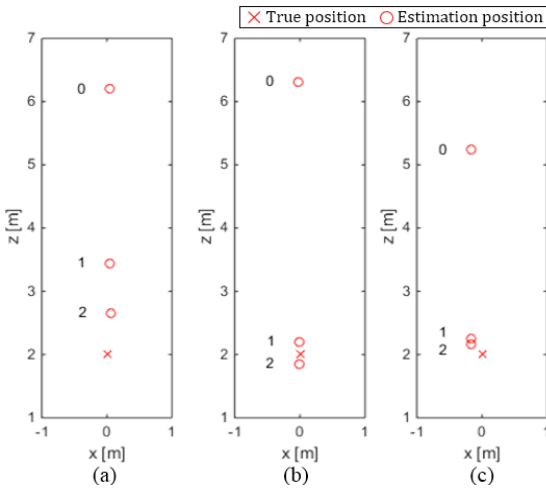


Fig. 6 Estimated height position for (1) test case 1, (2) test case 2 and (3) test case 3

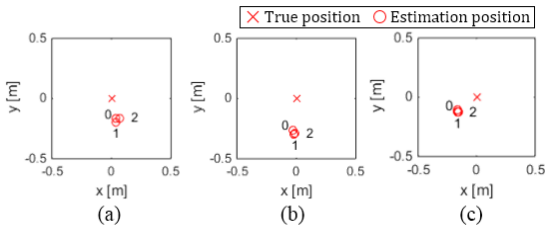


Fig. 7 Estimated planar position for (1) case 1, (2) case 2 and (3) case 3

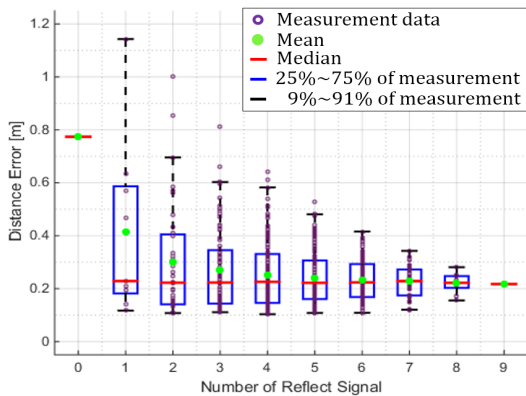


Fig. 8 Comparison of error due to combination of reflected signal

인 성능을 모든 경우의 수에 대해 계산한 결과를 Fig. 8과 Table 3에 나타내었다. 9개 마이크로폰에서 측정되는 직접신호와 반사신호를 선택적으로 계산하

Table 3 Comparison of the precision error about used reflect signal number

Used reflect signal number	TDOA combination number	Error	
		Median(m)	Mean(m)
0 (n=9, k=0)	1	0.774	0.774
1 (n=9, k=1)	9	0.289	0.412
2 (n=9, k=2)	36	0.223	0.301
3 (n=9, k=3)	84	0.223	0.270
4 (n=9, k=4)	126	0.226	0.252
5 (n=9, k=5)	126	0.222	0.241
6 (n=9, k=6)	84	0.224	0.233
7 (n=9, k=7)	36	0.229	0.227
8 (n=9, k=8)	9	0.222	0.222
9 (n=9, k=9)	1	0.217	0.217

였을 때의 통계적인 오차 저감 성능을 확인하였으며 실제 소음원과 추정 위치의 거리 차이로 나타내었다. 반사신호의 적용 개수가 많아질수록 평균적인 거리 오차가 줄어들어 예측 정확도가 높아지는 것을 확인하였다. 반사신호의 적용 개수가 적을 때 오차의 분산도가 크게 나타나는 것은 지면반사신호의 지연시간 측정 정확도가 결과에 크게 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 소음원로부터 측정 위치가 멀어질수록 지면반사경로 차이와 반사신호의 강도가 작아져 캡스트럼에서 지연시간 계산의 정확도가 떨어진 결과로 판단된다. 하지만 다수의 반사신호 조합에 의해서 측정 정확도가 개선되어 소음원의 위치 추정 오차 개선 효과를 확인할 수 있었다.

### 3. 결론

이 연구는 도달지연시간을 이용한 소음원의 위치 추정에 관한 것으로 지면반사현상을 이용해 추정 오차를 저감하는 방법을 제안하였다. 제안된 위치 추정 방법은 실의 실험 구성을 통하여 성능을 확인하였고 다음과 같은 결과를 확인하였다.

(1) 캡스트럼 분석을 통해 직접신호와 반사신호의 지연시간을 측정하였으며 지면에 대칭인 지점에 가상의 마이크로폰과의 도달지연시간과 같은 것을 확인하였다.

(2) 지면반사효과의 적용은 지면 위의 평면 마이크로폰 배열을 3차원 배열로 측정된 것과 같으며 평면 배열에서 취약한 높이 추정 오차를 개선하는

효과를 확인하였다.

(3) 지면반사효과가 명확하게 나타나고 반사신호의 적용 개수가 많을수록 위치 추정 성능이 향상되었다.

(4) 반사신호를 정확하게 획득하는 것이 위치 추정 성능을 향상시킬 수 있으며 음향반사효과가 명확하게 발생할 수 있도록 반사면을 제어한다면 다양한 환경에서 적용이 가능 할 것으로 판단된다.

## 후 기

이 연구는 2015년도 국방과학연구소 개별기초연구인 ‘차분위성항법 시스템을 이용한 이벤트 위치 측정 알고리즘 연구 (ADD-13-01-04-11)’ 및 ‘음향 빔형성기법을 이용한 유도탄 초기/종말 탄도계측 (ADD-13-01-01-02)’과제의 지원으로 수행되었습니다.

## References

(1) Rhee, W. and Choi, J.-S., 2006, Experimental Studies for Noise Source Positioning Using TDOA Algorithm, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 7, pp. 275~286.

(2) Lee, J.-H., Lee, J. H., Rhee, W. and Choi, J.-S., 2009, A Trajectory Identification Technique for Two Rotating Sound Sources with Different Frequencies, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 710~718.

(3) Go, Y.- J., Rhee, W., Choi J.-S., Ahn, B.-K. and Lee, C.-S., 2010, Doppler Effects in the Underwater Noise Source Localization, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 592~593.

(4) Choi, D. H., Go, Y.-J., Lee, J. H., Na, T. H. and Choi, J.-S., 2015, Study of Effectiveness of Atmospheric Environment on TDOA Position Estimation, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 150~154.

(5) Foy, W. H., 1976, Position-location Solutions by Taylor-series Estimation, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-12, No. 2, pp. 187~194.

(6) Bogert, B. P., Healy, M. J. R. and Tukey, J. W., 1963, The Queffreny Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo Autocovariance, Crosscepstrum and Saphe Cracking.



**Yeong-Ju Go** received B.S., M. S., in Dept. of Aerospace Engineering from Chungnam National University, Korea. He is a Ph.D. candidate. His research interests area in the area of aerodynamics and aeroacoustics.



**Donghun Choi** received B.S. in Dept. of Aerospace Engineering from Chungnam National University, Korea. He is eroacoustics.



**Jaehyung Lee** received B.S., M. S., in Dept. of Aerospace Engineering from Chungnam National University, Korea. He is a Ph.D. candidate. His research interests area in the area of aerodynamics and aeroacoustics.



**Jong-Soo Choi** received the B.S. from Seoul National University, the M.S. from KAIST and the Ph. D. degree from the Pennsylvania State University in 1991. He is currently a professor of Aerospace Engineering at Chungnam National University, Korea. His research interests include aerodynamics and aeroacoustics related to rotating machinery and moving vehicles.



**Jae-Hyoun Ha** received the B.S. degree in electronic engineering from the Kumoh National Institute of Technology, Korea, in 2002. He has been with the Agency for Defense Development, Chungnam, Korea, His current research interests include real-time data acquisition and array signal processing.