

빔 형성 방법을 이용한 회전하는 음원의 위치 판별에 관한 연구

Localization of Rotating Sound Sources Using Beamforming Method

이재형* · 홍석호** · 최중수***

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

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 frequency of interest. Experiments have been carried out for varying frequencies, rotating speeds and the object distances. Forward propagation method has shown better performance in locating source position than the backward propagation method.

1. 서론

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 움직이는 자동차나 항공기에 대한 소음측정 시 발생할 수 있으며, 실제 음원에서 발생 소음을 알기 위해서는 이 영향을 제거해야 할 필요가 있다. 이런 효과를 제거하는 방법은 센서에서 측정된 신호를 시간영역에서 소음발생시각에 따라 재구

성함으로써 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. 본 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.

2. 빔형성 방법

하나의 점음원에 대하여 다수의 센서로 구성된 어레이로 측정하였을 때, 각 센서의 신호는 음원

* 충남대학교 항공우주공학과

E-mail : aejohl@cnu.ac.kr

Tel : (042) 821-7776, Fax : (042) 825-9225

** 충남대학교 항공우주공학과 대학원

*** 충남대학교 항공우주공학과

파의 상대적인 거리 차에 의하여 위상차를 갖게 된다. 이 위상차 정보로부터 음원의 위치나 발생 방향을 파위의 분포로 알 수 있는 것이 빔형성 방법이다. 측정 공간이 원 음장 혹은 근접 음장인가에 의하여 센서에 도달하는 음파를 평면파 또는 구면파로 모델링하여 위상을 보상할 수 있다. 각 센서에서 발생하는 위상차는 상호상관함수는 행렬 G 의 형태로 표현된다. 모델링된 음장은 가상음원의 위치와 센서 간의 거리에 의하여 가중 벡터 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.⁽¹⁾⁽²⁾

3. 회전하는 음원에 대한 신호재구성

일정한 속도로 회전하는 음원의 원래 신호를 복원하기 위하여 발신시각추출법과 수신시각추출법을 사용하였다. 발신시각추출법은 음압신호가 발생하는 시각 t_e 로부터 발생 신호가 센서에서 측정되는 시각 t_r 을 계산하여 음압 신호를 재구성하는 방법이다. 우선 음원에서 일정한 시간 간격으로 신호가 발생하는 것으로 가정한다. 발생된 음압신호는 각 센서까지 도달하는데 걸리는 시간만큼 늦게 측정되고, 음파가 발생하는 각 순간 음원의 위치와 센서의 거리를 계산하여 음파가 전

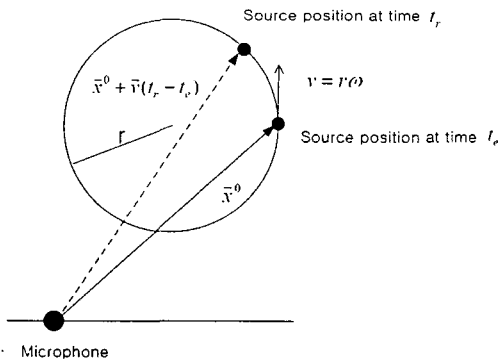


그림 1 Source rotating at constant angular speed

파되는 시간을 계산할 수 있다. 발생시각 t_e 와 계산된 전파 시간을 더하여 측정시간에 해당하는 음압을 구하고 이를 t_e 에 대한 신호로 재구성하면 된다.

수신시각추출방법은 측정 시각을 기준하여, 측정된 음파가 전달된 경로의 거리를 계산하여 발생 시간 t_e 에 대하여 음압을 재구성하는 방법이다. 일정한 간격으로 측정한 시간 t_r 로부터 신호가 발생된 시간을 전파된 거리로부터 계산하여 t_e 에 대한 음압 신호를 재구성할 수 있다. 그림 1은 반지름 r 의 거리에서 ω 의 속도로 회전하는 음원에서 발생하는 신호가 마이크로폰에 도달할 때의 모습을 보여주고 있다. t_e 는 음원에서 신호가 발생하는 시간을 나타내며 t_r 은 발생된 신호가 마이크로폰에 도달할 때의 시간을 나타낸다. 또한, \vec{x}^0 는 음원의 속도를 나타내며 \vec{x}^0 는 초기의 음원 위치, c_0 는 공기에서의 음파 속도이다.

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

식(2)를 이용하여 t_r 에 측정된 신호를 t_e 에 발생된 신호로 재구성할 수 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾

4. 실험 장치 구성

회전음원 시험 장치는 충남대학교 항공우주공학과와 반무향실에 그림2와 같이 설치되었다. 음원은 혼드라이버(horn driver)로부터 양끝이 개방된 파이프를 통하여 발생하도록 하였고 파이프를 회전할 수 있도록 하였다. 어레이와 음원 사이의 거리를 조절할 수 있도록 했고 음원의 회전속도를 모터로 조절할 수 있도록 구성하였다. 광센서를 이용하여 회전하는 음원이 12시 방향에 위치하였을 때 트리거 신호가 발생하도록 설정하였다. 26개의 마이크로폰으로 구성된 어레이의 형상 설계는 Dougherty가 제안한 나선형으로 하였다. 그림4는 어레이의 형상과 각 주파수에 대한 어레이의 응답특성을 보여주고 있다. 고주파수의 음원에 대한 분해능은 점차 좋아지나 사이드롭의 영향이 저주파수 음원에 비해 증가하는 것을 알 수 있다.

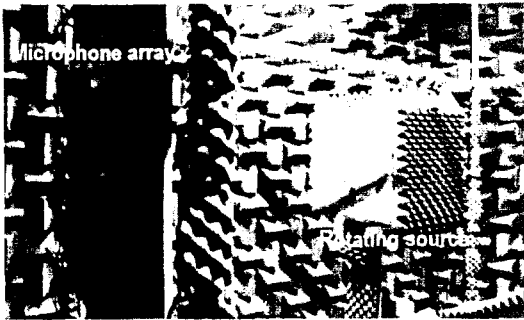


그림 2 Microphone array and rotating sources

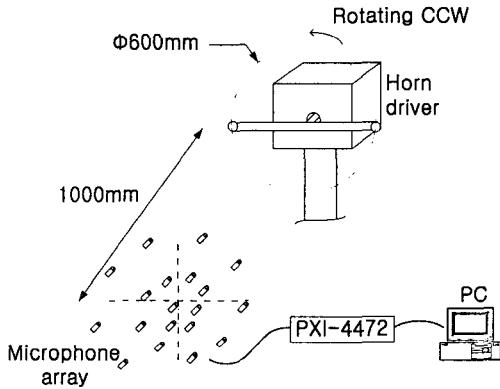


그림 3 Experimental set-up

5. 실험 결과 및 고찰

정지한 음원과 회전하는 음원에 대한 스펙트럼을 그림5에서 보여주고 있다. 3kHz의 정현파 신호를 발생하는 음원의 회전수가 150rpm에서 399rpm으로 증가함에 따라 도플러 영향에 의하여 주변 주파수로 확산되는(broadening) 현상을 확인할 수 있다. 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. 그림 6은 거리 1m에서 파이프를 정지시키고 5kHz의 정현파 음원에 대하여 분석한 결과이다. 이 결과로부터 정지음원의 경우, BROSI와

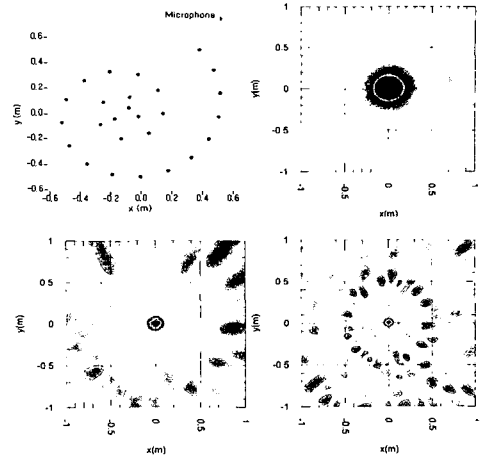


그림 4 Array shape designed(top left), beam patterns when distance between array and source is 1.0m, monopole 1kHz(top right), 3kHz(bottom left) and 5kHz(bottom right)

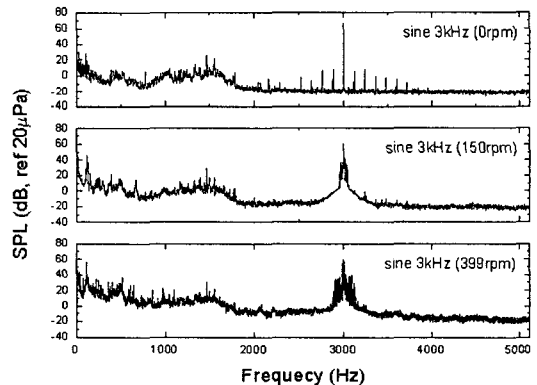


그림 5 Autospectrum of point source generating sine 3kHz when rotating at 0rpm(upper), 150rpm(middle) and 399rpm(bottom)

FROSI의 결과가 유사하게 나타남을 알 수 있다.

그림7은 400rpm으로 회전할 때 3kHz와 5kHz의 음원에 대한 STASI의 결과를 보여주고 있다. 도플러 영향을 제거하지 않음으로써 음원의 위치가 바르게 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 많은 사이드롭의 형태가 발생되는 것을 알 수 있다. 그림8과 그림9는 같은 실험 조건의 BROSI와 FROSI 결과를 보여주고 있다. BROSI의 결과에서 음원이 궤적을 벗어나 나타나는 것을 볼 수 있으나 FROSI의 경우 트리거 신호의 위치에서 음원을 확인할 수 있다. 사이드롭의 영향도 매우

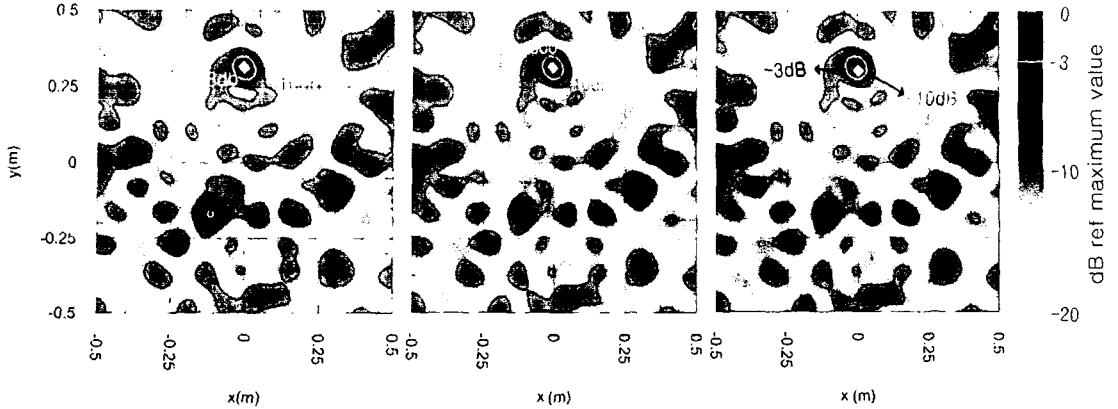


그림 6 Beamforming results of stationary source[5kHz, 0rpm] located at (0.0m, 0.3m) using STASI(left), BROSI(middle) and FROSI(right). Distance between array and source is 1.0m.

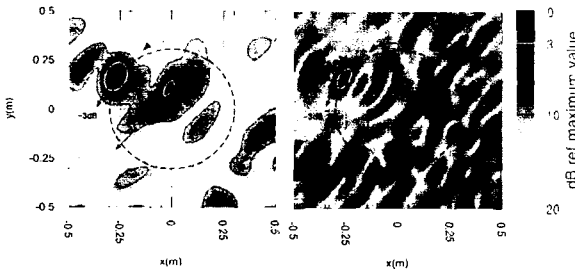


그림 7 Beamforming results by application of STASI on rotating(400rpm) source 3kHz(left), 5kHz(right). Distance is 1.0m.

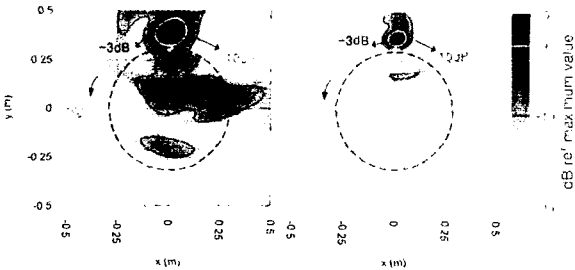


그림 8 Beamforming results by application of BROSI on rotating(400rpm) source 3kHz(left), 5kHz(right). Distance is 1.0m.

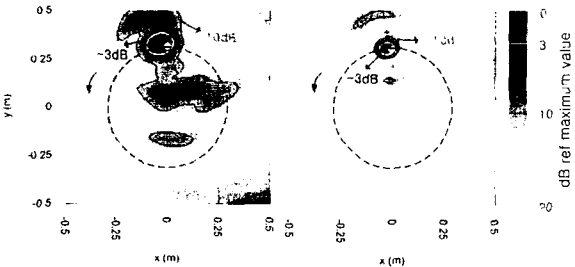


그림 9 Beamforming results by application of FROSI on rotating(400rpm) source 3kHz(left), 5kHz(right). Distance is 1.0m.

낮음을 확인하였다.

그림10과 그림11에서 400rpm으로 회전하는 5kHz의 음원과 어레이의 거리가 1m와 2m인 경우에 BROSI와 FROSI의 결과를 각각 비교하여 보았다. 그림 11에서 BROSI의 결과에서 측정거리의 차이에 따라 분해능도 차이를 보이고 있음을 알 수 있고 거리가 멀어질수록 음원의 위치도 부정확하게 보여주고 있다. 그림11은 FROSI의 결과에서 거리에 관계없이 5kHz의 음원의 위치를 정확하게 보이고 있다.

그림 12와 그림13은 관심 주파수 5kHz에 대한 음원으로부터의 거리를 1m로 고정한 뒤, 회전속도를 150rpm과 400rpm으로 한 경우에 대해 BROSI와 FROSI의 결과를 비교한 것이다. 150rpm의 두 알고리즘의 결과가 유사하게 나타나 는 것을 알 수 있고 속도가 증가한 400rpm에서 FROSI의 결과가 더 정확히 음원의 위치를 가리 키고 있다.

그림 14는 두 개의 같은 주파수 음원을 400rpm으로 회전하는 경우에 BROSI와 FROSI의 결과를 비교하여 보여주고 있다. FROSI의 결과가 더 정확한 음원의 위치를 보이고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

도플러 효과의 영향을 스펙트럼과 STASI의 결과로부터 확인할 수 있었으며 본 연구에서 구현된 BROSI와 FROSI를 이용한 도플러 효과의 제

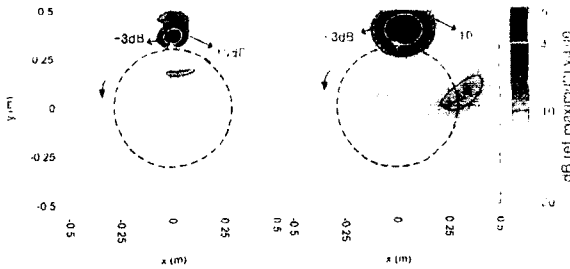


그림 10 Beamforming results by application of BROSI on rotating(400rpm) source of 5kHz. Distances are 1.0m(left) and 2.0m(right).

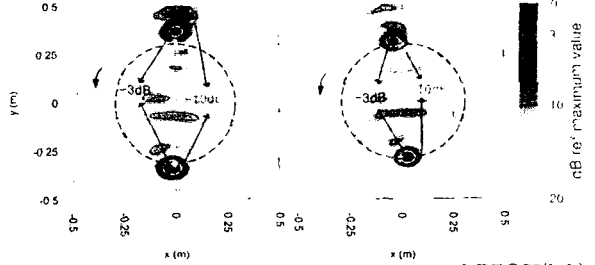


그림 14 Beamforming results by application of BROSI(left) and FROSI(right) on rotating(400rpm) two sources of 5kHz. Distances are 1.0m(left).

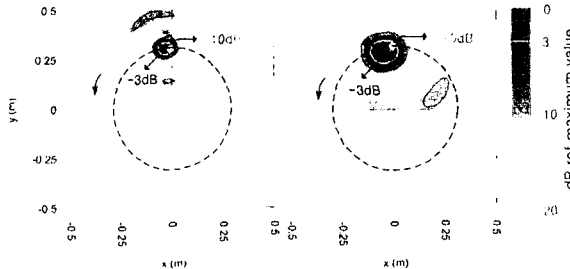


그림 11 Beamforming results by application of FROSI on rotating(400rpm) source of 5kHz. Distances are 1.0m(left) and 2.0m(right).

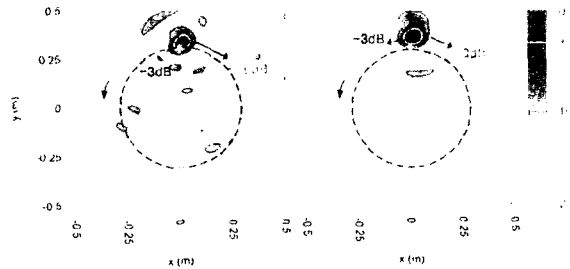


그림 12 Beamforming results by application of BROSI on rotating source of 5kHz. Distances are 1.0m. 151rpm(left) and 399rpm(right).

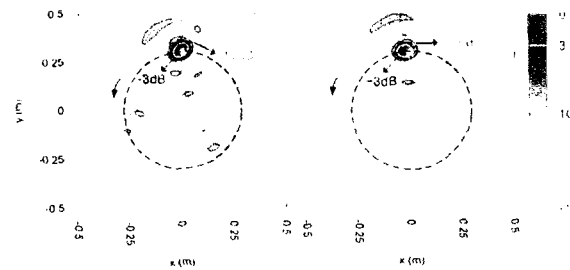


그림 13 Beamforming results by application of FROSI on rotating source of 5kHz. Distances are 1.0m. 151rpm(left) and 399rpm(right).

거 성능이 빔형성 방법의 결과에 나타남을 알 수 있었다. 실제 신호를 정확히 재구성하기 위하여 정확한 음원의 회전속도를 파악해야 하고 좌표에 대한 정확한 정보가 필요하다. 본 시험을 통해 빔형성 방법의 결과에서 회전속도나 거리에 의한 영향을 받지 않고 도플러 효과를 제거하는 성능을 확인하였다.

트리거 신호의 위치에 나타나는 음원의 크기 및 정확도는 관심주파수, 측정 거리와 회전 속도의 변화에 의한 영향이 있음을 결과에서 알 수 있고 BROSI와 FROSI의 적용 결과에서도 차이를 관찰할 수 있었다. FROSI의 경우, 발생시각으로부터 실제 음압을 재구성하는 과정의 계산 시간이 BROSI의 경우보다 짧은 장점을 가지고 있고 트리거 위치에 대하여 직접 재구성하는 간단한 알고리즘을 가지고 있어 더 정확한 결과를 내는 것으로 판단된다.

후기

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

참고 문헌

- (1) Johnson, D. H., Dudgeon, D. E., 1993, Array Signal Processing: Concepts and Techniques, Prentice-Hall.
- (2) Thomas J. Mueller, Aeroacoustic Measurements.
- (3) Dowling, A. P., and Ffowcs Williams, J. E., Sound and Sources of Sound, Ellis Horwood, Chichester, England UK, 1983 Chap.9.
- (4) Hiroshi Takata, Takuo Nishi, Hyungseok Kook,

Gregory Moebs, Patricia Davies and J. Stuart Bolton, "Visualization techniques to identify and quantify sources and paths of exterior noise radiated from stationary and nonstationary vehicles", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000.

(5) P. Sijtsma, S. Oerlemans and H. Holthusen "Location of rotating sources by phased array measurements", 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Maastricht, The Netherlands, on 28-30 May 2001.

(6) Barsikow, B., King III, W. F., "On Removing the Doppler Frequency Shift from Array Measurements of Railway Noise" Journal of Sound and Vibration, Vol. 120, No.1, 1988 pp 190-196.

(7) Howeel, A. J., Bradley, M. A., McCormick, M. A., and Brown, J. D., "De-Dopplerization and Acoustic Imaging of Aircraft Flyover Noise Measurements" Journal of Sound and Vibration, Vol. 105, No.1, 1986 pp 151-167.

(8) Jeffrey, J., Kelly and Mark, R., Wilson, "De-Dopplerization of Aircraft Acoustic Signals"

AIAA Vol.32. No.5, 1995.

(9) Barsikow, B., "Experiences with Various Configurations of Microphone Arrays used to Locate Sound Sources on Railway trains Operated by the DB AG", Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, No.1, 1996 pp 283-293.

(10) H.Kook, 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.

(11) 이재형, 최종수, 박규철, "마이크로폰 어레이를 이용한 2차원 공동 유동에 대한 소음원 규명", 한국소음진동공학회 추계학술발표회 논문집, pp.701~708, 2003.

(12) 이재형, 황선길, 최종수, "마이크로폰 어레이를 이용한 두 개의 동일 주파수 소음원의 위치 규명에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술발표회 논문집, pp.735~741, 2003.

(13) 홍석호, 이재형, 최종수, "팁제트 로터에서의 소음원 측정에 대한 실험적 연구", 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집. 2004.