

풍동 조건의 마이크로폰 어레이 측정에서 전단층 보정에 관한 연구

Study on Shear Layer Correction of Microphone Array Measurement in the Wind Tunnel Test

김 위 준[†] · 이 욱^{*} · 최 종 수^{*}

Wi-Jun Kim, Wook Rhee and Jong-Soo Choi

(2008년 1월 31일 접수 ; 2008년 4월 10일 심사완료)

Key Words : Shear Layer Correction(전단층 보정), Source Localization(소음원 추적), Microphone Array(마이크로폰 어레이), Beamforming(빔포밍), Wind Tunnel Test(풍동 실험)

ABSTRACT

Microphone array beamforming method has been recognized as an important aeroacoustic research field and become a standard technique in localizing sound sources. This method also used in flight acoustic measurement, and especially, it is very useful when measure sounds inside the wind tunnel. In measuring sound which is inside the wind tunnel by traditional beamforming method, there are some errors caused by airstream. The speed and the propagation path of the sound changes as it travel through the airstream. This makes the error which the position of sound is changed a little bit to the down stream direction. In this paper, validation test has made about the correction equation for this wind effects of previous researches. And beamforming including shear layer correction was performed about a sound source in the anechoic open-jet wind tunnel.

1. 서 론

마이크로폰 어레이는 공력 소음 분야에서 중요한 연구 부분이 되었으며 소음의 위치 추적에 있어서 기본이 되는 기술이 되었다. 또한 마이크로폰 어레이와 함께 적용하는 빔 형성 기법은 소음의 위치를 찾아내는데 좋은 해결책이 되고 있다. 항공기 소음 연구에서도 마이크로폰 어레이를 이용한 빔 형성 기법은 매우 유용하게 쓰이고 있다. 특히 풍동 실험 시 발생하는 소음을 측정하기 위한 용도로 마이크로폰 어레이는 매우 유용한 방법 중의 하나이다. 그러나 유속이 없을 경우의 측정과는 달리 유속이 존재

하는 풍동 조건과 같은 경우에는 일반적인 측정 기법을 적용할 경우, 유동의 도플러 효과에 따른 오차가 발생한다.

풍동 실험의 소음을 측정할 경우 적용할 수 있는 보정식을 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 폐쇄형 풍동과 같이 마이크로폰이 소음원과 같은 유동장 내에 있는 경우가 있다. 이 경우 통상적으로 마이크로폰 어레이는 풍동 벽면과 동일한 평면상에 위치하도록 설치한다. 유동장 내에서 음파의 전달 경로는 유속에 따라서 바뀌게 되므로 경로 변화에 대한 보정을 해 주어야 한다. 그러나 측정하는 마이크로폰도 같은 유동 내에 있으므로 주파수의 변화(doppler shift)는 발생하지 않는다. 하지만 이 경우는 유동 내에 마이크로폰이 존재하기 때문에 자체소음으로 불리는 유동에 의한 간섭이 측정에 영향을 준다.

[†] 교신저자: 정회원, 충남대학교 항공우주공학과
E-mail : wj_airborne@cnu.ac.kr
Tel : (042)821-7774, Fax : (042)825-9225

^{*} 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

다른 하나는 개방형 풍동과 같이 마이크로폰이 유동 밖에서 측정하는 경우이다. 이때 측정센서는 유동장 외부에 존재하므로 자체소음이 발생하지 않는 장점이 있다. 그러나 유동 내부, 외부 사이에 존재하는 전단층(shear layer) 때문에 음파의 굴절이 발생하며, 따라서 이 경우에는 유동 내 경로의 변화뿐만 아니라 굴절에 의한 효과도 보정도 해 주어야 한다.

이 연구에서는 빔 형성 기법을 풍동 조건에서 적용하기 위하여 유동장 효과에 대한 보정기법을 정리하였다. 기존 연구자들의 보정기법^(1,2)을 적용한 풍동 실험을 통하여 전단층 보정기법의 타당성을 검증하였으며, 이를 풍동 조건에서의 빔형성 기법에 적용하는 검증 실험을 수행하였다.

2. 풍동 실험에서의 전단층 보정

2.1 폐쇄형 풍동에서의 보정방법

유동장 내부에 유동과 같은 방향으로 고정된 마이크로폰은 음압과 유동장의 마하수, 그리고 센서의 각도 등과 같은 조건에 관련되어 발생하는 난류의 압력을 측정하게 된다. 유동 내의 마이크로폰에서는 유속이 있음에도 불구하고 도플러 효과에 의한 주파수의 교란은 발생하지 않는다. 고정된 관찰자에게 유동에 의해 변화된 파동의 진행 속도는 파장의 변화로 나타나므로 측정된 주파수는 소음으로부터 발생한 것과 동일하게 관측된다. 그러나 유동에 의해 변화된 파동은 음파의 전달 경로에 영향을 주게 된다.

Fig. 1은 마하수, M 의 유동 내부의 소음을 동일한 유동장 내의 마이크로폰을 이용하여 측정하는 경우의 상관도를 나타낸 것이다. θ_m 는 유동 방향으로부

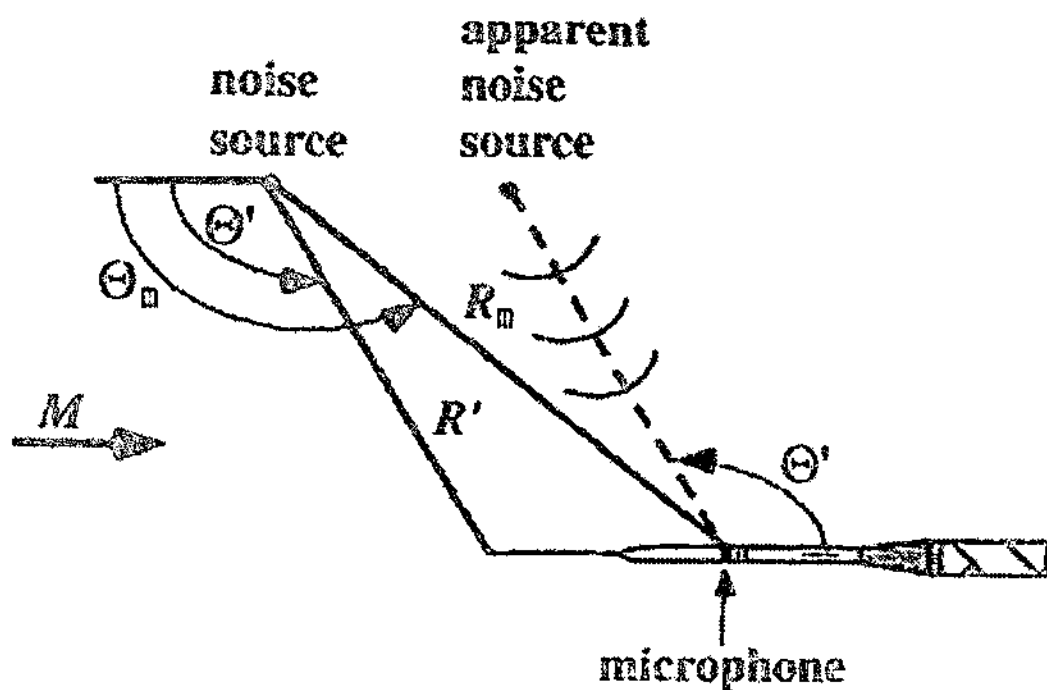


Fig. 1 Sound propagation paths and angles in a moving stream

터 음원과 측정 마이크로폰과의 각도를, R_m 은 음원과 마이크로폰이 이루는 거리를 나타낸다. 실제 마이크로폰에 도달하는 소음의 경로는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 유속에 의해 R_m 이 아닌 R' 을 따라 이동하게 된다. 이 경우 전단층이 존재하지 않는 자유류 내부에 위치한 마이크로폰에 대하여, 유동에 의하여 교란된 음파의 전달경로, R' 과 각도, θ' 은 다음과 같이 계산할 수 있다⁽¹⁾.

$$\theta' = \cos^{-1} \left[M \sin^2 \theta_m + \cos \theta_m \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta_m} \right] \quad (1)$$

$$R' = \frac{R_m}{-M \cos \theta_m + \sqrt{M^2 \cos^2 \theta_m - M^2 + 1}} \quad (2)$$

$$f_d = \frac{f}{1 - M \cos \theta'} \quad (3)$$

움직이는 소음원에서 발생하는 음파를 고정된 마이크로폰에서 측정한 경우, 도플러 효과에 의한 주파수 산란이 일어나는데, 소음원의 주파수, f 에 대하여 외부 관찰자가 보는 주파수, f_d 는 식 (3)과 같아진다. 하지만 풍동실험 조건에서, 고정된 소음원과 마이크로폰의 경우, 이의 상대 위치가 변화되지 않기 때문에 이러한 주파수 산란은 발생하지 않게 된다.

2.2 개방형 풍동에서의 전단층 보정방법

개방형 풍동에서 소음특성을 측정하는 경우, 유동 내부와 외부 사이의 전단층은 음파를 굴절시키게 되는데, 이는 소음이 방사되는 각도, 유동의 속도(즉, 마하수)에 의하여 결정되어지며, 소음의 전파 방향 및 음압 레벨을 변화시키게 된다. 따라서 유동 외부에서 마이크로폰을 이용하여 소음을 측정할 경우에는 유속 뿐만 아니라 음파의 굴절에 의한 전달 경로 변화에 대해 측정 데이터를 보정해 주어야 할 필요가 있다. Amiet 등은 전단층을 두께가 없는 경계면으로 가정하고 굴절 현상에 대한 보정 기법을 제시하였다⁽²⁾.

Fig. 2는 풍동에서부터의 유동과 전단층, 그리고 소음원과 측정 마이크로폰과의 상관도이다. θ_m 과 R_m 은 공간상에서 소음원과 음파 사이의 직선경로의 각도와 거리를, θ' 은 기존 자유류 조건에서의 음파 전달경로의 각도를, θ 는 전단층에 의하여 교란된 음파 전달경로의 각도를 나타낸다. 실선은 실제 마이

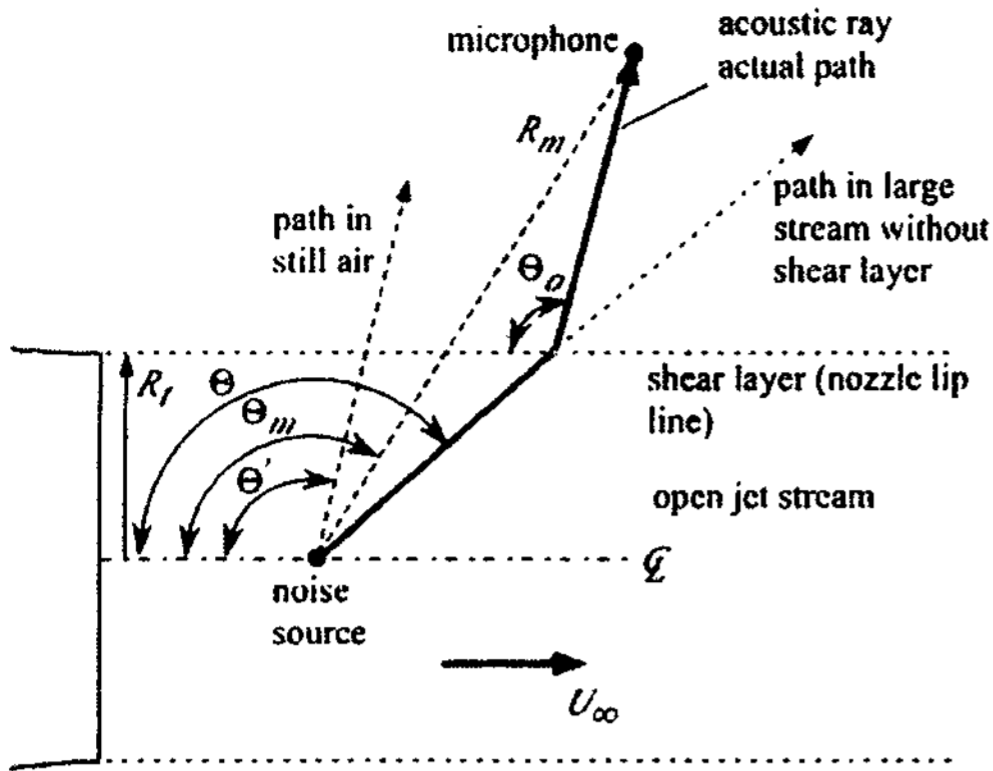


Fig. 2 Open-jet shear layer refraction as modeled by a vortex sheet at the nozzle lip line

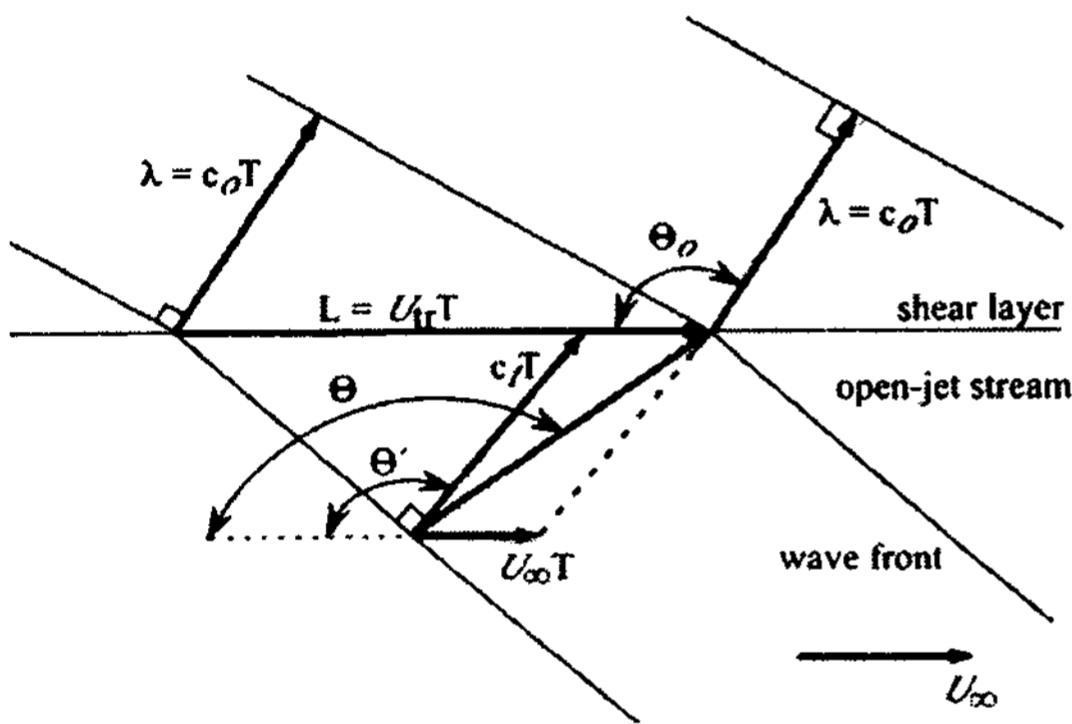


Fig. 3 Wave refraction at the shear layer

크로폰에 도달하는 소음의 경로를 나타내고 있으며 각각의 경로가 유동과 이루는 각도를 표기해 두었다. 그림에 도시된 바에 의하면 마이크로폰에 소리가 도달하기까지의 경로는 R_m 보다 길어졌지만 유속 내에서의 소음의 속도가 원래 속도와 유속의 합 벡터로 나타나므로 도달 시간은 변화하게 된다.

Fig. 3은 유동 내 외부 사이의 음파의 전달 과정을 도시하고 있다. 그림으로 부터 알 수 있듯이 유동 내에서는 유동의 속도에 의해 음파의 속도가 달라진다. 이로 인해 음파의 경로는 소음과 마이크로폰 사이의 직선거리보다 증가하지만 도달 시간은 유속의 영향으로 더 줄어들게 된다. 실제 마이크로폰으로 측정하는 신호를 보정하기 위해서는 소음의 이동 경로를 알아야 한다. 그림으로부터 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$R_m \cos \theta_m = R_t \cot \theta + (R_m \sin \theta_m - R_t) \cot \theta_0 \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta'}{\cos \theta' - M} \right) \quad (5)$$

또한 그림의 속도 벡터는 다음과 같은 관계를 지니고, 이를 마하수의 식으로 변환하면 식 (7)과 같으며, 식 (4)~(7)의 연립방정식에 의하여, 실험 조건에서의 전단층에 의하여 교란된 음파의 전파경로를 계산할 수 있다. 이때, 연립방정식의 이론해의 계산이 힘들기 때문에 이 연구에서는 수치적 반복계산에 의하여 이를 계산하도록 하였다.

$$U_{tr} = U_{\infty} - \frac{c_t}{\cos \theta'} = \frac{-c_0}{\cos \theta_0} \quad (6)$$

$$M = \frac{1}{\cos \theta'} - \frac{c_0/c_t}{\cos \theta_0} \quad (7)$$

이때, c_0 는 전단층 외부에서의 음속을, c_t 는 전단층 내부에서의 음속을, U_{tr} 은 두께가 없는 경계면으로 가정한 전단층에서의 유속을 나타낸다. 그리고 이 연구와 같은 풍동 실험조건에서는 대기 조건에 대한 변화가 없다고 볼 수 있으므로, c_0/c_t 는 1로 가정하였다.

3. 검증 실험의 수행

3.1 실험 장치의 구성

전단층에 의한 신호 지연을 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 10개의 마이크로폰을 등간격(75 mm)으로, 소음원으로부터 1 m 거리에 설치했다. 풍동 시험부의 크기는 400×400 mm 이며 시험부 중앙에 소음원을 위치시켰다. 정현파로 구동되는 소음원에 대하여, 서로 다른 풍속과 소음원의 주파수 조건에서 각 마이크로폰의 수신 신호를 동시에 수집하였다. 데이터 수집은 20 kHz/sec로 샘플링 하였으며, 채널 별 독립적인 AD 컨버터를 가지고 있어 동시 샘플링이 가능한 NI-PXI 4472를 사용하여 측정에서의 채널 간 위상차가 발생하지 않도록 하였다.

3.2 풍속에 따른 수신신호의 위상차 비교

풍동 조건에서의 음파 전달경로 변화에 따른 마이크로폰 수신신호의 위상차를 비교하기 위하여, 1번 센서를 기준으로 한 각 센서 취득 신호의 위상 차이를 비교하였다. 위상차이의 측정을 위해서는 수신

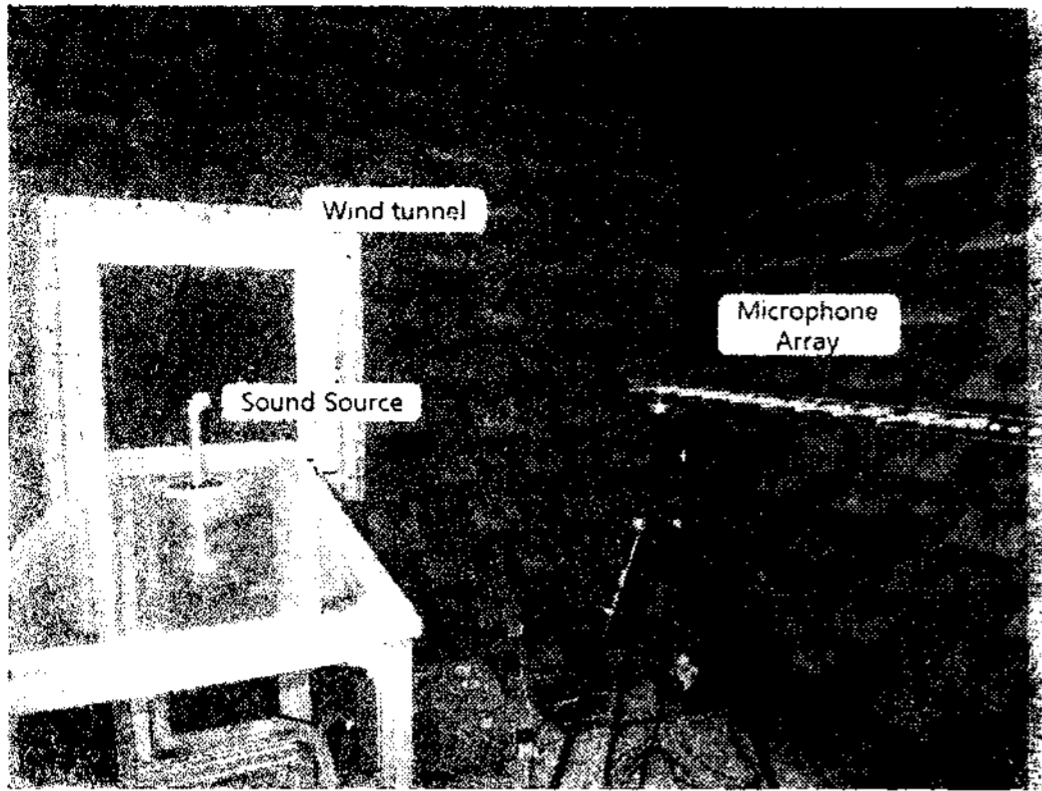


Fig. 4 Test arrangement in a semi-anechoic open jet type wind tunnel

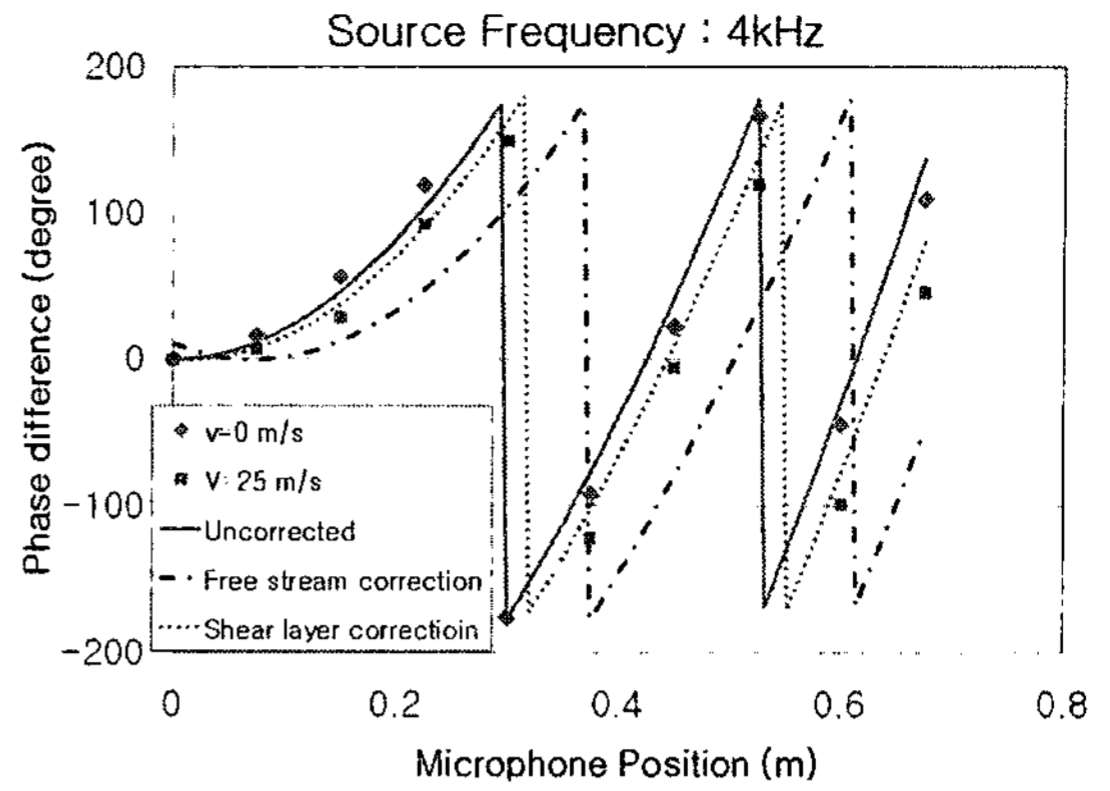


Fig. 6 Phase difference according to flow speed and application of correction methods

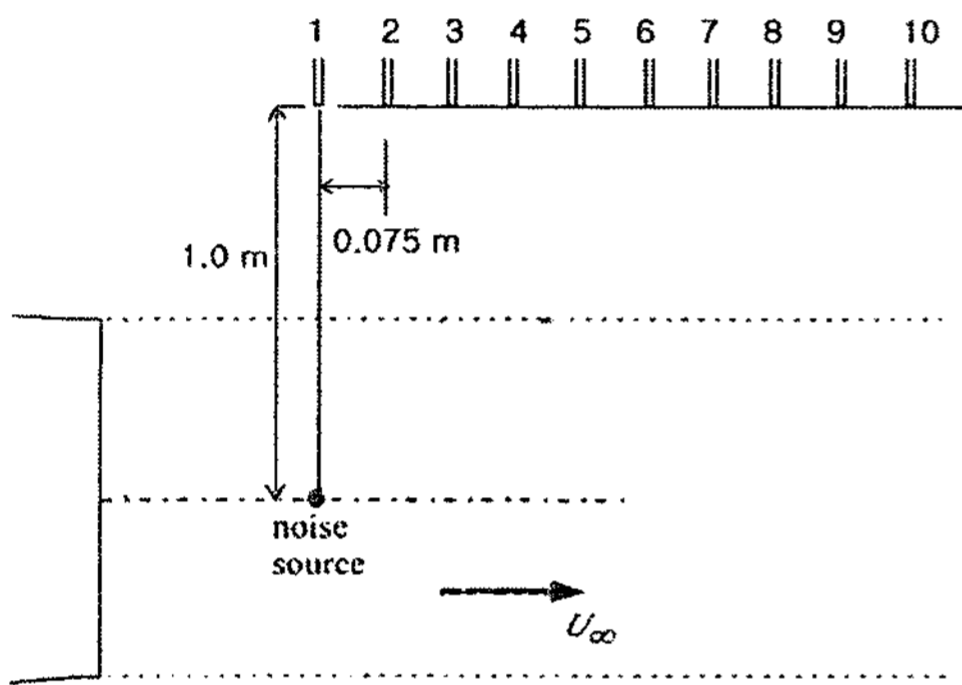


Fig. 5 Sensor arrangement of validation test

신호에 대한 교차 스펙트럼에서 소음원의 주파수에서의 위상을 얻는 방법을 사용하였다. 측정에서 유동이 없는 경우에 비하여 유속이 증가함에 따라 위상의 차이가 커짐을 확인할 수 있었다. 그리고 측정 결과를 각 센서간 거리 차에 의한 이론적인 위상차와 유속에 대해 두 가지 보정식을 적용한 경우와 함께 비교하였다.

Fig. 6은 측정결과와 이론치를 비교한 것이다. 경로변화에 대한 보정을 하지 않은 경우의 이론적 위상차는 유속 0 m/s의 측정 결과와 일치한다. 유속 25 m/s의 측정에서 위상의 추가적 지연이 생기는 것을 확인할 수 있다. 이의 보정을 위하여 2가지의 보정식을 적용할 경우, 식 (2)의 자유류 가정을 적용할 경우 측정결과에 비하여 더 큰 위상지연을 계산하게 된다. 이는 전단층에서의 굴절을 고려하지 않기 때문이며, 식 (4)~(7)의 연립방정식에 의하여 계산된 전단층 보정식을 적용한 경우는 측정 결과와 유사한 경향을 나타냄을 확인할 수 있다.

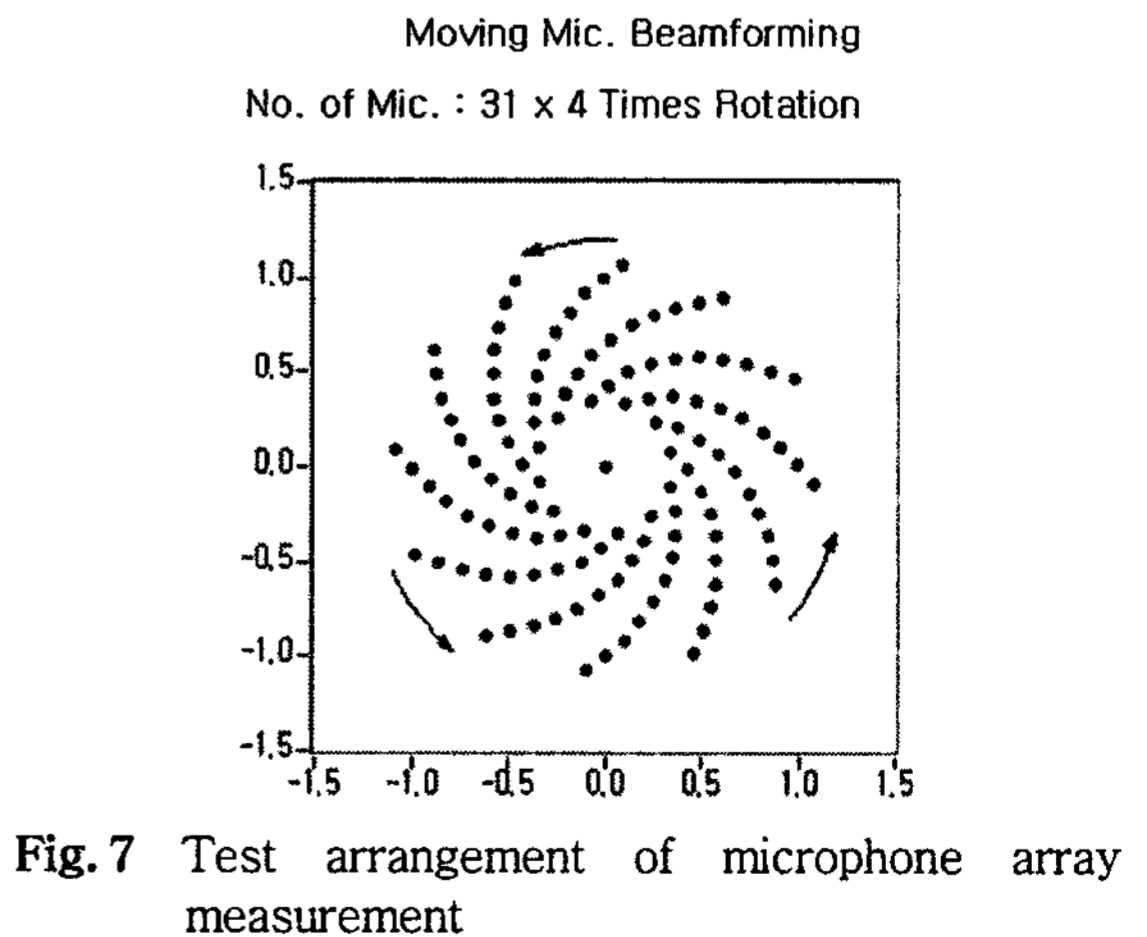
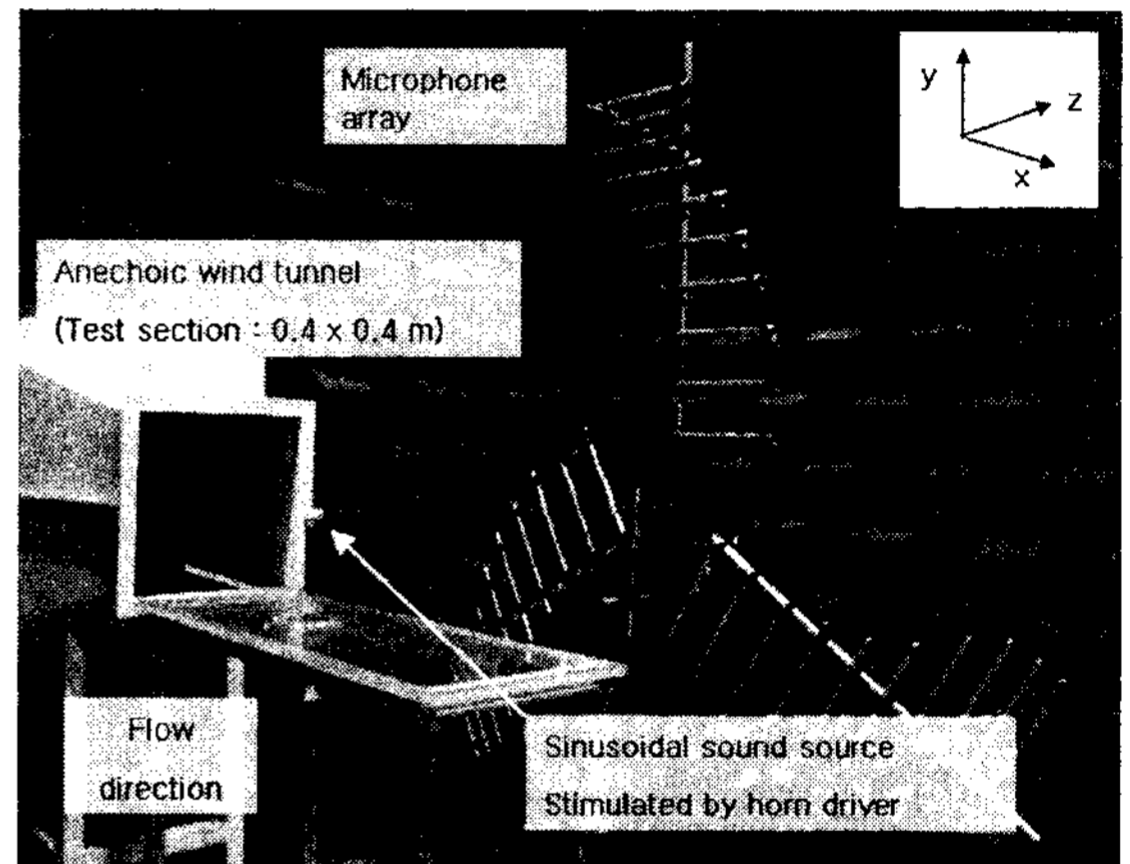


Fig. 7 Test arrangement of microphone array measurement

3.3 빔형성 기법에서의 전단층 보정의 적용
 마이크로폰 어레이를 이용한 빔형성 기법의 적용은 공력소음 분야의 다양한 측정 환경에 적용되어 오고 있다⁽³⁻⁵⁾. 이 연구에서의 빔 형성기법의 적용은

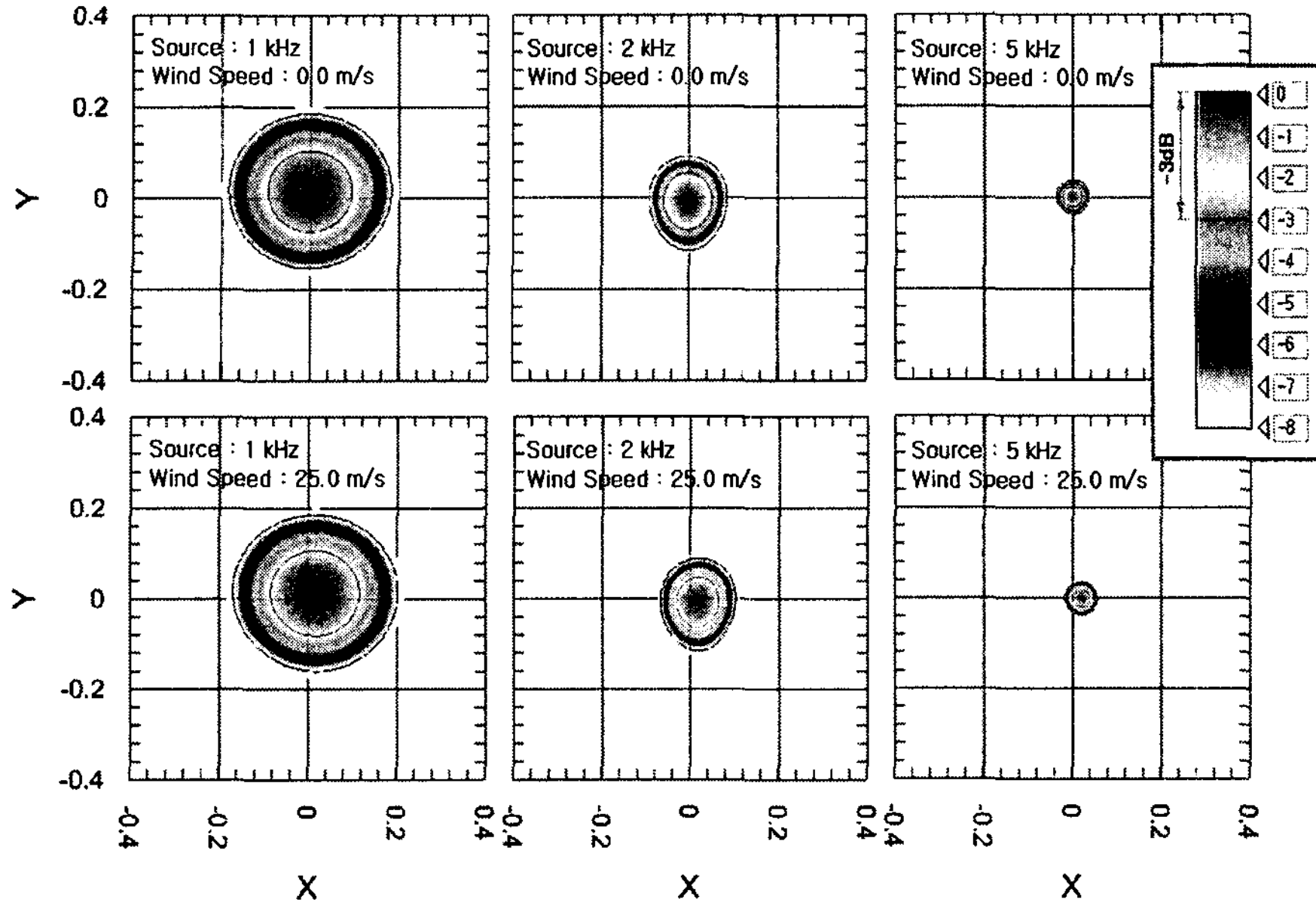


Fig. 8 Measured beam power map for the various source frequency and wind speed

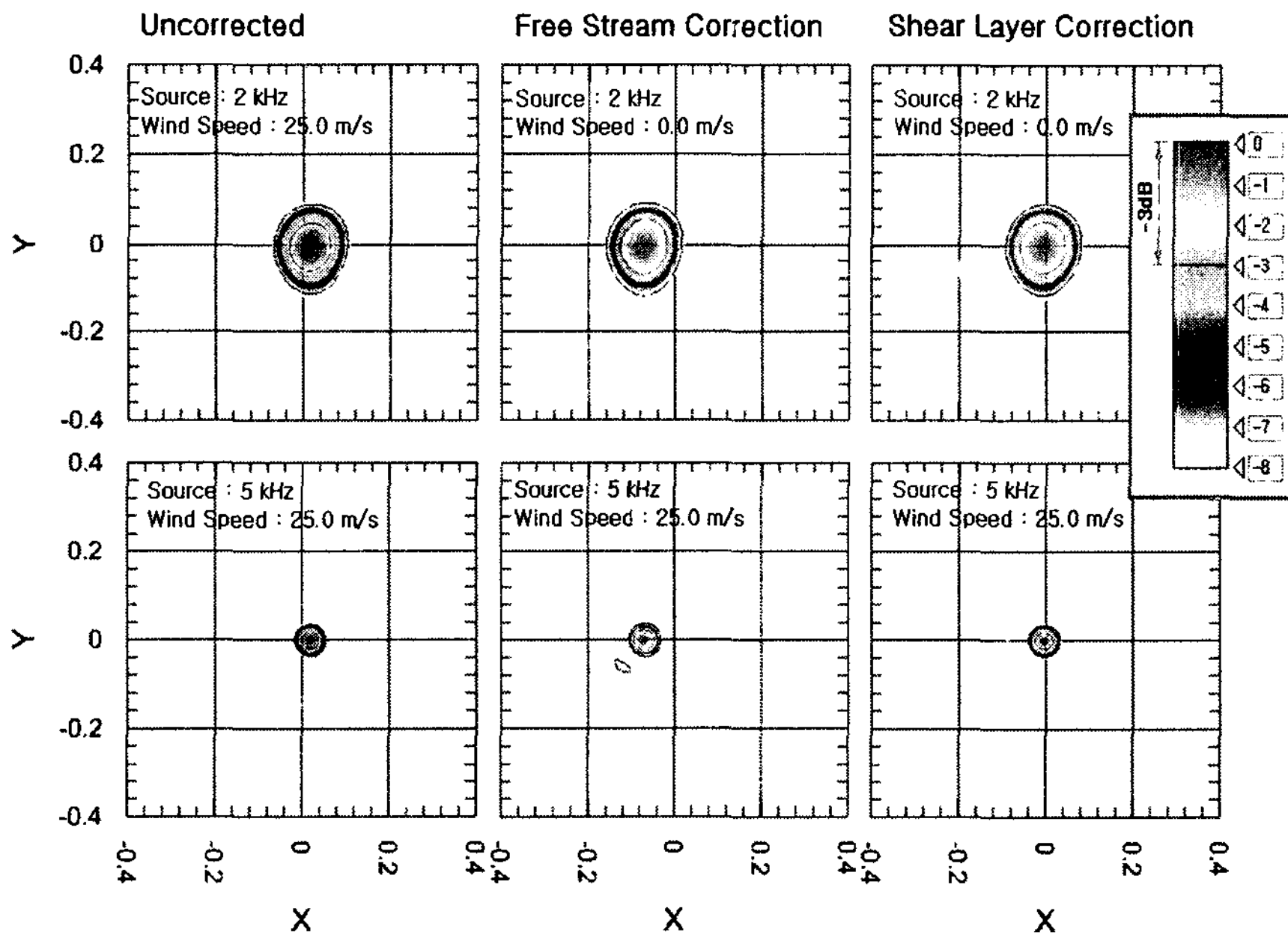


Fig. 9 Application of various correction method to the measured beam power map

기존 연구에서 사용했던 방식과 동일한 방법을 사용하였는데, 측정 신호에 대한 조화평균된 상관 스펙트럼 행렬, $\langle A \rangle$ 을 계산하고, 조향벡터, \vec{C}_m 의 적용에 의하여 가상 소음원에서의 빔 파워맵을 계산하는 방식을 사용하였다. 이때 마이크로폰 자체소음을 고려, 대각항 제거 기법을 활용하였다⁽⁶⁾.

m 번째의 가상 소음원 위치에서의 빔 파워는 다음과 같이 계산되는데, \vec{C}_m^\dagger 는 조향 벡터의 에르미트 공액(hermitian conjugate)이다.

$$b_m = \vec{C}_m^\dagger \langle A \rangle \vec{C}_m \quad (8)$$

조향벡터의 계산은 소음원을 구면파 형태의 전파 특성을 지니는 것으로 가정하고, m 번째의 소음원과 n 번째의 측정센서간의 조향 벡터는 식 (9)와 같이 적용한다. 이렇게 계산된 m 번째 소음원에서의 모든 센서의 조향벡터로 구성된 행렬을 조향벡터 행렬, \vec{C}_m 로 표시한다.

$$C_{nm} = \alpha \frac{e^{jk_0 r_{nm}}}{r_{nm}} \quad (9)$$

$$\text{where, } \alpha = \frac{1}{\sqrt{\sum_{n=1}^N r_{nm}^2}}$$

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

이때 전단층 보정기법의 적용은 소음원과 센서 사이의 거리, r_m 의 보정을 통하여 얻을 수 있는데, 이의 적용에서 공간상의 거리를 각 보정식에 의하여 계산된 음파 전달경로 상에서의 거리로 치환하면 각 보정식을 적용한 빔 파워맵을 얻을 수 있다. Fig. 7과 같이 구성된 마이크로폰 어레이 측정에서는 움직이는 마이크로폰 어레이에 의한 정밀도 향상기법을 적용 하였다⁽⁷⁾. 이때 보정기법의 적용을 위하여 좌표축은 유동의 하류방향을 기준으로 x축을 설정하였다. 이 연구에 적용된 두 가지의 보정기법은 유동의 방향을 각도 계산의 기준으로 사용하고 있으므로 좌표축 설정 시 이에 따른 고려를 하여야 한다.

3.4 보정식 적용에 따른 빔형성 기법 적용결과

Figs. 8, 9는 개방형 풍동조건에서 빔형성 기법을 적용하여 측정된 빔파워맵을 나타낸 것이다. Fig. 8의 보정기법을 적용하지 않은 경우를 살펴보면, 빔 파워 맵의 최대 레벨을 나타내는 위치로 추정할 수 있는 소음원의 위치가 유동이 있을 경우 모든 주파수 조건에서 실제 위치인 (0,0)을 기준으로 하류 방향으로 이동함을 볼 수 있다. 이러한 오차는 전술한 음파의 전파경로 변화에 따른 것이다. 또한 유동의 유무에 따라 빔폭이나 부엽특성의 변화는 없으므로 빔형성 기법 자체의 성능은 유동 특성에 따라 영향을 받지 않음을 볼 수 있다.

서로 다른 보정방법을 적용한 결과를 비교한 Fig. 9를 보면 보정기법을 적용하지 않은 경우와 비교하여 자유류 가정의 보정기법을 적용한 경우 이전의

하류쪽으로 이동한 것과는 반대로 상류쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 이는 보정에 의하여 적용한 거리가 실제 보다 더 큰 값으로 되었기 때문으로 볼 수 있다. 하지만 Amiet의 전단층 보정식을 적용한 경우 실제의 소음원 위치와 일치하는 특성을 나타냄을 볼 수 있었다.

4. 결 론

빔 형성기법을 활용한 마이크로폰 어레이 측정에서의 유동장 내부의 소음원의 음파 전달경로의 유속에 따른 변화를 보정하기 위하여 기존 연구에서 제시된 전파 특성 보정식 적용의 타당성을 수신 신호에 대한 위상차 비교와 빔 형성기법의 적용에 대한 실험을 통하여 검증하였다. 실험결과의 비교에서 이 연구에서와 같은 개방형 시험부를 지니는 풍동 실험에서는 자유류 가정을 통한 보정식을 활용할 경우 센서간의 위상차 측정의 오차가 더 증가하나, Amiet가 제안한 전파 경로 보정식을 활용하면 정확한 위상차를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 이의 빔형성 기법에 대한 적용을 통하여 유동장에 의하여 발생한 소음원 위치의 추정 오차를 없앨 수 있음을 확인하였다.

따라서 이러한 전파특성 보정기법은 풍동실험 시 시험부의 특성에 따라 차등 적용하여야 하는데, 폐쇄형 시험부를 갖는 풍동에서 벽면에 장착한 마이크로폰을 활용하는 경우는 기존 연구에서 확인한 바와 같이 자유류 가정에 의한 보정식의 적용을 통하여 도플러 효과를 제거할 수 있으며, 개방형 시험부를 갖는 풍동에서 유동장 외부의 마이크로폰을 활용하는 경우, 전단층에서의 굴절에 대한 보정을 수행하여야 한다.

후 기

이 연구는 중소기업청에서 주관하는 중소기업 산학협력 사업의 일환으로 수행하는 “산학연 공동기술 개발 컨소시엄 사업”의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Mueller, T. J.(Ed.), 2002, “Aeroacoustic

Measurements, Springer-Verlag", Berlin.

(2) Amiet, R. K., 1978, "Refraction of Sound by a Shear Layer", Journal of Sound and Vibration, Vol. 58, No. 4, pp. 467~482.

(3) Oerlemans, S. and Sijtsma, P., 2004, "Acoustic Array Measurements of a 1:10.6 Scaled Airbus A340 Model", AIAA-2004-2924, Proc. of 10th AIAA/CEAS Aero-acoustics Conference.

(4) Remillieux, M., Camargo, H., Burdisso, R. and Ng, W., 2007, "Aeroacoustic Study of a 26%-scale, High-fidelity, Boeing 777 Main Landing Gear in a Semi-anechoic-wind-tunnel Test Section", AIAA-2007-3453, Proc. of 13th AIAA/CEAS Aero-acoustics Conference.

(5) Brusniak, L., Underbrink, J. and Nesbitt, E., 2007, "Phased Array Measurements of Full-scale Engine Exhaust Noise", AIAA-2007-3612, Proc. of 13th AIAA/CEAS Aero-acoustics Conference.

(6) Rhee, W., Park, S., Choi, J.-S. and Kim, J. M., 2006, "Elimination of Self Noise & Doppler Effects from the Microphone Array Measurement", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 677~682.

(7) Kim, W. J., Rhee, W. and Choi, J.-S., 2007, "Performance Enhancement of Beamforming Method Using Moving Microphone Array", Proc. of JSASS-KSAS Joint International Symposium on Aerospace Engineering.