

폐쇄형 시험부에서 케블라 덮개가 장착된 마이크로폰 어레이의 주파수 특성에 대한 실험적 연구

A Experimental study on frequency characteristics of the microphone array covered with Kevlar in closed test section wind tunnel

황은수† · 최영민* · 한형석** · 김양원** · 조태환**

Eun-sue Hwang, Youngmin Choi, Huyngsuk Han, Yangwon Kim, Taehwan Cho

Key Words : Closed test section(폐쇄형 시험부), Kevlar(케블라 섬유), Self-noise(자체소음), Wind tunnel test(풍동실험), Microphone array(마이크로폰 어레이), aeroacoustic(공력소음), Beamforming method(빔형성 방법)

ABSTRACT

A Experimental study on frequency characteristics of the microphone array covered with Kevlar in closed test section wind tunnel. Microphones that are flush mounted in a closed test section wall of wind tunnel are subject to very high flow noise resulting from the turbulence in the wall boundary layer. At this time the microphones measure the strong hydrodynamic fluctuations generated by the flow. The phenomena are referred to a microphone self-noise and a method for reducing this has studied. In this paper the array that covered with acoustically transparent Kevlar sheet was designed and made to reduce the flow-induced self-noise. For the validation frequency characteristics of the Kevlar, the microphone array was installed on the wall and test was performed for white noise and sine wave of several frequencies using loudspeaker. In addition, the paper compared the signals as a tension of Kevlar. The results were presented that tend to decrease the sound pressure level at high frequency above 3500Hz according to existence of Kevlar.

1. 서 론

폐쇄형 시험부에서 마이크로폰(Microphone)을 이용한 공력 소음 측정 시 일반적으로 마이크로폰을 시험부 벽면에 일치하게 설치하는 방법(Flush-mounted)을 사용한다. 이 경우, Fig. 1와 같이 마이크로폰은 풍동 벽면의 경계층(Boundary layer)에서 발생된 난류(Turbulence)에 의한 매우 높

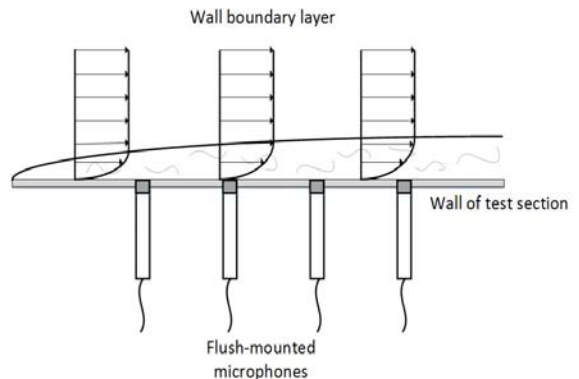


Fig. 1 Self-noise induced by the turbulence in the boundary layer of the wind tunnel

† 교신저자; 정회원, 한국항공우주연구원 공력성능팀
E-mail : eunsueh@kari.re.kr
Tel : 042-870-356

* 한국과학기술연합대학원대학교
** 한국항공우주연구원 공력성능팀

은 유체 소음 신호를 같이 측정하게 되는데 이를 자체 소음(Self noise)라 한다. 자체 소음으로 인한 신호 왜곡에 대한 문제점을 개선하기 위하여 빔형성 방법(Beamforming method)에서는 마이크로폰으로부터 수신한 신호를 교차상호상관행렬(Cross spectrum matrix)로 정리하고, 교차상호상관행렬의 대각항(Diagonal elements)을 제거(Diagonal term removal)함으로써 자체 소음에 의한 영향을 최소화한다. (1),(2)

대각항 제거와 같이 시험결과 후처리를 통하여 자체 소음에 의한 영향을 최소화하는 방법도 있지만, Fig. 2과 같이 폐쇄형 풍동 벽면에 케블라 덮개(Kevlar sheet, 이하 케블라)를 설치하고 케블라 뒤편에 마이크로폰 어레이를 설치하여 자체 소음에 의한 영향을 최소화 하는 방법이 NASA Ames에 의하여 연구되었다.(3) 케블라는 섬유 조직으로 형성되어 음향투과가 가능하며, 강한 장력과 내구성을 가지고 있어 음향 기기 및 공력 소음 시험에 사용되어진다.

본 논문에서는 항공우주연구원의 폐쇄형 시험부에서 공력 소음을 측정하기 위하여 케블라가 장착된 마이크로폰 어레이를 설계·장착하였다. 마이크로폰 어레이의 주파수 특성을 확인하기 위하여 백색 소음(White noise)와 다양한 주파수에 대한 실험을 수행하였다.

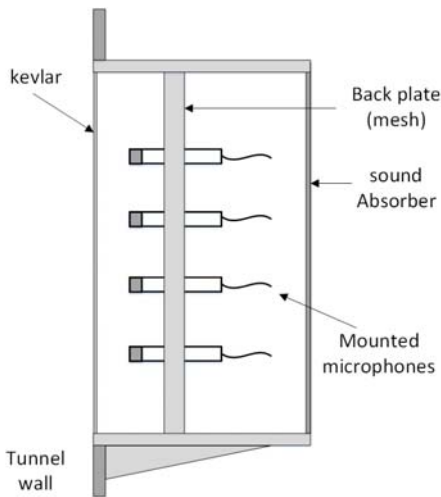


Fig. 2 Recessed microphone array in wind tunnel wall with stretched Kevlar cover

2. 본론

2.1 케블라가 장착된 마이크로폰 어레이

한국항공우주연구원의 폐쇄형 시험부의 왼쪽 벽면의 크기는 세로 3 m × 길이가 10 m 이며, 세로 0.5 m × 길이 1 m 인 내부 관측용 창이 9개가 있다. 창을 대체하여 마이크로폰 어레이를 설치 할 수 있도록 Fig.3과 같이 제작하였으며, 제작된 어레이의 크기는 0.52 × 0.56 × 1.21 m 이다.

마이크로폰 어레이는 마이크로폰의 유체에 의한 영향을 최소화하기 위하여 케블라를 장착하였으며, 마이크로폰을 설치 할 수 있도록 격자판이 설치되어 있다. 소음원이 격자판 후면에 있는 구조물에 의하여 반사되어 마이크로폰에 수집되지 않도록 격자판 후면에는 흡음재를 부착하였다. 또한, 어레이에 장착된 케블라에 균일한 장력을 가할 수 있도록 구조물에는 총 6개의 케블라 지지 블록을 설치하였다. 동일한 형상으로 총 9개의 마이크로폰 어레이를 제작하여 Fig. 4와 같이 벽면에 설치하였다.

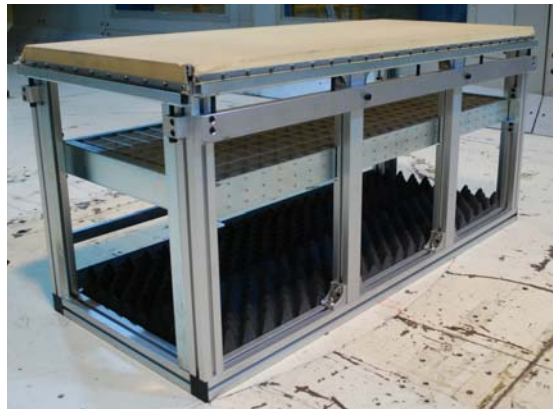


Fig. 3 Wall mounted Microphone array using a tensioned Kevlar

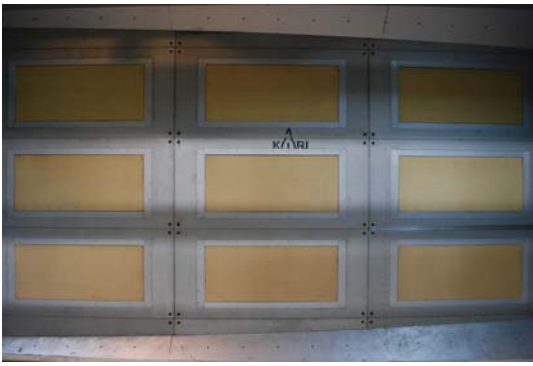


Fig. 4 The wall of closed test section wind tunnel

2.2 소음 시험 수행

(1) 시험 장치의 구성

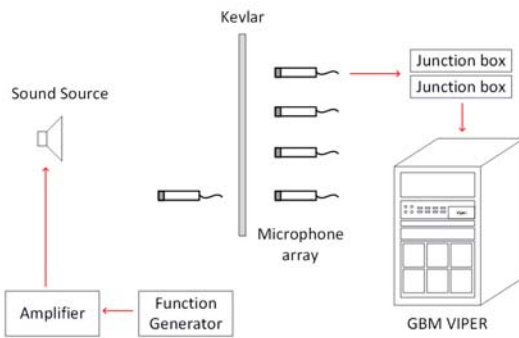


Fig. 5 Layout of test setup



Fig. 6 Test setup

폐쇄형 시험부에서 다양한 주파수의 소음원에 대한 케블라 덮개의 특성을 확인하기 위하여 Fig. 5 와 Fig. 6과 같이 실험 장치를 구성하였다.

음원 발생은 함수발생기(Function generator)와 증폭기(B&K power amplifier 2716)를 연결한 스피커(B&K omni-source 4295)를 사용하였다. 스피커는 풍동 시험부 벽면으로부터 1.9 m 떨어진 위치에 설치하였으며, 케블라의 중심과 일치하도록 하였다. 신호 수집에는 총 33개의 마이크로폰을 사용하였으며, 이 중 1개의 마이크로폰(Reference microphone)은 스피커 자체 신호를 확인하기 위하여 시험부 내에 설치되었다. 나머지 32개의 마이크로폰의 배치는 어레이 격자판 위치에 대한 신호를 비교하기 위하여 Fig.7 과 같이 배치하였다. 실험에는 1/2" 마이크로폰(LinearX M51)을 사용하였으며, 각 마이크로폰의 출력 신호는 어레이 후면에 설치된 Junction box 에 연결되어 동시 샘플링이 가능한 자료 취득 장치(GBM VIPER)로 측정하였다. 또한, AC 1.5 Hz high pass filter 를 적용하여 DC 성분을 제거 하였다.

실험은 케블라의 유무와 장력(Tension)에 따른 주파수 별 수신 신호를 비교하기 위하여 Table 1과 같이 케블라가 없는 경우와 3종류의 케블라 장력에 대해 수행되었다.

케블라는 구조물에 설치된 6개의 블록으로부터 고정되며, 케블라에 전방향으로 균일한 장력을 부가하기 위하여 6개의 블록에 동일한 힘이 부가되어야 한다. 동일한 힘을 부가하기 위하여 토크렌치(Torque wrench)를 사용하였다. Table 1에서 Low tension은 특정 장력 없이 케블라가 구조물에 고정된 상태이며, Mid tension 은 토크렌치를 이용하여 6개의 블록에 40 kgfcm 의 토크를 부가한 것이고, High tension 은 60 kgfcm 의 토크를 부가하여 고정 하였다.

케블라 덮개가 장착된 마이크로폰 어레이의 주파수 특성을 확인하기 위하여 스피커를 사용하여 주파수가 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 1.5 kHz, 2 kHz, 2.5 kHz, 3 kHz, 3.5 kHz, 4.0 kHz, 8.0 kHz인 사인파(Sine wave)와 백색 소음을 발생시켰다. 데이터 획득은 40 kHz로 1.6 초 동안 65536개의 데이터를 취득하였다.

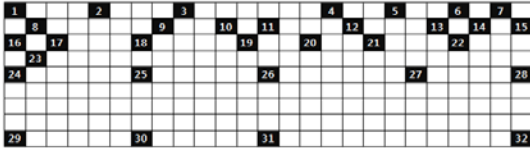


Fig. 7 Position of 32ch. microphones

Table 1 Test case as a tension of Kevlar sheet

Tension of Kevlar	1) w/o Kevlar sheet
	2) Low tension
	3) Mid tension
	3) High tension
Frequency [Hz]	250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 8000 White noise

2.3 시험 결과

시험에 사용된 마이크로폰, 케이블 및 측정 시스템은 교정기(B&K acoustic calibrator 4226)를 사용하여 1 kHz, 94 dB 에 대해 감도 보정을 수행하였다.

실험 결과의 수렴성을 파악하기 위해 측정 결과의 앙상블 평균(Ensemble averaging) 개수에 대한 결과 비교를 하였다. 4096 개(0.1초)의 결과에 대해 FFT 연산을 수행하고, 앙상블 평균을 1회, 5회, 10 회와 15회 수행한 결과를 Fig. 8와 Fig. 9 과 같이 1/3 옥타브 밴드(1/3 octave band)로 나타냈다. Fig. 8 은 케블라가 없는 상태에서 1 kHz의 사인파를 발생 시켰을 때, 어레이의 중앙에 위치한 26번 마이크로폰(Mic. #26 in Fig.7) 에서 측정된 신호의 앙상블 평균에 대해 비교한 결과이다. Fig. 9 는 Fig. 8 과 동일한 조건에서 백색 소음을 발생 시켰을 때의 측정된 결과이다.

Fig. 8와 Fig. 9 에서 앙상블 평균 개수가 증가함에 따라 모든 주파수에 따른 수렴성은 앙상블 평균 개수가 10개 이상인 경우 동일하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 실험 결과 분석은 앙상블 평균 15회로 수행하였다.

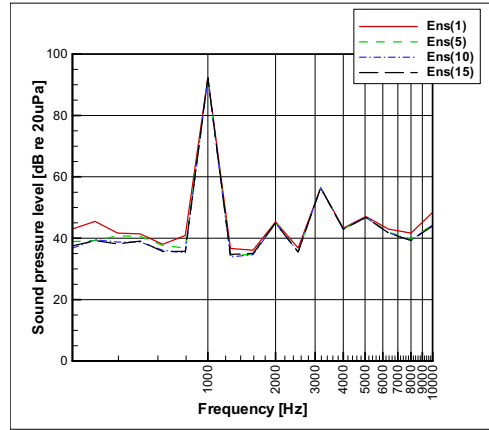


Fig. 8 Sound pressure level of being measured signal by 26th microphone as no. of ensemble averaging for 1kHz sine wave.

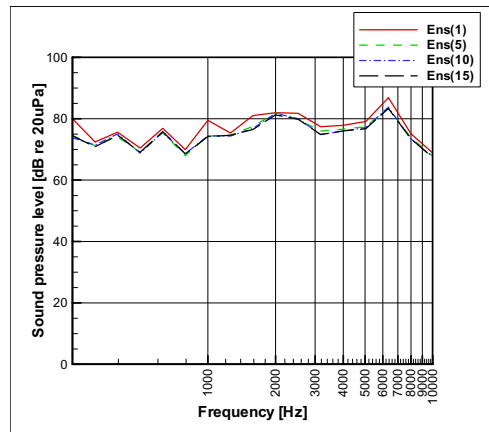


Fig. 9 Sound pressure level of being measured signal by 26th microphone as no. of ensemble averaging for white noise.

케블라에 의한 음향 신호의 전달 강도 감쇠 영향을 파악하기 위해, 스피커 주변에 설치한 기준 마이크로폰(Reference microphone)에서 측정된 신호와 마이크로폰 어레이 중심점(Mic. #26 in Fig.7)에서 측정된 신호를 비교하였다.

Fig. 10 은 사인파를 발생시켰을 때 기준 마이크로폰과 마이크로폰 어레이 중심에 위치한 마이크로폰(mic. #26)에서 측정된 값의 음압 차이($\Delta \text{SPL}[\text{dB}] = \text{SPL}_{\text{ref.}} - \text{SPL}_{\text{center}}$)에 대한 결과이다. 케블라가 없는 경우 두 마이크로폰의 음압 차이는 4dB 이 내인 것을 확인 할 수 있고, 모든 케블라 조건에 따른 3.5 kHz 에서의 결과에서는 어레이 중심에 위

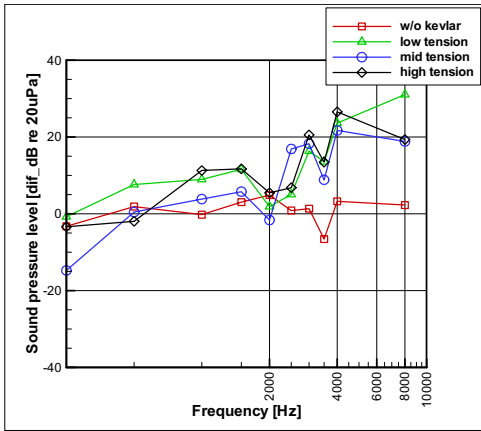


Fig. 10 Difference in sound pressure level(Δ SPL) of reference microphone and 26th microphone as kevlar tension for sine wave

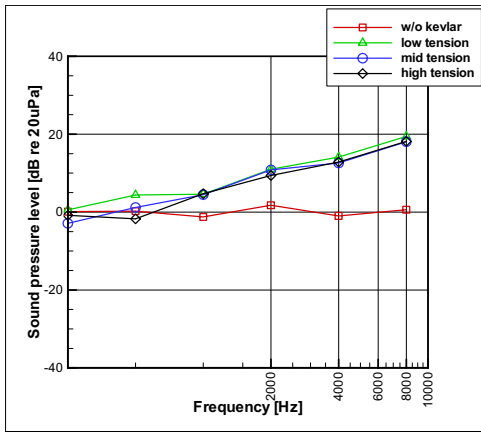


Fig. 11 Difference in sound pressure level(Δ SPL) of reference microphone and 26th microphone as kevlar tension for white noise

치한 마이크로폰에서의 음압이 크게 측정된 것을 확인 할 수 있다. 이는 3.5 kHz 의 음원이 발생하였을 때 케블라의 조건에 관계없이 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 사인파의 특정 음원에 대한 특성이라고 판단되어 진다. 4 kHz 이상의 고주파수에 대한 특성에서는 케블라가 있는 경우 두 마이크로폰의 음압차이가 20 dB 이상 차이 남을 확인 할 수 있으며, 3가지 케블라 조건 중에서 Mid Tension 의 결과에서 신호의 강도 차이가 가장 작은 것으로 확인 할 수 있다.

이러한 결과는 백색 소음 실험을 1/3 옥타브 밴드로 나타낸 결과인 Fig. 11 에서도 비슷한 경향을 확

인 할 수 있다. Fig. 11 은 각 케블라 조건에 대해 백색 소음을 발생시켰을 때 기준 마이크로폰과 마이크로폰 어레이 중심에 위치한 마이크로폰(mic. #26)에서 측정된 값의 음압 차이(Δ SPL)에 대한 결과이다. 케블라가 없는 경우 두 마이크로폰에서 측정된 음압차는 2 dB 이내인 것을 확인 할 수 있다. 500Hz 이하의 저주파수에서는 Mid tension 과 High Tension의 경우 음압차가 2 dB 이내의 차이를 보이며, Low tension 의 경우 5 dB 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 2 kHz 이상의 주파수 범위에서는 10 dB 이상의 음압 차이가 나는 것을 확인 할 수 있으며, 주파수가 높아짐에 따라 그 차이가 더 커지는 경향을 확인 할 수 있다. 최종적으로, Fig. 10 과 Fig. 11의 결과를 통하여 전 주파수 범위에서 Mid Tension 의 결과가 상대적으로 우수한 것으로 판단되어 본 연구에서는 케블라의 장력을 Mid tension 으로 선정하였다.

마이크로폰 어레이의 각 채널(32 ch.)에서 측정된 신호의 공간 분포 특성을 확인하기 위하여 백색 소음을 발생시켰을 때 케블라 조건에 대한 결과를 Fig 12~ Fig. 17와 같이 정리하였다. 결과는 1/3 옥타브 밴드로 나타내었으며, 어레이의 정중앙에 위치한 26 번째 마이크로폰(26th microphone)을 기준으로 각 채널에서의 음압 차이(Δ SPL[dB]=SPL_{each mic.}-SPL_{ref})를 나타내었다.

Fig. 13 의 500 Hz 일 때와 Fig. 15 의 2 kHz 일 때의 결과에서 마이크로폰 위치에 따른 음압의 차이가 최대 8dB 로 큰 편차를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 결과는 케블라가 없는 경우와 케블라가 있는 경우 모두에서 확인되어지는 결과이며, 어레이의 중심에서 먼 위치에 설치된 마이크로폰에서 측정된 결과일수록 음압의 차이가 커지는 결과와 일치한다. 이 결과를 바탕으로 향후 마이크로폰 배치 시 이 위치에 마이크로폰을 배치하는 것을 피해야 할 것으로 판단된다.

이외의 결과에서 케블라가 있을 때와 없을 때의 결과를 비교 하였을 때 두 결과의 경향이 일치하는 것을 확인 할 수 있으며, 마이크로폰의 위치에 따른 음압의 차이가 4dB 이내로 균일하게 분포하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서, 음원이 케블라를 통과함으로써 각 마이크로폰에서 측정되는 신호의 공간 분포 특성이 변하지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

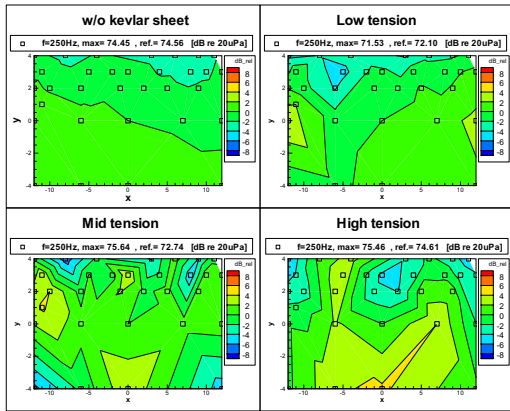


Fig. 12 Difference in sound pressure level between each channel and 26th channel at 250Hz as a Kevlar conditions. $P_{ref}=20\mu\text{Pa}$

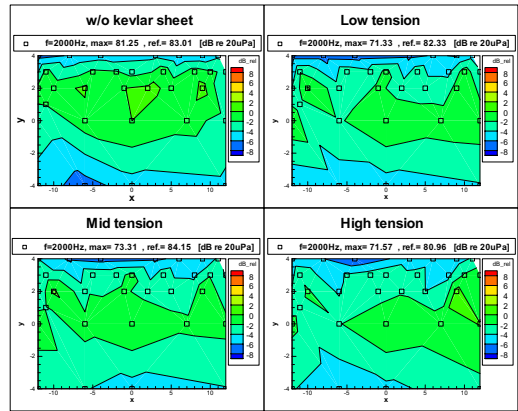


Fig. 15 Difference in sound pressure level between each channel and 26th channel at 2000Hz as a Kevlar conditions. $P_{ref}=20\mu\text{Pa}$

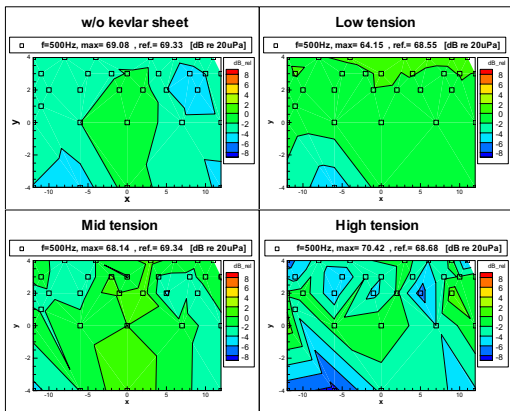


Fig. 13 Difference in sound pressure level between each channel and 26th channel at 500Hz as a Kevlar conditions. $P_{ref}=20\mu\text{Pa}$

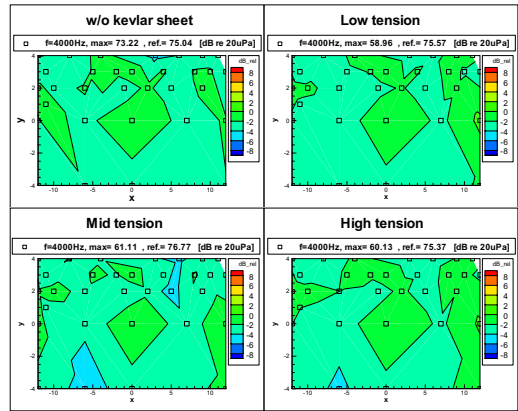


Fig. 16 Difference in sound pressure level between each channel and 26th channel at 4000Hz as a Kevlar conditions. $P_{ref}=20\mu\text{Pa}$

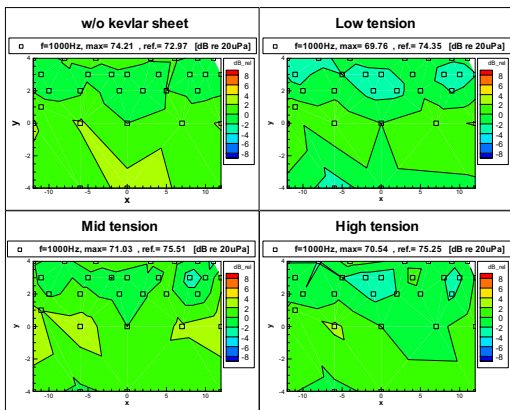


Fig. 14 Difference in sound pressure level between each channel and 26th channel at 1000Hz as a Kevlar conditions. $P_{ref}=20\mu\text{Pa}$

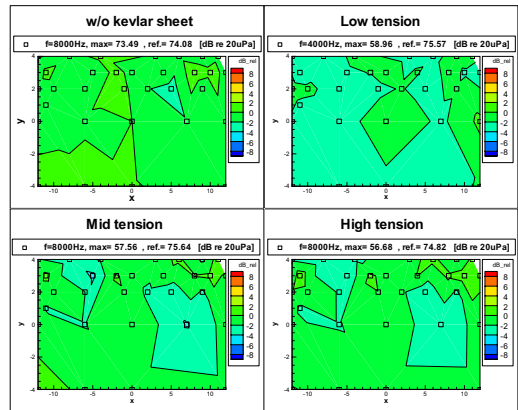


Fig. 17 Difference in sound pressure level between each channel and 26th channel at 8000Hz as a Kevlar conditions. $P_{ref}=20\mu\text{Pa}$

3. 결 론

폐쇄형 시험부에서 마이크로폰 어레이를 이용한 공력 소음 측정 시 마이크로폰에 수신되는 자체 소음을 최소화하기 위하여 음향 투과 특성이 좋은 케블라를 장착한 마이크로폰 어레이를 설계하고 풍동 시험부에 설치하였다. 케블라를 장착한 마이크로폰 어레이의 주파수에 대한 음향 신호의 전달 강도 특성을 확인하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다.

케블라에 의한 음향 신호의 전달 강도 감소 영향을 파악하고 케블라를 고정할 장력을 결정하기 위해, 스피커 주변에 설치한 기준 마이크로폰에서 측정된 신호와 마이크로폰 어레이 중심에 위치한 마이크로폰에서 측정된 신호를 비교하였다. 500 Hz 이하의 저주파수에서는 음압의 차이는 Mid tension과 High tension 의 경우 2 dB 이내이며, Low tension 의 경우 5 dB 의 차이를 확인 할 수 있었다. 주파수 범위가 2 kHz 이상으로 높아짐에 따라 그 차이가 더 커지는 경향을 확인 할 수 있었다. 실험 결과를 바탕으로 Mid tension 의 결과가 상대적으로 우수한 것으로 판단되어 본 연구에서는 케블라의 장력을 Mid tension 으로 선정하였다.

마이크로폰의 어레이의 각 채널에서 측정된 신호의 공간 분포 특성을 확인하기 위하여 백색 소음을 발생시켰을 때 기준 마이크로폰과 각 마이크로폰의 음압 차를 확인하였다. 동일 주파수에서 케블라가 있는 경우와 없는 경우의 결과를 비교했을 때, 그 경향성이 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 2 kHz 일 때, 마이크로폰 어레이의 중심으로부터 먼 거리에 위치한 상단과 하단의 마이크로폰에서 측정된 결과는 중심과의 음압차이가 최대 8dB 인 것을 확인 할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 마이크로폰 배치 시 이 위치에 마이크로폰을 설치하는 것을 피해야 할 것으로 판단된다. 이외의 모든 공간 분포 결과에서 마이크로폰 위치에 따른 음압의 차이가 4dB 이내로 균일 한 것을 확인 할 수 있고, 음원이 케블라를 통과함으로써 각 마이크로폰에서 측정되는 신호의 공간 분포 특성이 변하지 않는 것을 확인 할 수 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부 ‘미래철도기술사업’의 ‘고속철도용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 플스케일 팬터그래프 형상 개발 과제’의 자원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Thomas J. Mueller, 2002, Aeroacoustics Measurements, Springer, New York
- (2) Wook Rhee, Sung Park, Jong-soo Choi, Jaimoo Kim, 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.
- (3) Stephen M. Jaeger, W. Clifton Horne and Christopher S. Allen, 2000, Effect of surface treatment on array microphone self-noise, AIAA-2000-1937
- (4) Robert P. Dougherty, 2003, Phased Array Beamforming for Aeroacoustics, AIAA Professional Development Short Course, AIAA, Reston, VA.
- (5) P. Sijtsma and H. Holthusen, Source Location by Phased Array Measurements in Closed Wind Tunnel Test Sections," 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Bellevue, WA, AIAA Paper 99-1814, May 10-12, 1999