

### 3 가지 음장가시화 시스템의 소개와 적용 예

## Introduction and application of three sound visualization systems

<sup>0</sup>김 양 한\*, 남 경 옥\*\*

### ABSTRACT

Near-field acoustic holography is a powerful tool to visualize sound sources. This method requires pressure measurement at many points for a good hologram. Thus one has to measure carefully so that errors due to the uncertainty of position, sensor mismatch, and so on are reduced. A method to solve this problem is to use a well-designed measurement system. This paper introduces a sound visualization system at center for noise and vibration control (NOVIC), KAIST, and addresses the advantages in terms of the error reduction. The system consists of array microphones, array jigs, a system to control the position and the velocity of the jigs, a data acquisition system, and a monitoring system. This paper also shows some sound visualization results when the system is applied to a speaker and a computer. The results verifies that the sound visualization system is useful for identifying sound sources.

### I. 서 론

근접장 음향 홀로그래피<sup>(1)</sup>는 홀로그램면이라고 불리는 면에서의 음압 측정을 통해 임의 위치에서의 음압, 속도, 인텐시티 등의 예측을 가능하게 한다. 특히 소음원 주변의 음장 역시 예측 가능하므로 소음원의 위치 및 방사 특성 등을 파악하는데 유용한 방법이다. 최근에는 측정 마이크로폰과 소음원 사이의 상대 운동을 고려한 방법<sup>(2-4)</sup>이 개발되어 측정의 간편함을 도모함과 동시에 이동하는 소음원에도 적용할 수 있게 되었다.

홀로그래피 방법은 이론 자체의 명쾌함과 달리 실제 측정에서는 많은 주의가 필요하다. 주된 이유는 좋은 홀로그램 구성을 위해서는 많은 점에서

의 음압 측정이 요구되기 때문이다. 따라서 측정 위치의 불확실성과 관련된 오차, 각 마이크로폰 사이에 있을 수 있는 크기와 위상의 차이에 의한 오차<sup>(5)</sup> 등을 줄일 수 있는 측정상의 주의가 필요하다. 이러한 측정 상의 주의 사항들이 실질적인 문제에 홀로그래피 적용을 어렵게 만드는 주요인 중의 하나이다. 이러한 문제를 해결하는 방법 중의 하나는 오차 발생 요인을 극소화 할 수 있는 측정 시스템을 만드는 것일 것이다.

본 논문은 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 소음 및 진동 제어 연구센터(NOVIC)가 보유한 음장 가시화 시스템의 기본 구성과 성능을 소개하고 구체적인 오차 감소를 위한 측정 시스템의 장점을 소개한다.

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

## II. 음장가시화 시스템의 소개

### 1) 홀로그램면에서의 음압 측정 방법

홀로그램면에서의 음압 측정 방법은 Fig. 1 과 같이 동시 측정법, 단계적 측정법, 스캐닝 측정법 크게 세 가지로 나누어 생각할 수 있다. 동시 측정법은 모든 점에서의 음압을 동시에 측정하는 것으로 모든 종류의 음장에 적용 가능하나, 동시 측정 가능한 채널 수가 많아야 하므로 고가의 측정 시스템을 필요로 한다. 단계적 측정법<sup>(6)</sup>은 기준 신호와 측정 음압 사이의 전달함수를 이용하여 모든 점을 동시에 측정하지 않고 단계적으로 측정한다. 이 방법은 정상 신호에 적용 가능하다. 스캐닝 측정법<sup>(2-4)</sup>은 마이크로폰을 연속적으로 이동시켜가며 측정하는 것으로 순음 및 협대역 소음에 적용 가능하고, 측정 시간을 단축시키는 효과를 가진다. 또한 소음원과 측정 마이크로폰 사이의 상대 운동을 고려하므로 같은 개념을 적용하여 이동하는 소음원의 가시화에 적용할 수 있다.

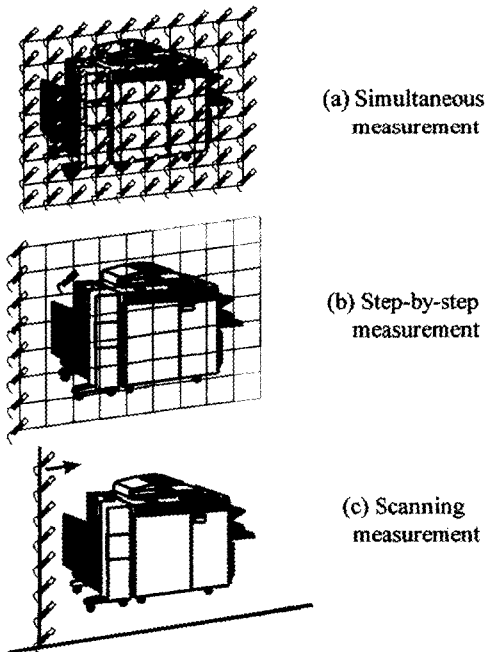


Fig. 1 Three methods to measure pressure on a hologram plane.

### 2) 마이크로폰 어레이 지그

음향 홀로그래피는 홀로그램면의 기하학적 형상에 따라 Fig. 2 와 같이 평면형(planar), 원통형(cylindrical), 구면형(spherical) 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 본 가시화 시스템은 원통형과 구면형 홀로그래피에 대해 앞서 설명한 단계적 측정법과 스캐닝 측정법이 적용 가능하도록 마이크로폰 어레이 지그(microphone array jig)를 제작하였다.

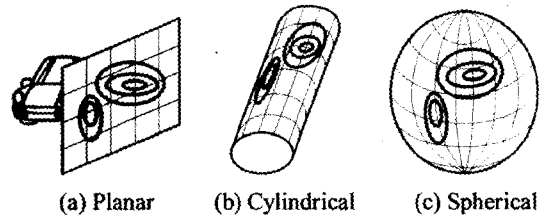


Fig. 2 Geometry of hologram plane

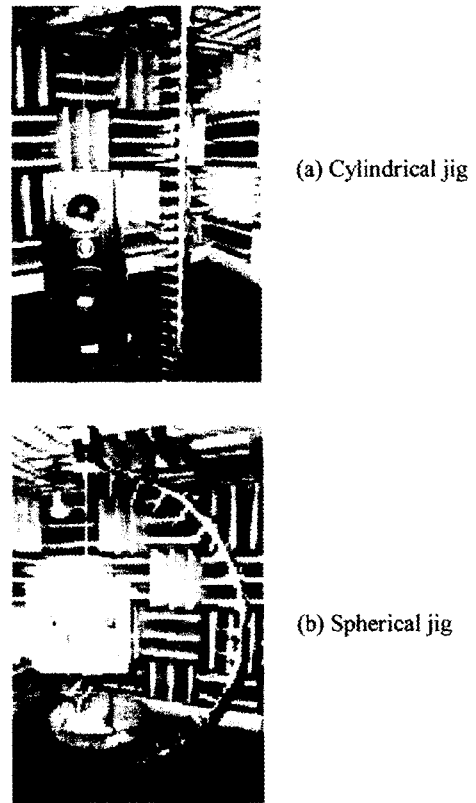


Fig. 3 Microphone array jigs

원통형 홀로그래피를 위해 Fig. 3(a)와 같이 선형 어레이를 제작하고 이를 원주 방향으로 돌릴 수 있도록 하였다. 선형 어레이의 마이크로폰 간격은 최소 5cm 간격으로, 31 개의 마이크로폰을 꽂을 수 있도록 하였다. 5cm 간격은 공간 앨리어징(spatial aliasing)을 고려하면 최대 3.4kHz 까지 측정할 수 있음을 의미한다. 이 선형 어레이는 물론 평면형 홀로그래피를 위해 사용될 수도 있다. 원주 방향으로의 회전은 단계적 측정을 위한 각도 조절과 스캐닝 방법을 위한 속도 조절을 위해 스텝 모터(step motor)와 Fig. 4 와 같은 무향실 외부의 제어기를 통해 무향실 밖에서 제어 가능하도록 하였다. 원통면의 반지름은 최대 80cm 까지 조절 가능하다.

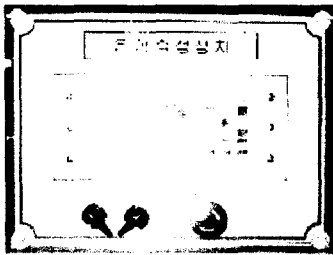


Fig. 4 Microphone array controller

구면형 홀로그래피를 위해서는 Fig. 3(b)와 같이 반원형 어레이 지그를 제작하고 마찬가지로 원주 방향으로 회전할 수 있도록 하였다. 반원형 어레이 지그는 10° 간격으로 17 개의 마이크로폰을 꽂을 수 있도록 하였다. 반원의 반지름은 51cm 이다.

이러한 어레이 지그와 이송장치를 이용하면, 정확한 위치에서의 음압 측정이 이루어지므로 측정 위치의 부정확성에 의한 오차를 감소시킬 수 있다. 또한 무향실 밖에서 원격 조절이 이루어지므로, 무향실 내에 측정자가 들어가서 생길 수 있는 음장의 왜곡을 제거할 수 있다.

### 3) 어레이 마이크로폰

본 가시화 시스템에서 사용하는 어레이 측정용 마이크로폰은 B&K4935 와 PCB130A 두 종류이다.

B&K 4935(Fig. 5(a))는 1/4 인치 마이크로폰으로

ICP 형태의 센서이다. 3kHz 까지 센서간 위상차의 표준편차가 3° 이내이며, 동역학적 적용 범위(dynamic range)는 110dB 이다.

PCB130A(Fig. 5(b))는 1/2 인치 마이크로폰이고, 10kHz 까지 센서간의 크기 차이가 1dB 이하이다. 동역학적 적용 범위는 90dB 이다.

같은 종류의 마이크로폰을 사용하더라도 마이크로폰 사이에는 크기와 위상 차가 존재할 수 있고, 이것은 홀로그래피 수행 시 큰 오차를 유발시킬 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 마이크로폰의 보정이 필요하다. 본 시스템에서는 평면파가 전파되는 덕트를 이용하여 마이크로폰의 보정을 하고 있다.

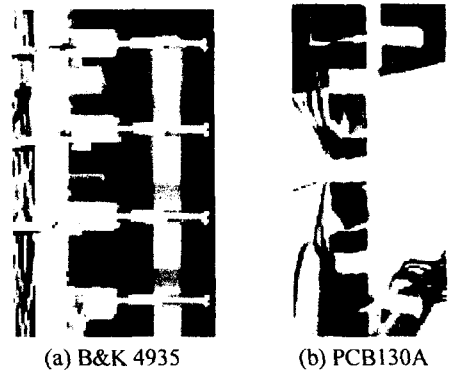


Fig. 5 Array microphones

### 4) 무향실과 측정 모니터링 시스템

측정 시스템이 꾸며진 무향실은 길이와 폭이 각각 360cm 이고, 높이는 220cm 이다. 임계주파수(cutoff frequency)는 125Hz 이고, 배경 소음은 15.3 dB(A)이다. 무향실 내에는 CCD 카메라를 두고, 무향실 밖에 카메라를 제어할 수 있는 제어기와 모니터를 두어 무향실 밖에서 무향실 내의 측정 상황을 관찰할 수 있도록 하였다(Fig. 6). 이를 통해 측정 시스템이 제대로 작동하고 있는 지를 무향실에 직접 들어가지 않고도 확인할 수 있다.

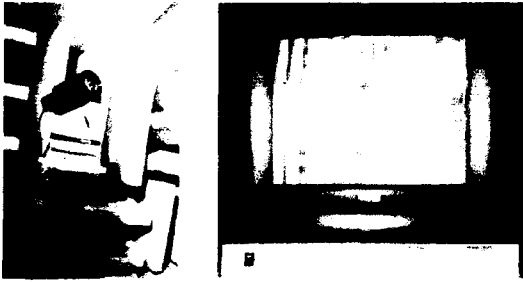


Fig. 6 CCD camera and monitoring system

### 5) 데이터 수집 시스템

마이크로폰으로부터 측정된 음압 신호를 취득하기 위한 장비로는 HP3566 신호 분석기와 컴퓨터, PCB 514A의 신호조정기(signal conditioner)를 사용한다(Fig. 7).

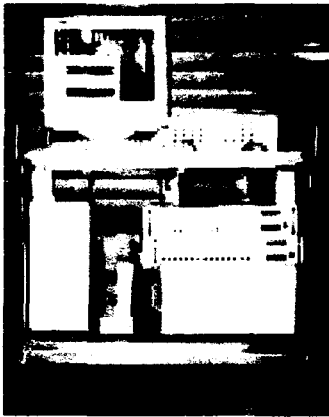


Fig. 7 Data acquisition system

HP3566 신호분석기로 마이크로폰으로부터 신호를 취득할 뿐만 아니라 FFT 분석을 할 수 있다. 이 신호분석기는 32 채널을 동시에 측정할 수 있으며, 샘플링 주파수는 최대 32kHz 까지 가능하다. B&K 4935의 사용시 마이크로폰에 전원을 공급하는 역할도 한다.

컴퓨터는 신호 분석기를 제어하고, 홀로그래피와 관련된 신호 처리를 한다.

PCB 514A 신호 조정기는 PCB130A 마이크로폰을 사용할 때 사용하며, 마이크로폰을 구동시키고

신호의 크기를 조절한다. 신호 조정기의 출력 신호는 다시 신호분석기에 연결되어 데이터를 취득한다.

## III. 음장가시화 시스템의 적용 예

### 1) 스피커에 대한 원통형 홀로그래피

스피커에 대한 원통형 홀로그래피 실험의 장치도는 Fig. 3(a)와 같다. 마이크로폰의 간격은 5cm 이고, 31 개의 마이크로폰을 사용하였다. 홀로그램면의 반경은 37cm 이다. 스피커 옆에 위치 시킨 기준 마이크로폰을 이용하여, 10° 간격으로 원주 방향으로 단계적으로 측정하였다.

Fig. 8 은 247Hz 와 1486Hz 성분에 대해 홀로그램면에서 측정한 음압의 분포를 보여주고 있다. Fig. 9 는 홀로그램면에서 측정한 음압을 이용하여 스피커에 더 가까운 위치인 반경 20cm 위치에서의 음압을 예측한 결과이다. 이로부터 247H 성분은 스피커의 하부 유닛(unit)에서 발생하고, 1486Hz 성분은 스피커의 상부 유닛에서 발생하고 있음을 홀로그램면의 측정 결과보다 더 명확히 볼 수 있다.

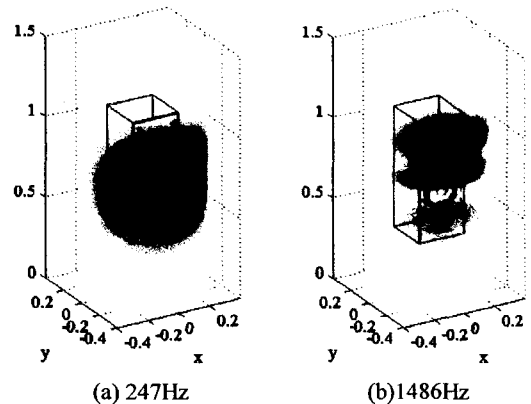


Fig. 8 Pressure distribution on hologram plane ( $r=37\text{cm}$ ) when cylindrical holography is applied to a speaker.

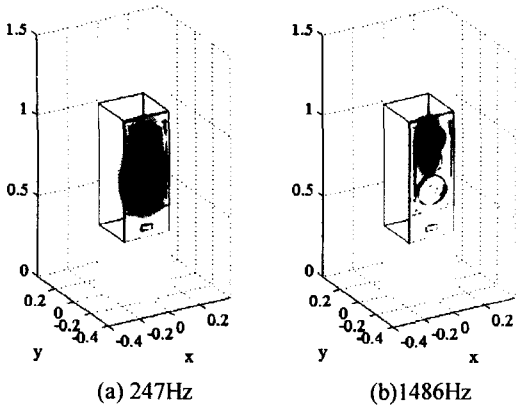


Fig. 9 Pressure distribution on source plane ( $r=20\text{cm}$ ) when cylindrical holography is applied to a speaker.

### 2) 컴퓨터에 대한 원통형 홀로그래피

컴퓨터에 대한 원통형 홀로그래피의 실험 장치는 Fig. 10 과 같다. 마이크로폰은 5cm 간격으로 31 개를 사용하였으며, 홀로그램면의 반경은 32cm 였다. 기준 마이크로폰은 컴퓨터 내부에 위치시켰으며,  $10^\circ$  간격으로 단계적으로 측정하였다.

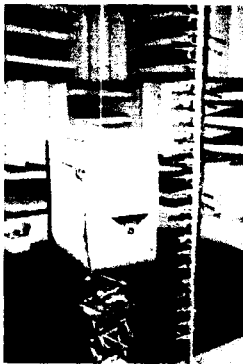


Fig. 10 Experimental setup of cylindrical holography applied to a computer

Fig. 11 은 두 개의 피크 주파수 성분인 297Hz 와 476Hz 에 대해 홀로그램면에서 측정된 음압 분포를 보여주고 있다. Fig. 12 는 컴퓨터에 더 가까운 반경 19.5cm 의 음압을 예측한 결과를 보여준다. 297Hz 성분은 그 음압이 집중된 위치로 보아 전원 공급 장치의 팬에 의해 발생하는 것으로 보인다.

다. 476Hz 성분은 홀로그램면에서는 명확히 보이지 않던 컴퓨터의 터진 측면에서도 큰 음압이 존재하고 있는 것으로 보아 CPU 의 팬 소음도 중요한 성분으로 생각된다.

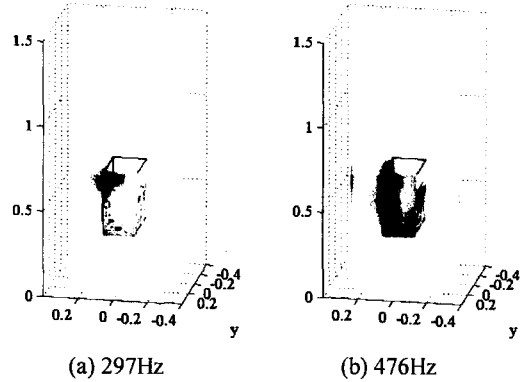


Fig. 11 Pressure distribution on hologram plane ( $r=32\text{cm}$ ) when cylindrical holography is applied to a computer.

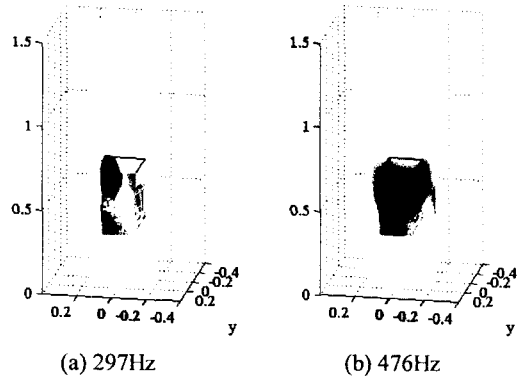


Fig. 12 Pressure distribution on source plane ( $r=19.5\text{cm}$ ) when cylindrical holography is applied to a computer.

### 3) 컴퓨터에 대한 구면형 홀로그래피

같은 컴퓨터에 대해 구면형 홀로그래피도 수행하였다. 실험 장치는 Fig. 3(b)와 같다. 마이크로폰의 반원 지그에서의 간격은  $10^\circ$  였으며, 원주 방향으로  $10^\circ$  간격으로 단계적으로 측정하였다. 홀

로그래밍의 반경은 51cm 였다.

Fig. 13 은 홀로그래밍에서 측정된 음압을 이용하여 컴퓨터에 더 가까운 27cm 위치의 음압을 예측한 결과를 보여준다. 앞서 원통형 홀로그래피와 유사한 결과를 볼 수 있다.

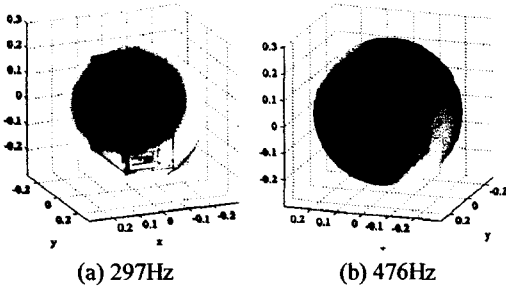


Fig. 13 Pressure distribution on source plane ( $r=27\text{cm}$ ) when spherical holography is applied to a computer.

#### IV. 결론

측정 시스템은 크게 어레이 마이크로폰, 어레이 지그, 지그 이송장치, 데이터 수집 시스템, 모니터링 시스템으로 구성되었다. 어레이 마이크로폰은 덕트 형태의 보정기를 이용하여 마이크로폰 사이의 특성 차이를 보정할 수 있도록 되어 있다. 어레이 지그는 원통형과 구면형 음향 홀로그래피에 적합하도록 설계되어 있다. 단계적 측정과 스캐닝 측정을 할 수 있도록 스텝 모터와 제어기로 구성된 지그 이송장치가 설치되어 있으며 측정 상황을 무향실 밖에서 관찰할 수 있도록 CCD 카메라를 이용하고 있다 이러한 장치를 이용할 경우 측정 횟수의 경감, 감시 시스템의 이용으로 인한 측정자에 의한 영향의 감소, 측정 위치에서의 부정확성과 마이크로폰 사이의 특성 차에 의한 오차의 감소 등을 기대할 수 있다.

개발된 음장 가시화 시스템의 응용 가능성을 검증하기 위하여 예로서 컴퓨터와 스피커로부터 방사 되는 음장을 가시화 하였다. 예상한 바와 같이

가시화 시스템을 이용할 경우 방사 소음의 공간상의 특성을 잘 관찰할 수 있어 소음원 파악 및 제어에 유용한 도구라는 것이 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 교육인적자원부의 두뇌한국 21 사업의 지원으로 수행되었으며, 지원에 깊이 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- (1) E. G. Williams and J. D. Maynard, "Holographic imaging without the wavelength resolution limit," *Phys. Rev. Lett.*, 45(7), 554-557 (1980).
- (2) H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, "Moving frame technique for planar acoustic holography," *J. Acoust. Soc. Am.*, 103(4), 1734-1741 (1998).
- (3) S.-H. Park and Y.-H. Kim, "An improved moving frame acoustic holography for coherent band-limited noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(6), 3179-3189 (1998).
- (4) S.-H. Park and Y.-H. Kim, "Effects of the speed of moving noise sources on the sound visualization by means of moving frame acoustic holography," *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(6), 2719-2728 (2000).
- (5) K.-U. Nam and Y.-H. Kim, "Errors due to sensor and position mismatch in planar acoustic holography," *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(4), 1655-1665 (1999).
- (6) J. Hald, "STSF-a unique technique for scan-based near-field acoustic holography without restrictions on coherence," *B&K Technical Review No.1* (1989).