

근접 음향 홀로그래피 방법의 적용을 위한 홀로그램 측정 방법의 비교

°박 순 홍*, 김 양 한**

Comparisons between Hologram Measurement Methods for Applying Nearfield Acoustic Holography(NAH)

° Soon-Hong Park and Yang-Hann Kim

1. 서론

소음원의 발생 위치 및 그 위상과 크기를 파악하는 것은 효과적인 소음 제어를 위하여 매우 중요하여 이를 정확히 파악하려는 노력이 꾸준히 이루어져 왔다. 이러한 방법으로 1980년대 중반에 J. D. Maynard 등에 의해 근접 음향 홀로그래피(Nearfield acoustic holography, NAH) 방법[1]이 소개되었는데, 이는 홀로그램이라 불리는 평면에서 임의의 음원에 의해 형성되는 음장의 음압을 측정하고 이 측정치로부터 예측하고자 하는 임의의 평면에서의 음압, 입자 속도 및 음향 인텐시티를 얻을 수 있는 방법이다. 이 방법은 음원의 구체적인 시,공간상의 특성을 알 수 있어 소음원의 발생 위치 및 그 특성을 파악하는데 매우 유용한 방법이라 할 수 있다.

그러나, J. D. Maynard 등[1]이 초기에 제안한 홀로그램 측정 방법은 256개의 마이크로폰을 평면상에 16x16으로 배열한 것으로 고가의 측정 장비가 요구되는 것이었는데, 이 약점을 개선하기 위하여 몇 가지 측정 방법[2,3,4]이 제안되었다. 그러나, 이러한 방법들은 모두 음장의 정상상태(stationary), 즉 매 측정시 음장의 특성이 변하지 않는다는 가정에 그 기본을 두고 있어서 이동하는 음원에 의해 발생하는 음장의 가시화에는 적

용할 수 없다는 단점을 가진다. 이러한 점을 개선하기 위해 이동 프레임 방법(moving frame technique)[5,6,7]이 제안되었다. 본 논문에서는 이미 연구된 여러 홀로그램 측정 방법을 비교하여 그 장단점에 대해 고찰하였다. 이동 프레임 방법의 실제 응용, 실질적인 적용에서의 탁월성을 상대적으로 확인하기 위해서 기존의 이동 음원 가시화 방법들[8,9]과의 비교 또한 시도하였으며 결과를 이 논문에 정리하였다.

2. 근접 음향 홀로그래피 방법(Nearfield Acoustic Holography, NAH)

이 방법은 다음 키르히호프-헬름홀츠 적분식의 이산화 형태의 표현으로 볼 수 있다.

$$P(\vec{x}) = -\frac{1}{4\pi} \int_S (G(\vec{x}|\vec{x}_s) \nabla P(\vec{x}_s) - P(\vec{x}_s) \nabla G(\vec{x}|\vec{x}_s)) \cdot \vec{n}_s dS \quad (1)$$

여기서 P 는 음압, \vec{x} 는 예측점의 위치벡터 \vec{x}_s 는 경계면의 위치벡터를 나타내며 \vec{n}_s 는 경계면에서의 법선벡터를 나타낸다. (Fig. 1) 그리고, $G(\vec{x}|\vec{x}_s)$ 는 그린 함수로 다음의 비동차 헬름홀츠 방정식

$$(\nabla^2 + k^2)G(\vec{x}|\vec{x}_s) = -4\pi\delta(\vec{x} - \vec{x}_s) \quad (2)$$

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

를 만족하는 임의의 해다.

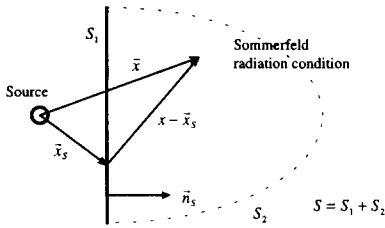


Fig. 1 Concerning region and boundary surfaces for prediction of sound pressure by Kirchhoff-Helmholtz integral equation

이 키르히호프-헬름홀츠 적분식은 좀머펠트 방사 조건(Sommerfeld radiation condition)과 음원면 S_1 의 경계 조건, Dirichlet 경계 조건을 만족하는 그런 함수가 알려지면 음압 예측이 가능함을 보여 주고 있다. 이때 홀로그램이라 불리는 측정 평면에서의 음장 측정을 통하여 임의의 위치에서의 음압을 구할 수 있다. 즉, xy 평면에서 홀로그램을 측정한 후 이를 2차원 공간 푸리에 변환을 이용하여 k_x, k_y 영역에서 평면파의 합으로 표현할 수 있다. 여기서 k_x 는 x 방향의 파수, k_y 는 y 방향의 파수를 나타내며 z 방향의 파수를 k_z 라 할때 파수 k 와는 $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ 의 관계가 있다. 이 평면파들을 측정 평면까지 그런 함수를 이용하여 진행시킨 후 다시 2차원 공간 역푸리에 변환을 이용하면 다음과 같이 임의의 위치에서의 음압을 얻을 수 있다.

$$P(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} \hat{P}(k_x, k_y, z_H) \frac{\hat{G}'(k_x, k_y, z - z_s)}{\hat{G}'(k_x, k_y, z_H - z_s)} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (3)$$

$$\hat{G}'(k_x, k_y, z) = \begin{cases} e^{i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z} & k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \text{ (진행파)} \\ e^{-i\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2} z} & k_x^2 + k_y^2 > k^2 \text{ (감쇠파)} \end{cases}$$

여기서,

$$\hat{P}(k_x, k_y, z_H) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y, z_H) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy$$

$P(x, y, z_H)$: 홀로그램 평면에서의 음압 측정치

위의 설명으로부터 알 수 있듯이 실제 적용하기 위해서는 무한 평면상의 음장 분포를 알아야 하나, 이는 현실적으로 불가능하며 이산화된 측정점들에서 유한한 크기의 홀로그램을 얻을 수 밖에 없다. 즉, 유한한 측정 구경과 이산화된 측정점들에 의해 공간상의 분해능의 제약과 주파수 한계 및 예 측 오차의 발생하며 이에 대해 참고문헌[10,11]에서 자세히 고찰하고 있다.

3. 홀로그램 측정 방법들의 비교

3.1 동시 측정 방법(simultaneous measurement method)

이 방법은 NAH가 소개되면서 그 실제 적용 방법으로 제시되었는데[1] 평면상에 배열된 평면 마이크로폰 어레이(16x16=256개의 마이크로폰)를 이용하여 특정 시간 간격 동안 홀로그램 평면상의 모든 격자점에서의 음압 $p(\vec{x}, t)$ 을 동시에 얻는 방법이다.(Fig. 2(a)) 이를 푸리에 변환을 이용하여 $P(\vec{x}, \omega)$ 로 변환한 후 홀로그램을 구성하고 NAH를 적용하여 예측하고자 하는 평면에서의 음향학적 물리량을 얻는다. 이 방법은 평면 마이크로폰 어레이를 이용하므로 빠른 측정이 가능하며 차후에 설명할 순차적 측정 방법에서 요구되는 음장의 정상상태 가정(stationarity)이 불필요하여 충격 소음 등의 과도 소음(transient noise)에 적용 가능하다. 또한 시간 영역의 신호를 측정하므로 순차적 측정 방법인 전달 함수 측정 방법(transfer function measurement method)[2]나 BAHIM[3] 방법의 제한성인 coherence의 제약을 받지 않는 장점이 있다. 그러나, 본 방법은 많은 수의 센서와 측정 장비를 요구하며 coherence의 정보를 얻을 수 없으므로 음원과 무관한 배경 잡음을 구분해 낼 수 없는 단점이 있다.

3.2 순차적 측정 방법(step by step scanning method)

많은 비용이 요구되는 동시 측정 방법을 개선하기 위하여 순차적 측정 방법이 소개되었다.(Fig. 2(b)) 순차적 측정 방법은 동시 측정 방법에 비하여 오랜 측정 시간과 측정 중의 음원의 정상상태 가정이 필수적으로 요구되는 단점이 있다. 순차적 측정 방법 중 가장 먼저 제안된 방법은 홀로그램 평면상의 측정점의 음압 신호와 기준(reference) 신호 즉, 가진 신호 혹은 이에 상응하는 신호의 전달 함수(transfer function)를 측정하는 방법으로 이 두 신호가 완전히 coherent 한 경우에 적용 가능한 방법이다.[2] 이 방법이 소개됨으로써 측정하는 동안 음원의 정상상태 가정이 유지되는 경우 순차적인 측정이 가능하게 되었으며 동시 측정 방법과는 달리 음원과 무관한 배경 잡음 성분을 알아낼 수 있다.

그 후 음향 인텐시티와 음압 측정을 통하여 홀로그램을 측정하는 BAHIM(Broadband Acoustic Holography reconstruction from acoustic Intensity Measurements) 방법[3]이 소개 되었다. 이 방법은 홀로그램 평면에서의 음압을

$$P(\bar{x}_i, \omega) = |P(\bar{x}_i)| \exp\{j\phi(\bar{x}_i)\} \exp(-j\omega t) \quad (4)$$

라 할 때 음압의 크기 성분은 음압 측정을 통하여 구하고 그 위상은 음압과 인텐시티 성분 중 홀로그램 평면상에서 직교하는 방향의 두 성분을 측정하여 다음 식으로부터 구하는 방법이다.

$$\bar{I} = -\frac{|P(\bar{x}_i)|^2}{2\rho\omega} \nabla\phi(\bar{x}_i) \quad (5)$$

이 방법은 전달 함수 측정법과 달리 기준(reference) 신호가 필요없다는 장점이 있으나 인텐시티를 측정하여야 하며 음원과 완전히 coherent 한 음장에만 적용 가능한 단점이 있다.

앞서 소개된 두 가지 순차적 측정 방법은 음장의 coherency 에 그 적용성 여부가 달려있다. 이 제한은 다수의 기준 센서와 상호 스펙트라(cross spectra)의 측정을 이용하는 STSF 방법[4]이 소개되면서 해결되었다. 이 방법은 독립적인 음원의 수만큼의 기준 센서가 필요하며, 이들 사이의 상호 스펙트라의 측정과 기준 센서들과 홀로그램 격자점들 사이의 상호 스펙트라의 측정이 요구된다. 이 중 기준 센서들 사이의 상호 스펙트라를 고유벡터 전개(eigenvector expansion) 를 이용하여 각 독립된 음원만의 홀로그램(principal hologram)의 집합을 구성한다. 이들 각각에 대하여 NAH를 적용한 후 이 결과를 더하여 예측 평면상의 음장 변수를 얻는다. 이 방법은 상호 스펙트라를 계산하는데 많은 계산량이 필요하다는 단점이 있다. 그리고, 단일 기준 센서를 사용하는 경우 전달 함수를 측정하는 방법과 동등하다. 한편 이와 유사한 개념으로 상호 스펙트라를 이용하는 대신 conditioned transfer matrix 를 이용하는 방법도 제시된 바 있다.[12]

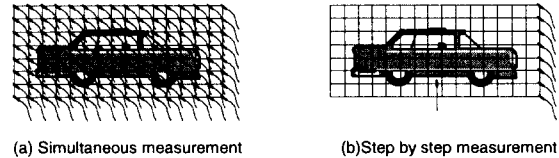


Fig. 2 Simultaneous measurement method and step by step measurement method

3.3 이동 프레임 방법(moving frame technique)

순차적 측정 방법은 측정에 많은 시간이 소요되며 이동하는 음원의 가시화에는 적용할 수 없다는 제한성을 가진다. 최근에 제안된 이동 프레임 방법[5,6,7]은 이러한 제한성을 극복하였다. 이동 프레임 방법은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 세개의 좌표계 즉, 정지해 있는 기준 좌표계(reference coordinate), 마이크로폰에 고정되어 있는 측정 좌표

계(measurement coordinate), 그리고 음원에 고정되어 있는 홀로그램 좌표계(hologram coordinate)를 도입하였다. 특히 홀로그램 좌표계는 임의의 평면상의 음향학적 물리량을 예측하는데 사용되는 홀로그램을 얻는 좌표계이다.

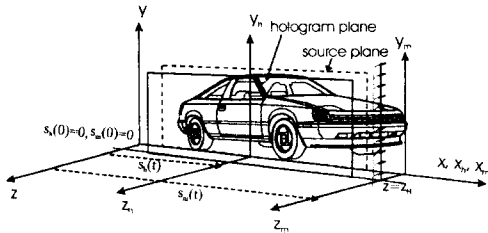


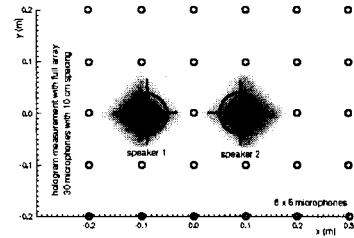
Fig. 3 Three coordinate systems

이 중 측정 좌표계와 홀로그램 좌표계는 서로 상대속도를 가지고 이동하며 측정 좌표계에서 측정된 음압은 이 두 좌표계의 좌표 변환에 의해 홀로그램 좌표계에서의 음압, 즉 홀로그램으로 변환될 수 있다. 이 좌표 변환식은 시간 정보가 공간 정보로 변환될 수 있음을 의미하며, 마이크로폰에 의해 측정되는 측정 음압이 홀로그램으로 변환될 수 있음을 의미한다. 이로부터 측정 음압의 푸리에 변환은 홀로그램 좌표계에서는 관심 주파수를 중심 주파수(center frequency)로 하는 파수 스펙트럼들의 합으로 나타나며 이를 이용하여 홀로그램을 얻을 수 있다.[5]

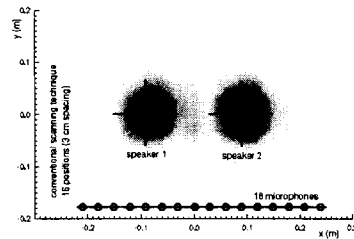
본 방법의 제한성은 측정 좌표계와 홀로그램 좌표계의 상대 운동에 의해 발생하는 도플러 효과(Doppler effect)에 의해 야기된다. 즉, 상대 속도가 증가할 수록 도플러 효과에 의해 주파수 대역이 넓어지므로 이 대역폭이 관심 주파수 사이의 간격보다는 작아야 한다. 따라서 파수 영역에서 잘 분리되어 있는 순음 성분을 방사하는 음장에 대해 제한하여 적용 될 수 있다. 그러나, 소음 제어에 있어 많은 경우 순음 성분에 관심이 있으므로 이 제한은 본 방법의 적용성에 큰 단점이

되지 않는다.

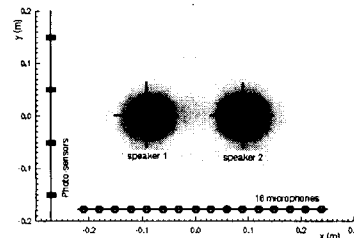
Fig. 4는 동시 측정 방법과 순차적 측정 방법, 그리고 이동 프레임 방법을 이용하여 500Hz의 순음을 발생시키는 스피커 음장을 가시화 한 결과를 나타낸다. 이 결과로부터 이동 프레임 방법의 적용성을 확인할 수 있다.



(a) Simultaneous measurement at 6x5 positions with 10cm spacing



(b) Step by step measurement at 16x16 positions with 3cm spacing, a line array of 16 microphones was used.



(c) Moving frame technique, a moving array of 16 microphones moves with 0.204m/s

Fig. 4 Comparisons between hologram measurement methods. Two speakers radiate 500Hz sound field and predicted sound pressure image are shown

기존의 이동 음원의 가시화에 적용한 홀로그

램 측정 방법(Fig. 5)은 평면 어레이를 음원에 부착하여 홀로그램을 측정하는 방법[8]과 정지한 평면 어레이와 단극 음원에 적용되는 도플러 효과의 보정을 이용하여 홀로그램을 측정하는 방법[9]이다.



Fig. 5(a) Hologram measurement by using planar array attached to a moving source

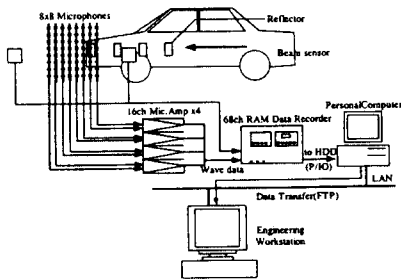
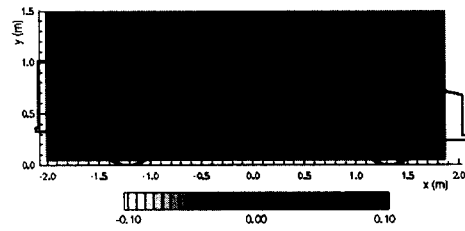


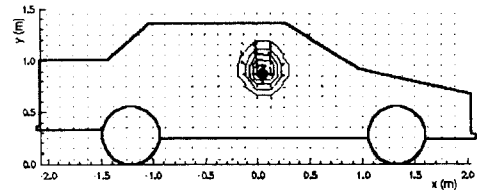
Fig. 5(b) Hologram measurement by using planar array and correction of Doppler effect[9]

전자의 방법은 측정에 복잡하고 비용이 많이 드는 단점이 있다. 그리고, 후자의 방법은 도플러 효과가 포함된 측정 음압을 단극 음원에 적용되는 도플러 효과 보정식을 이용하여 보정함으로써 분포된 단극 음원들로 이루어진 음장의 경우 홀로그램을 원칙적으로 복원할 수 없으며, 미리 음원의 위치가 알려져야 적용 가능한 단점을 가진다. 이들 방법에 비해 이동 프레임 방법은 간단한 측정 시스템인 선형 마이크로폰 어레이를 이용하여 정확한 홀로그램을 얻을 수 있다. 이에 대한 예로서 Fig. 6에 29.5km/h의 등속으로 이동하는 차량에 700Hz의 순음을 발생하는 스피커를 장착하고 실험한 경우의 예측 평면(차량 옆면)에서의 음압과 예측 인텐시티를 나타내었다. 그리고 실제 음원 가시화의 결과로서 32km/h의 등속으로 이동하는 오토바이의 소음 가시화의 결과(807Hz)를

Fig. 7에 나타내었다.

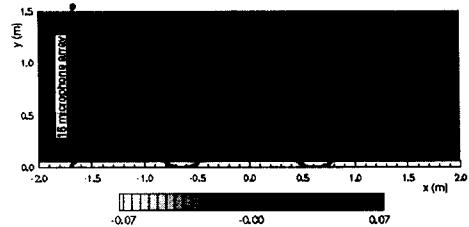


(a) predicted sound pressure map on the source plane

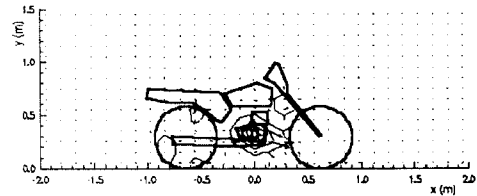


(b) predicted mean active intensity map on the source plane

Fig. 6 Predicted noise images of moving automobile experiment by using a loudspeaker at the front window. It radiates the 700Hz single frequency sound field.



(a) predicted sound pressure map on the source plane



(b) predicted mean active intensity map on the source plane

Fig. 7 Predicted noise images of moving motorcycle at 807Hz. The main noise source at this frequency is engine.

5. 결론

홀로그램 측정 방법들인 동시 측정 방법, 순차

적 측정 방법; 이동 프레임 방법을 서로 비교하고 그 장단점을 고찰하였다. 이동 프레임 방법은 순차적 측정 방법에 비해 짧은 측정 시간이 소요되며 이동 음원의 가시화에도 적용될 수 있다.

참고문헌

[1] J. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, "Near field acoustic holography : I. Theory of generalized holography and development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., 78(4), pp. 1395-1413, 1985.

[2] E. G. Williams, J. D. Maynard and E. J. Skudrzyk, "Sound source reconstructions using a microphone array," J. Acoust. Soc. Am., 68(1), pp. 340-348, 1980.

[3] T. Loyau, J.-C. Pascal and P. Gaillard, " Broadband acoustic holography reconstruction from acoustic intensity measurements. I: Principle of the method," J. Acoust. Soc. Am., 84(5), pp. 1744-1750, 1988.

[4] J. Hold, STSF-a unique technique for scan-based Near-field Acoustic Holography without restrictions on coherence, Br ü el & Kjaer Technical Review No. 1, 1989.

[5] H.- S. Kwon and Y. -H. Kim, "Moving frame technique for planar acoustic holography," J. Acoust. Soc. Am., submitted.

[6] Y. -H. Kim and H.- S. Kwon, "Sound image constructed by line array sweeping method," ASVA 97, invited lecture, Proceedings, pp. 53-60 ,1997

[7] S.-H. Park, H. -S. Kwon and Y. -H. Kim, "Visualization of noise generated by moving vehicles," Noise-Con '97, Proceedings, submitted.

[8] P. Rasmussen, S. Gade and B. Ginn, "Tyre noise measurement on a moving vehicle," Fourth international congress on sound and vibration, Proceedings, pp. 599-602, 1996

[9] H. Nakagawa, H. Tsuru, T. Tanaka and I. Sakamoto, "Detection and visualization of moving sound source through acoustic holography," ASVA 97, Proceedings, pp.591-594 ,1997

[10] 김양한, 권휴상, " 음향 홀로그래피를 이용한 방사음장의 전방예측에 관한 기본이론 및 신호처리 방법," 대한기계학회논문집, vol. 16, No. 9, pp. 1654-1668, 1992.

[11] 김시문, 권휴상, 김양한, "원통면 음향 홀로그래피를 이용한 음장예측의 오차해석 및 적용방법," 한국소음진동공학회지, 제 5 권, 제 1 호, pp. 37-48,1995.

[12] D. L. Hallman and J. S. Bolton, "Multi-reference nearfield acoustic holography in reflective environments," Inter noise 93, Proceedings, pp. 1307-1310, 1993.