

음장 가시화 방법과 응용

김 양 한

한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터

대전 유성구 구성동 373-1

E-Mail : yhkim@sorak.kaist.ac.kr

Methods of Sound Visualization and Its Application

Yang-Hann Kim

Center for Noise and Vibration Control, Department of Mechanical Engineering

373-1, Kusong-dong, Yusong-gu, Taejon 305-701, Korea

1. 개요

진실과 거짓 사이의 거리가 사람의 눈과 귀 사이의 거리라는 다분히 회화적인 표현[1]은 시각적 인식과 청각적 인식이 갖고 있는 상대적인 확실성과 불확실성에 그 초점을 맞추고 있다. 사실 소리의 특성 중의 하나인 불확실성은 많은 경우 전달된 정보의 불확실성으로 인한 판단의 오류등을 일으키는 부정적인 측면으로 작용하는 경우가 많은 것이 일반적이다. 일반적으로 경험하듯이 우리는 소리가 발생하고 있는 위치, 방향 등을 쉽게 아는 것이 쉽지 않다는 것을 경험을 통하여 알고 있다. 이러한 불확실성을 개선하기 위하여 우리가 보통 할 수 있는 방법은 좀더 소리가 남직한 곳으로 위치를 옮겨가 보는 것이 될 것이다. 즉 음장의 입장, 혹은 소리를 발생시키는 음원의 입장에서 보면 소리를 감지하는 대상 혹은 센서가 좀더 직접음장(direct field) 효과가 지배적인 음장으로 이동한다고 볼 수 있거나, 음원을 좀더 가까운 거리에서 보고 있다고 볼 수 있다. 사실 이러한 과정을 통하여 우리는 소리의 공간적 특성을 감지하고 이로부터 소리에 대한 판단 혹은 인식을 수정, 보완하여 간다.

이러한 개념을 좀더 확대하고 일반화하면 Fig. 1 [2] 같은 우화적인 그림과 같이, 제한된 정보를 통한, 측정되지 않은 정보에 대한 예측 문제로 생각하여 볼 수 있다. 즉 코끼리의 등 모양만을 통하여 코끼리라는 동물의 모든 것을 추측하는 것을 의미한다.

사실 이러한 불확실성은 인간의 감각, 인지기능을 통하여 많은 경우에 소리에 대한 다양함과 풍부함을 제공하는 순기능의 역할도 한다. 음악 감상을 한다든가 또한 영상과 함께

어떤 소리를 들을 때 영상에 대한 인지 또한 보다 풍부하게 느끼는 것이 이러한 예에 해당된다 볼 수 있다.

근래에 많은 주목을 받고 있는 소리의 3차원적인 인식은 또다른 차원에서, 단순한 불확실성의 차원이 아닌, 즉 인간의 소리에 대한 주관적 인식면에서 Fig. 1과 같은 맵핑을 시도하는 문제로 볼 수 있다. 즉 양귀로 들리는 소리가 어떠한 맵핑을 통하여 인간이 느끼는 소리의 주관적인 느낌, 한 예로는 입체감등을 갖게 하는가 하는 것을 탐구하는 것이라 볼 수 있다. 과연 소리의 공간적, 시간적 특성의 어떠한 변화가 인간의 소리에 대한 주관적인 인식에 가장 직접적인 영향을 미치는가가 관심의 대상일 것이다. 본 논문에서는 소리의 가시화 방법에 대한 현재까지의 방법들을 소개하고 3차원 음장에의 적용방법 가능성을 살펴본다.

2. 음파의 동영상화 [3]

음을 방사하는 소음원과 방사음장에 대한 정량적인 특성화는 음향학적 제반 문제들을 해결하기 위한 전제조건으로써 그 중요성이 인정되고 있다. 환경소음의 입장에서 도 소음규제를 만족하는 정도로 소음을 낮추기 위해서는 소음원 및 소음의 방사특성을 정확히 파악하는 것이 소음 차단이나 전달경로 변경등을 통한 저감대책의 선결조건이 됨을 알 수 있다. 이러한 노력들의 예로써 마이크로폰 어레이(microphone array)를 이용한 소음원 특성 파악 및 음장 가시화 방법을 들 수 있는데, 그 중 대표적인 유용한 방법으로는 음향 홀로그래프(acoustic holography)를 이용한 음장 재구성 및 해석을 들 수 있다.

음향 홀로그래프 방법은 광학 홀로그래피 이론으로부터 발전되어 1980년대 중반 이후 Maynard 등에 의해 이론적으로 정립된 후[4], 많은 응용 및 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 이러한 음향 홀로그래프 이론은 무한한 크기의 연속 홀로그램 (hologram; 측정면의 음압분포)을 사용하여야 한다. 실제로 이 방법을 적용하기 위해서는 무한한 연속 홀로그램의 사용은 불가능하다. 현실적으로는 유한한 이산 홀로그램만을 측정을 통하여 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 음장을 예측 혹은 재구성하게 된다.

이러한 측정상의 어려움 혹은 유한한 홀로그램의 사용은 필연적으로 예측음장에 오차를 유발시키게 되며 재구성된 음장의 신뢰도를 떨어뜨리게 된다. [7] 그러므로 보다 적은 개수의 마이크로폰과 적은 노력을 들여서 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 예측음장을 얻기 위한 방법론에 대한 연구가 필요함을 알 수 있고, 또한 실제로 음향 홀로그래프 이론이 소개된 이후로 이러한 연구가 계속되고 있다. [5-7]

이와 같은 측정 및 예측의 개선 방법론 중에서 적은 갯수의 마이크로폰을 이용하여 보다 많은 측정점의 홀로그램을 측정하기 위한 방법으로는 스캐닝 마이크로폰 (scanning microphone)으로써 홀로그램면의 각 측정점을 움직여 가며 홀로그램을 측정하는 스캐닝 방법 (scanning technique)이 있다. 이 방법은 Hald 등에 의하여 STSF (Spatial Transformation of Sound Fields)라는 이름으로 그 기본 개념이 소개된 후 [5], 여러 연구자들에 의해서 다양하게 발전되었다. [6] 하지만 이 방법은 임의의 측정점에서 음압의 시간신호를 측정하는 동안에는 마이크로폰을 고정시켜야 하므로 엄밀한 의미에서 스캐닝 방법이라 할 수 없으며, 또한 이와 같은 이유로 자동차나 기차 등과 같은 움직이는 음원에는 적용할 수 없다는 한계를 가지고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 이동 프레임 방법[6]에서는 음원과 마이크로폰 어레이를 상대운동을 가지는 좌표계에서 생각하고, 이 좌표계 사이의 좌표 변환을 통하여 측정 음압으로부터 홀로그램을 계산한다. [8-9]

움직이는 음원의 경우처럼 좌표계 사이의 상대운동이 존재하는 경우에서도 적용이 가능하다. 이러한 음원과 마이크로폰 어레이 사이의 상대운동은 위치변화에 따른 측정음압의 주파수 변화로써 나타나게 되며, 이러한 주파수의 해석을 통하여 홀로그램을 계산할 수 있다. 예를 들면, 임의의 한 주파수 성분을 가지고 움직이는 음원의 경우에 고정된 마이크로폰 어레이에서 측정된 음압신호에는 그 주파수 성분 뿐만 아니라 그 주파수를 중심으로 하는 대역 주파수 신호가 측정되어 진다. 이와 같은 대역신호의 존재는 음원의 고유한 주파수 특성이 아니라 음원과 마이크로폰 어레이 사이의 위치가 시간에 따라 변함에 따라 나타나는 특성임을 알 수 있고, 이는 음장의 공간상 특성을 내포하고 있다. 그러므로 이러한 대역 주파수 신호를 해석함으로써 음압의 공간상 분포 특성, 즉 홀로그램을 얻을 수 있다. 마이크로폰 어레이의 대역 주파수 신호를 해석하는 방법으로는 음원과 마이크로폰 어레이 사이의 상대운동을 알고, 이를 이용한 좌표변환을 하는 방법이 가능하다.

이와 같은 방법에 의하면 일렬로 세워진 선형 마이크로폰 어레이 신호로부터 움직이는 음원에서 방사되는 홀로그램을 계산할 수 있으며, 이로부터 음장예측 및 음장의 가시화를 이룰 수 있다. 그런데 이러한 주파수 대역의 크기는 마이크로폰 어레이와 음원 사이의 상대속도에 직접적으로 비례함을 알 수 있고, 이 상대속도를 고려하여 적용 가능한 음원의 주파수 조건을 설정하여야 한다. [8-9]

전술한 방법의 예로서 Fig. 2는 이동 프레임 음향 홀로그래프 방법을 이용하여 측정한 자동차 소음의 시·공간적 분포를, Fig. 3은 타이어로부터 방출되는 소음을 보여주고 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 성덕대왕신종의 음향방사 특성[10] 방사음장의 모양과 한국정[11]의 방사음장 모양을 홀로그래프 방법을 이용하여 가시화한 것을 보여주고 있다.

3. 3차원 음장의 적용 가능성

홀로그래프 방법을 이용한 소리의 가시화 개념을 역으로 생각하면 즉 측정 마이크로폰 위치에 스피커 혹은 적절한 음원을 놓고 소리를 내면 거꾸로 원음의 시·공간적 특성을 재생할 수 있을 것임을 상상할 수 있다. 이것은 음파방정식의 시간 및 공간에 대한 항이 각각 2번씩 미분하는 형태임에서도 확인이 된다. 즉 시간 및 공간의 음의 값이 같은 음파방정식을 만족시키고 따라서 수음점에서 기록된 음을 그대로 역으로 되돌려 주면 원음의 시·공간적 복사가 가능한 것이다.[12] 보다 단순화된 개념으로서 다수의 스피커를 이용한 음원의 시·공간상 특성 변화 또한 가능할 것임은 쉽게 이해할 수 있다.[13] 이러한 문제는 제어하고자 하는 위치의 크기와 제어에 필요한 음원의 개수 및 위치, 오차 마이크로폰의 위치 및 개수에 따라 제어 방법 및 성능이 달라지는 등 실제 구현에는 사실상 많은 어려움이 있다. 가장 단순한 경우로서 2개의 스피커를 이용하여 어느 한 점의 음장을 선택된 주파수 범위에서 제어하는 것은 가능하다. 제어하고자 하는 공간의 크기 및 위치를 정하고, 즉 가상의 구형 공간을 정한 다음, 모든 사용 주파수에서 이 구형 공간을 원하는 속도로 원하는 위치로 이동하게 할 수 있다면 보다 효율적인 3차원 음장 구현에 일로할 수 있으리라 생각한다. 이것은 HRTF(Head Related Transfer Function)가 인간의 주관적 인식을 최종 목표로 공간상의 정보를 맵핑한 것인데 반하여 일종의 가상적인 "소리공"의 운전을 이용한 3차원 음장을 구현하기 위한 시도라 볼 수 있다. Fig. 1이 시사하는 또 하나의 맵핑인 셈이다.

참고문헌

- [1] 김양한, "다수의 마이크로폰을 이용한 음장 맵핑," 제2회 대전·충청지부 음향학회 학술발표회 논문집, pp. 1-4, 1993.
- [2] 김양한, "소음원 규명 방법론; 통합된 개념 및 특성들," 한국소음진동공학회지, 제6권 제6호, pp. 692-700, 1996.
- [3] 권휴상, 김양한, "음파의 동영상화," 한국음향학회 호남·충청지회 합동 음향 Workshop, pp. 72-74, 1996.
- [4] J. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography (NAH): 1. Theory of generalized holography and the development of NAH," J. acoust. Soc. Am. 78(4), 1395-1413, 1985.
- [5] J. Hald, "Development of STSF with emphasis on the influence of bandwidth," Noise-Con. 88 Proceedings, 529-536, 1988.
- [6] 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), 1744-1750, 1988.
- [7] H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, "Minimization of bias error due to windows in planar acoustic holography using a minimum error window," J. Acoust. Soc. Am. 98(4), 2104-2111, 1995.
- [8] H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, "Moving frame technouque for planar acoustic holography," J. Acoust. Soc. Am., 1998.
- [9] S.-H. Park, Y.-H. Kim, "An improved moving frame acoustic holography for coherent band-limited noise," Submitted to J. Acoust. Soc. Am., 1998.
- [10] 김양한, 김시문, "원통형 음향 홀로그래피를 이용한 성덕대왕신종의 방사 음장 분석," 한국음향학회지, 제16권 제4호, pp. 94-100, 1997.
- [11] H.-S. Kwon, Y. H. Kim and M. Rim, "Acoustic Characteristics of the Jing; An Experimental Observation using planar Acoustic Holograph," The J. of Acoust. Soc. Kor., Vol. 16, No. 2E, pp. 3-13, 1997.
- [12] C. Draeger, D. Cassereau, and M. Fink, "Theory of the time-reversal process in solids," J. of Acoust. Soc. Am., Vol. 102, No. 3, pp. 1296-1309, 1997.
- [13] 윤두병, "음장을 표현하는 고유함수의 수보다 적은 수의 제어음원과 센서를 이용한 능동소음제어 시스템의 제어 성능에 관한 연구," 한국과학기술원 기계공학과 박사학위논문, 1998.

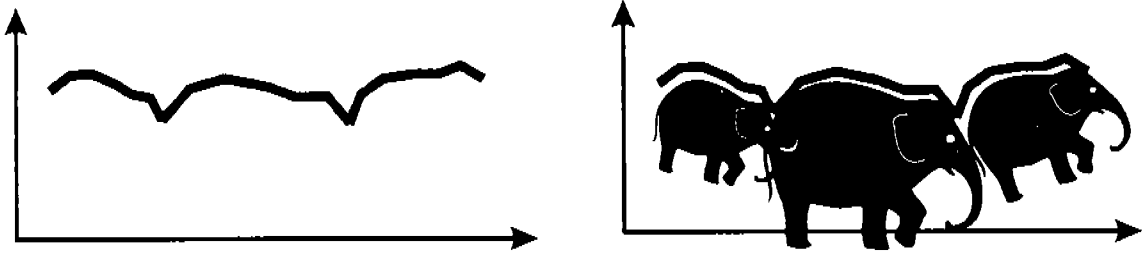


Fig. 1 제한된 정보를 통한 측정되지 않은 정보에 대한 예측 문제를 표현한 우화적 예.

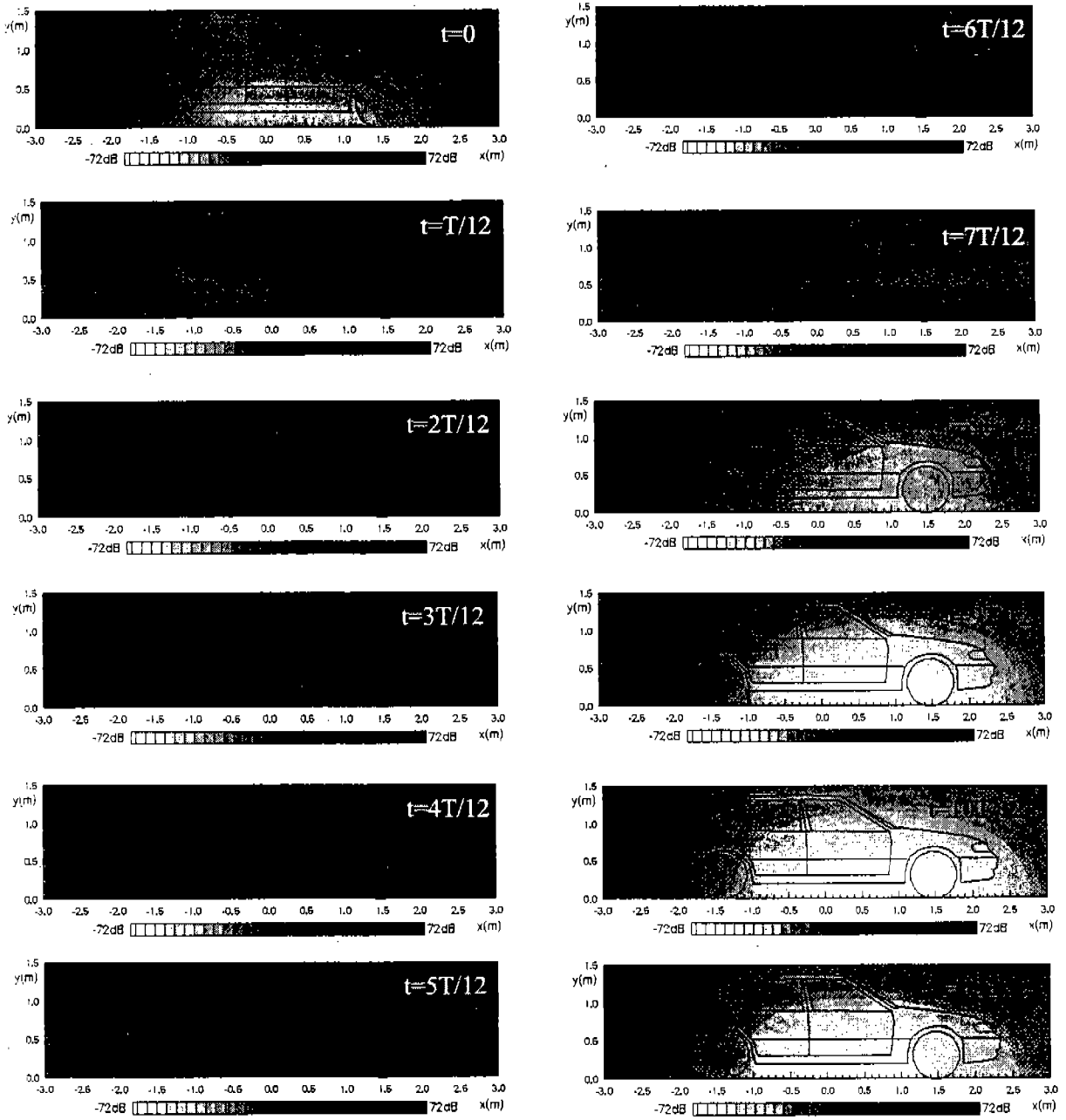


Fig. 2 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법을 이용한 자동차 엔진 소음의 시공간적 분포 (가속 주행시 차량의 평균이동속도=53.7 km/h, 주파수 120Hz, 대역폭 16 Hz)

Visualization of sound generated by model tire

Model J(Groove angle C, Belt angle 27)

$f_{no} = 479$ Hz, 30 Hz bandwidth, using front ref. mic

Under acceleration($u_{mth} = 52.38$ km/h), $z_h - z_s = 0.25$ m

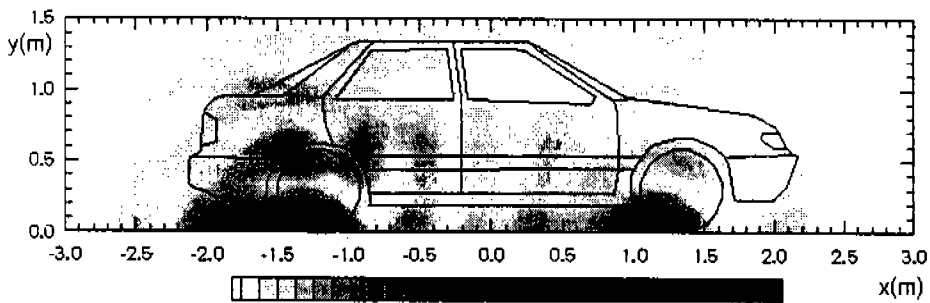
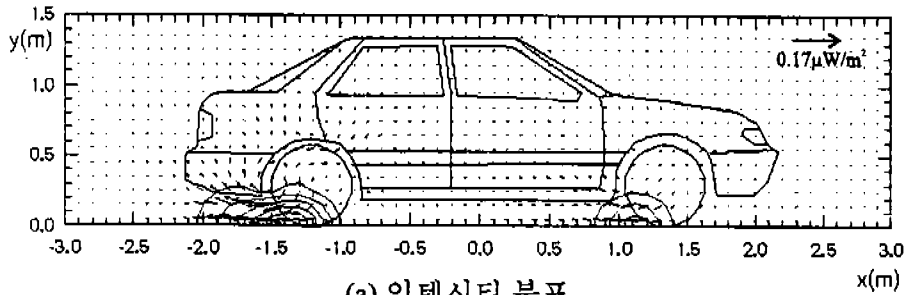
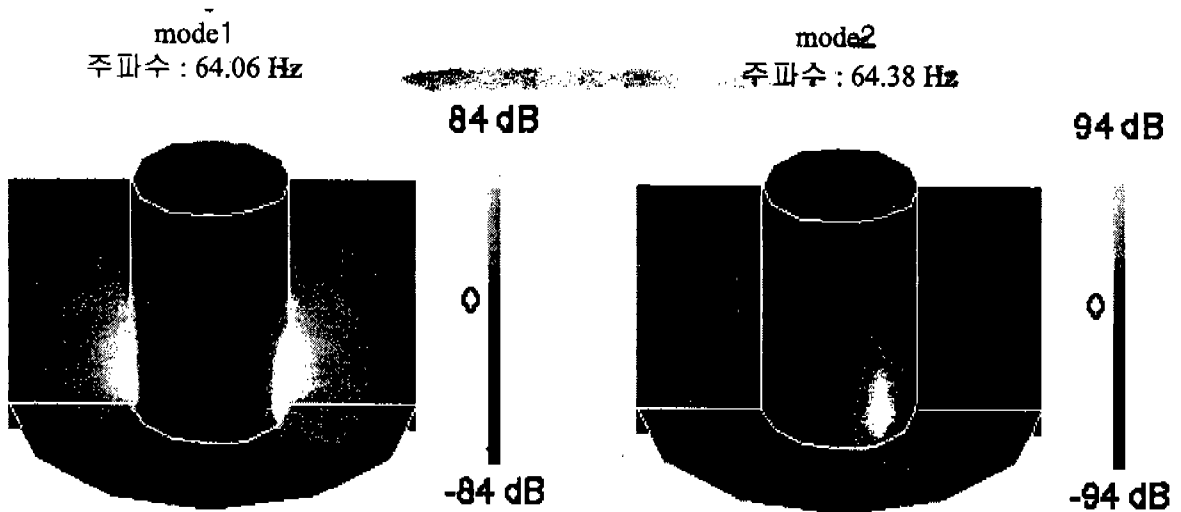


Fig. 3 타이어에서 방사되는 소음 (가속 주행시)



첫번째 모드와 두번째 모드는 원주방향으로 4개의절선(nodal line)이 형성됨을 알 수 있으며 서로 45도의 간격으로 틀어져 있다

Fig. 4 성덕 대왕 신종의 음향 방사 특성의 가시화

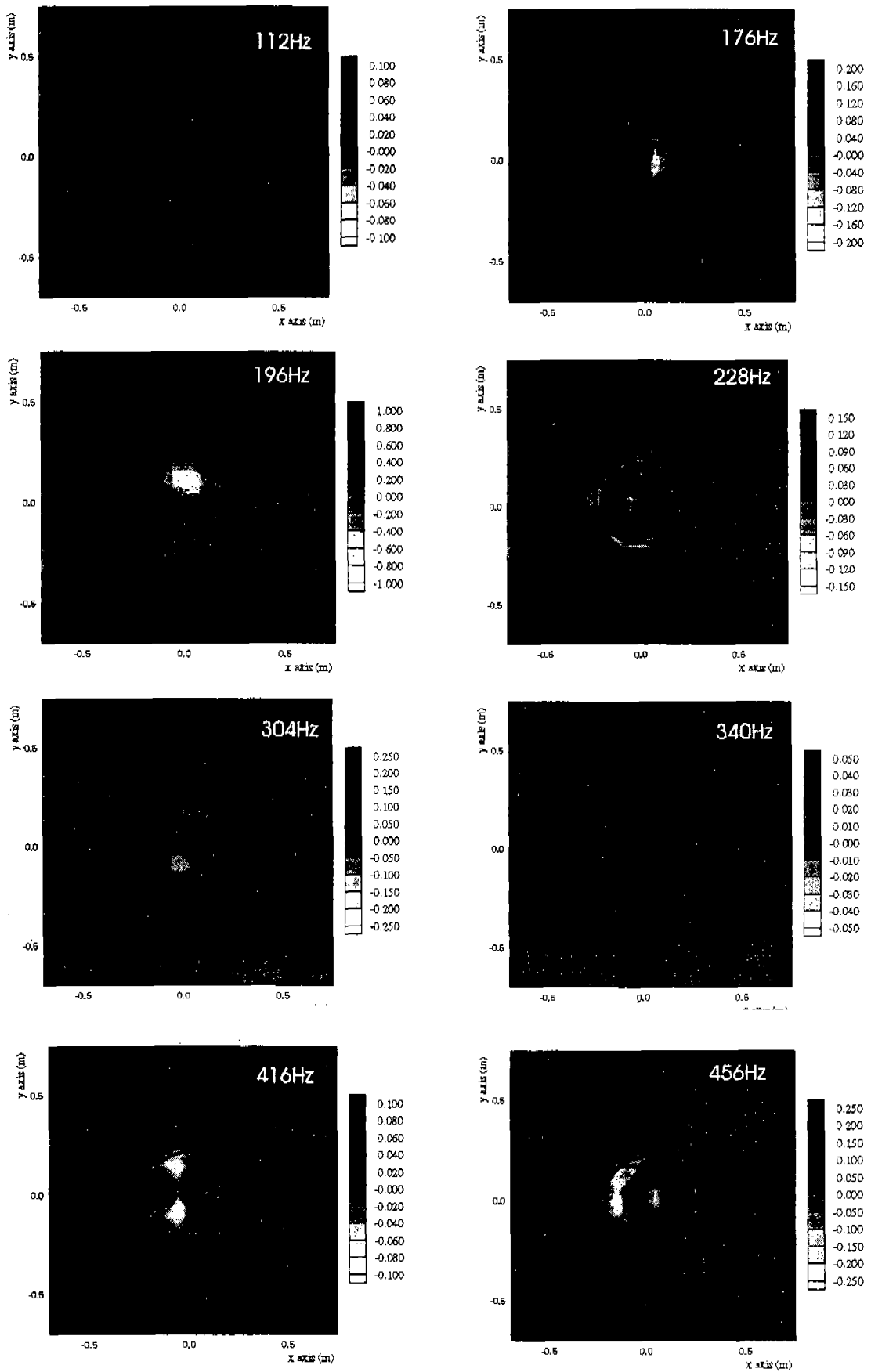


Fig. 5 음향 홀로그래피를 이용한 징 표면에서의 모우드별 방사 음장