

# 음향 인텐시티 기법을 이용한 복잡한 진동-음향계의 방사 음장에 대한 음원 탐색에 관하여

## On the Source Identification by Using the Sound Intensity Technique in the Radiated Acoustic Field from Complicated Vibro-acoustic Sources

강 승 천\*, 이 정 권\*\*  
(Sung-Chon Kang\*, Jeong-Guon Ih\*\*)

\*대우종합기계(주) 엔진 R&D 센터, \*\* 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터  
(접수일자: 2002년 5월 30일; 수정일자: 2002년 9월 2일; 채택일자: 2002년 10월 21일)

본 연구에서는 진동-음향계에서 방사되어 생성된 일반 근접장에서 음향 인텐시티 기법을 이용해 소음원을 파악하는 방법의 문제점에 관하여 논한다. 이를 위해 자동차나 중장비의 엔진실을 모사하는 3차원 구조물 모델을 고려한다. 실제 상황과 유사하도록 모델에는 음원들이 복잡한 형상의 표면에 상호 연관성이 있는 또는 없는 형태로 분포한다. 즉, 음원들은 음향학적으로 단단한 상자들에 의해 형성된 좁은 공간으로 연결되어 있다. 따라서 반사가 심한 음장에 면한 표면에 배치되어 있으며, 전체 구조의 바닥 부분은 하부의 바닥과 작은 틈새만큼 떨어져 있다. 음향 경계요소법을 이용하여 근접 음장과 내부 음장의 인텐시티를 계산한다. 주어진 음원들간의 상대적 위상, 주파수, 위치에 따른 효과를 조사하였고, 그 결과를 등인텐시티선도, 벡터도 및 에너지 유선으로 표현하였다. 현장에서 종종 행해지는 바와 같이, 예를 들어 엔진룸 상부에서 인텐시티를 측정하여 음원을 조사하는 것과 같은, 반사장이 강한 음장에서 음향 인텐시티 기법을 적용하여 음원탐색을 시도할 경우 가짜 음원이 검색될 수 있음을 보였다. 이와 같은 음장에서 정확한 결과를 얻기 위해서는, 음원탐색 수행 전에 음장의 리액티비티에 대한 조사가 먼저 필요하며, 측정을 시행하기 전에 음장의 리액티비티를 없애거나 대폭적으로 줄이는 작업이 선행되어야 할 것이다.

**핵심용어:** 진동-음향계, 방사음, 음원탐색, 음향인텐시티

**투고분야:** 소음 및 공력음향 분야 (10.2), 구조음향 및 진동 분야 (11.1)

In this paper, the problems in identifying the noise sources by using the sound intensity technique are dealt with for the general radiated near-field from vibro-acoustic sources. For this purpose, a three-dimensional model structure resembling the engine room of a car or heavy equipment is considered. Similar to the practical situations, the model contains many mutually coherent and incoherent noise sources distributed on the complicated surfaces. The sources are located on the narrow, connected, reflecting planes constructed with rigid boxes, of which a small clearance exists between the whole box structure and the reflecting bottom. The acoustic boundary element method is employed to calculate the acoustic intensity at the near-field surfaces and interior spaces. The effects of relative source phases, frequencies, and locations are investigated, from which the results are illustrated by the contour map, vector plot, and energy streamlines. It is clearly observed that the application of sound intensity technique to the reactive or reverberant field, e.g., scanning over the upper engine room as is usually practiced, can yield the detection of fake sources. For the precise result for such a field, the field reactivity should be checked a priori and the proper effort should be directed to reduce or improve the reactivity of sound field.

책임저자: 이정권 (ihh@sorak.kaist.ac.kr)

305-701 대전광역시 유성구 구성동

한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터

(전화: 042-869-3035; 팩스: 042-869-8220)

**Keywords:** *Vibro-acoustic source, Field reactivity, Source identification, Sound intensity*

**ASK subject classification:** *Noise and aeroacoustics (10, 2), Structural acoustics and vibration (11, 1)*

## I. 서론

음향 인텐시티는 단위면적을 통과하는 음향 에너지의 크기로서, 음장 내의 한 점에서 크기와 방향을 가지며 정의되는 벡터 성질을 갖는 복소 물리량이다. 이러한 특성에 따라 음향 인텐시티를 이용하여 음원을 탐색하는 방법에 대한 연구가 수십 년간 계속되어 왔다. 초기의 연구는 한 점에서의 음압을 마이크로폰으로 측정하고, 입사속도를 다른 방법으로 측정한 후 이 두 인자를 이용하여 음향 인텐시티를 구하려고 시도했었다. 그러나 1970년대 이후 디지털 신호처리 기술이 발달하면서 2개의 마이크로폰으로 측정한 음압 신호의 상호 스펙트럼을 이용하여 간단하게 음향 인텐시티를 구하는 방법이 개발되면서 그 이용도는 비약적으로 증가하게 되었다.

현재 음향 인텐시티 기법은 소음원 탐색이나 소음원의 음향 파워를 측정하는 목적으로 널리 사용되고 있다. 음향 인텐시티 측정 결과나 계산 결과를 등고선도나 벡터선도 등으로 표현함으로써, 음향 방사 현상이나 전파 특성들을 이해하고 음원을 탐색하는데 매우 유용하게 사용하고 있다. 특히 음향 인텐시티의 벡터적 특성은 음원의 위치를 정확히 찾아내거나, 여러 음원들의 소음 기여도를 구하여 소음 대책 적용의 우선 순위를 부여하는 용도에 매우 적합한 것으로 이해되고 있다. 자동차, 항공기, 기관차, 일반 기계류, 중장비, 가전기기 등의 많은 분야에서 소음원을 탐색하고 소음을 개선하는데 사용되고 있고 다양한 적용사례가 발표된 바 있다. 그러나 이러한 연구 결과들의 일부는 음향 인텐시티가 단지 음장의 특성을 나타내는 인자일 뿐이며 음원의 특성을 완벽하게 표현하지는 못한다는 사실을 간과하고 있다. 예를 들어 승용차나 중장비의 엔진룸에서의 소음원을 찾기 위해 엔진 보닛을 열고 엔진룸 윗면에 격자를 설정한 후, 그 격자점에서 측정한 음향 인텐시티를 등고선도나 벡터선도로 재처리하여 음원 위치를 찾았다고 표현하는 것이 좋은 예제이다. 엔진룸은 자동차 차체, 엔진, 변속기, 흡·배기 파이프, 광열기, 배터리, 악세서리 등의 부품들에 의해 형성되는 작은 틈새 공간들로 이루어져 있고, 바닥면도 언더커버나 도로면과의 사이에서 좁은 간격을 형성하고 있다. 특히 최근의 승용차 엔진룸은 수많은 부품으로 더욱 콤팩트

해지면서 부품들 사이의 공간은 더욱 협소해지고 있다. 이러한 좁은 틈새 공간들은 구조물에서 발생하는 소리들 사이의 간섭을 유발하고 정재파를 발생시키는 등 매우 복잡한 음향 현상을 유발한다. 이러한 복잡한 음장에 의해 형성되는 엔진룸 상부면의 음장도 매우 복잡하게 생성되고, 여기서 측정한 음향 인텐시티를 이용하여 소음원의 위치를 정확히 찾는다는 것은 매우 어렵다. 엔진만을 대상으로 음향 인텐시티를 측정하는 경우도 스타터, 연료분사펌프 등 각종 보기류들과 엔진 본체 사이에서 형성되는 좁은 공간으로부터 발생하는 정재파들에 의해 실제 구조진동 소음원과는 무관한 부분을 주요 음원으로 착각하는 결과가 발생하기도 한다.

본 논문은 앞에서 예와 같이 복잡한 형상의 음향 방사 구조물에 의해 형성된 잔향도가 매우 높은 음장에서 음향 인텐시티 측정 결과를 이용하여 음원을 찾을 때 발생하는 문제에 대한 것이다. 차량의 엔진룸을 단순화하여 상관(correlate)된 소음원을 갖는 4개의 상자와 부분 차폐된 케이스로 둘러 쌓인 모델을 설정하였다. 이 모델의 상부면에 대하여 주파수 변화와 소음원들 사이의 위상차에 따른 액티브 인텐시티(active intensity)와 리액티브 인텐시티(reactive intensity), 음압의 변화를 살펴보았다. 먼저 음향 경계요소법을 이용하여 구한 결과와 측정된 음향 인텐시티를 비교함으로써 수치해석 결과가 실제의 음장을 잘 표현하고 있는지 확인하였고, 음향 경계요소법을 이용하여 여러 조건에 대한 인텐시티 변화를 살펴보았다. 또한 음향에너지 유선(streamline)을 이용하여 음원으로부터 나오는 음향에너지가 음장으로 전파되는 과정을 분석하였다. 이를 통해 잔향성이 큰 음장에 대해 음향 인텐시티 기법으로 음원을 탐색할 때 발생하는 문제점들을 살펴보았다.

## II. 모델링 및 측정 방법

복잡한 형상의 구조 소음원에 의해 형성되는 음장에서 음향 인텐시티 기법을 이용하여 음원을 탐색할 때 발생하는 문제들을 알아보기 위한 수치해석과 실험 수행을 위해 승용차의 엔진룸을 단순화한 모델을 설정하였다. 모델은

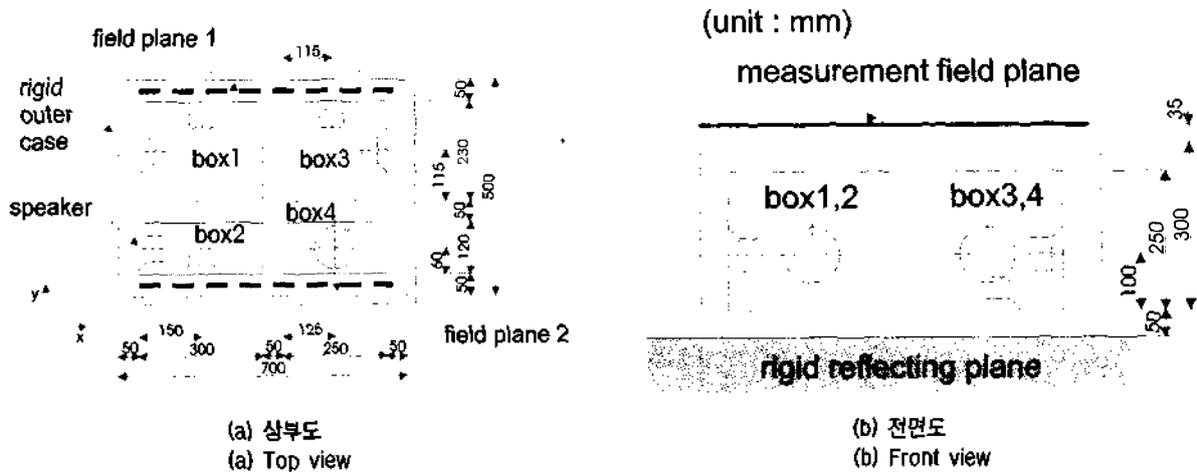


그림 1. 실험 및 모사계산 모델  
Fig. 1. Measurement and simulation model.

그림 1에서 보이는 바와 같이 크기가 다른 4개의 직육면체 상자들과 외부틀을 둘러싸고 위·아래 면이 개방된 외부 케이스로 구성되어 있다. 상자 및 외부 케이스는 바닥면으로부터 50 mm만큼 떨어져 있어 상자들 사이, 상자외부 케이스 사이, 상자외부 케이스와 바닥면 사이에 폭 50 mm씩의 좁은 공간을 형성하고 있다. 각각의 상자에는 1개 내지 2개의 라우드스피커가 설치되어 소음원으로 사용된다. 실험을 위해서 상자들과 외부케이스는 각각 그림 2와 같이 각각 두께 15, 20 mm의 아크릴 판으로 제작되었다. 상자의 내부 공간은 불필요한 내부 공명 효과를 방지하기 위하여 흡음재로 충전하였다.

모델의 최상부 면으로부터 위 방향으로 35 mm 떨어진 곳에 측정평면을 설정하였다. 50 mm의 등간격을 유지하

며 격자형태로 배열한 165점에서 3차원 음향 인텐시티와 음압을 측정하였다. 차단 주파수가 120 Hz인 완전무향실에 도로면을 묘사하기 위해 딱딱한 배플 판을 설치한 후 그 위에 모델을 설치하고 실험을 실시하였다. 측정장비로서 마이크로폰 간격이 12 mm인 음향 인텐시티 탐촉자(B&K 3520, 주파수 범위=125 Hz - 5 kHz)와 2채널 실시간 주파수 분석기(B&K 2144)를 사용하였다. 측정은 1/24 옥타브 밴드를 사용하여 이루어졌다. 서로 상관된 소리를 발생시키기 위하여 1개의 신호발생기를 이용하였고, 백색잡음을 발생시켜 라우드스피커를 구동하였으며, 스피커의 입력 신호선 극성을 교체하여 스피커 간의 위상 변화를 얻었다.

수치계산을 위한 경계요소해석 모델은 그림 3과 같이

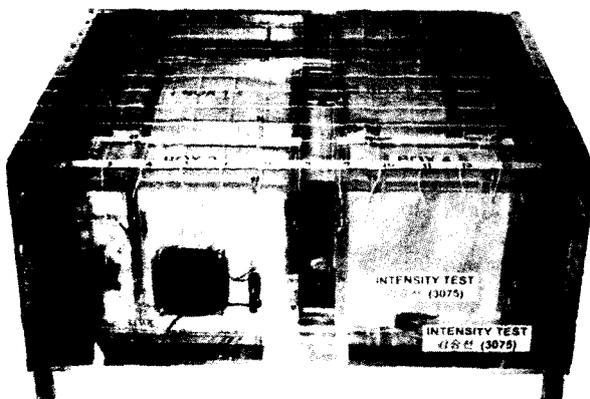


그림 2. 시험에 쓰인 모델의 사진  
Fig. 2. Photo of test model.

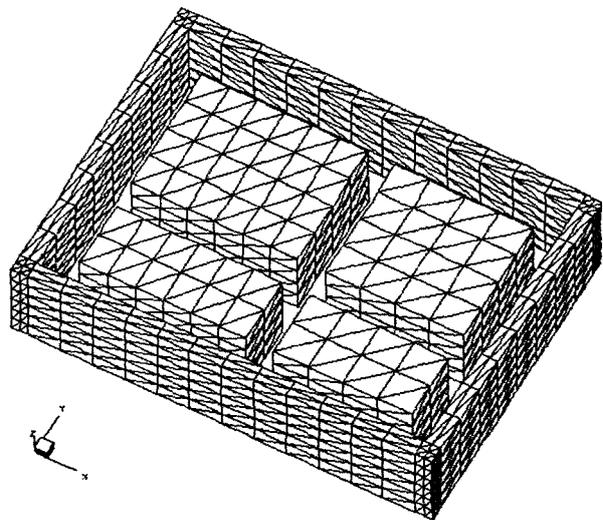


그림 3. 음향경계요소 모델 (절점수=1152, 요소수=572)  
Fig. 3. Acoustic boundary element model (1152 nodes, 572 elements).

1.52개의 노드 (node)와 572개의 2차 요소들로 구성하였다. 요소의 최대 특성 길이는 177 mm로서 사용 가능한 최대 주파수는 특성 길이를 1/3로 설정할 경우 650 Hz이다. 이 때의 최대 모델링 오차는 약 1% 정도이다. 실험을 위해 설정한 것과 동일한 측정평면에서 음향 인텐시티와 음압을 계산하였다. 아울러 상자들과 외부 케이스 사이의 좁은 공간에서 발생하는 음향 에너지의 흐름을 파악하기 위하여 그림 1(a)에서와 같은 수직 평면 1과 2에 대하여 음향 인텐시티를 계산하고 음향 에너지 유선 (streamline) 을 구하였다.

음원들의 가진 크기는 모두 같게 설정하고 위상을 표 1과 같이 변화시켜가며 실험과 해석을 수행하였다. 수치 해석 계산의 경계조건으로서 음원을 제외한 다른 노드의 진동 속도는 0으로 설정하였고, 반무한 공간 (half-space) 문제로 설정하여 바닥면의 영향을 고려하였다.

### III. 결과 및 분석

표 1의 측정조건 1-3에 대하여 상부 측정평면에서 측정 한 음향 인텐시티의 공간 평균 스펙트럼은 그림 4와 같다. 등간격으로 설정한 격자점에서 음향 인텐시티를 측정하였기 때문에 이 그림의 결과는 측정 평면으로부터 외부 공간으로 방사되는 전체 음향 파워 스펙트럼과 같은 경향을 갖게 된다. 평균 인텐시티는 303, 428, 508, 630 Hz에서 최고치들을 나타내고 있다. 일반적으로 실무현장에서 많은 엔지니어들은 이러한 특정 주파수들에서 피크 값이

표 1. 측정과 모사계산을 위해 쓰인 스피커의 위상 정보  
Table 1. Loudspeaker phase settings for measurement and simulation.

Set number	Phase of loudspeaker in each box.			
	Box 1	Box 2	Box 3	Box 4
1	0°	0°	0°	0°
2	0°	180°	0°	0°
3	0°	0°	180°	0°
4	0°	+45°	-45°	0°
5	0°	-45°	+45°	0°

발생하고 있다는 사실만으로부터 이 주파수들을 대상으로 음원 탐색을 시도하는 경향이 있다. 같은 모델의 수치 해석 결과에 따르면 이러한 결과는 상자들, 외부 케이스, 바닥 반사면 등의 사이 공간에서 발생하는 공진과 관련된 것으로 확인되었다. 측정조건 1에 대한 결과가 다른 두 조건에 대한 결과와 다른 경향을 보이는 것으로부터 복잡한 형상의 구조물에서 발생하는 음장은 음원의 위상 분포에 따라 변화하고 있음을 알 수 있다.

실험치의 428, 508 Hz에 해당하는 모드 (mode)들은 수치해석결과 450, 530 Hz에서 나타났다. 이러한 주파수의 차이는 수치해석의 경우 스피커를 제외한 모든 표면을 진동 속도가 0인 강제 경계조건으로 가정한 반면, 실험에 사용된 모델은 이상적인 강제 경계조건과는 조금 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다. 그림 5, 6은 각각 측정조건 1-3에 대하여 실험과 수치해석으로 구한 508 Hz 모드의 음향 인텐시티 벡터와 428 Hz 모드의 등음압선도를 비교한 것이다. 이 결과에서 인텐시티나 음압의 최고치 발생

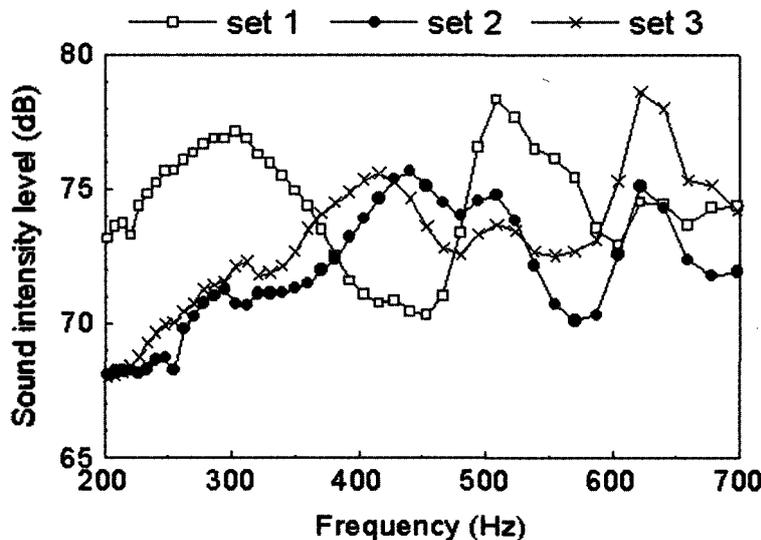


그림 4. 음원의 위상 분포 변화에 따른 측정면에서 측정된 평균 음향인텐시티 레벨  
Fig. 4. Measured average sound intensity level on the measurement field plane varying the source phases.

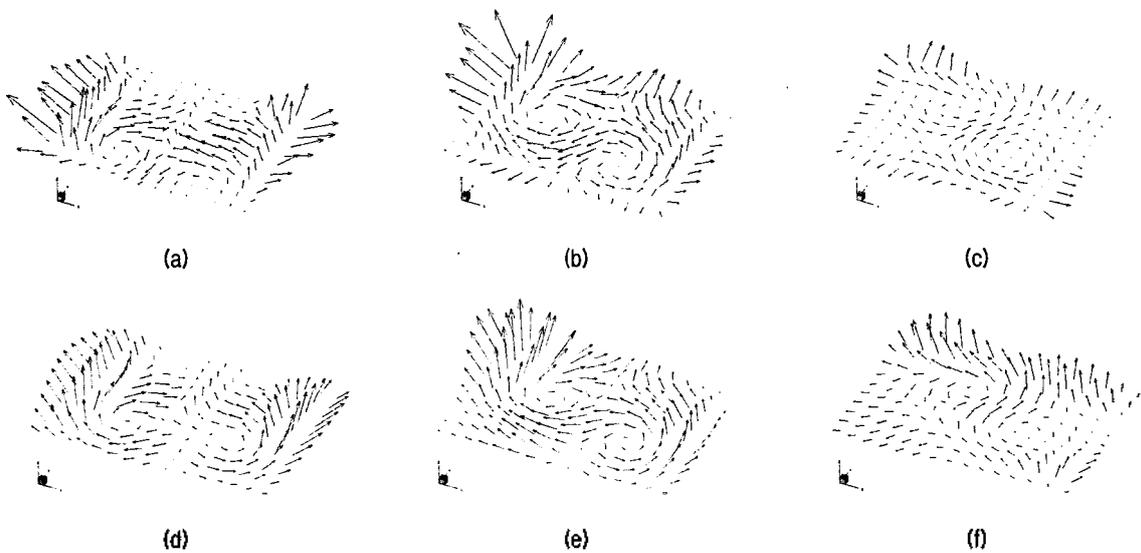


그림 5. 508 Hz의 모드에 있어서 측정면에서의 액티브 음향인텐시티 벡터선도: (a), (b), (c)는 각각 1, 2, 3번 데이터 셀에 대한 측정 결과이고, (d), (e), (f)는 이에 해당하는 계산 결과  
 Fig. 5. Active sound intensity on the measurement field plane for 508 Hz mode: measurement data for (a) set 1, (b) set 2, (c) set 3, calculated results for (d) set 1, (e) set 2, (f) set 3.

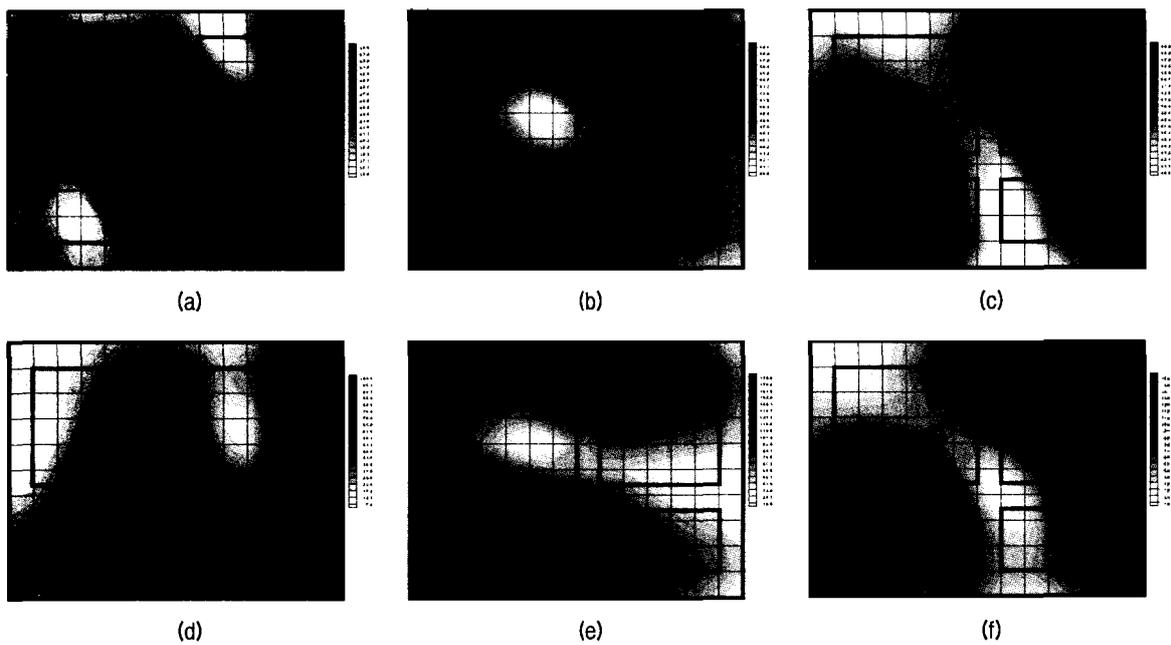


그림 6. 428 Hz 모드에 있어서 측정면에서의 음압레벨의 등압선도: (a), (b), (c)는 각각 1, 2, 3번 데이터 셀에 대한 측정 결과이고, (d), (e), (f)는 이에 해당하는 계산 결과  
 Fig. 6. Sound pressure level on the measurement field plane for 428 Hz mode: measurement data for (a) set 1, (b) set 2, (c) set 3, calculated results for (d) set 1, (e) set 2, (f) set 3.

점, 벡터의 방향 등이 실험과 수치해석에서 서로 거의 같은 결과를 보이고 있으며, 근접 음장에서 음향 경계요소법으로 구한 결과가 실제의 음향 현상을 정확히 묘사하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 7, 8은 450 Hz 모드 (실험치 428 Hz 모드에 해당)에 대해 측정평면에서의 액티브 인텐시티를 계산한 결과

이다. 음원인 것처럼 액티브 인텐시티가 높게 발생하는 위치들은 실제 소음원의 위상 조건의 변화에 따라 이동되고 있다. 이것은 여러 개의 라우드스피커에서 나오는 음파들이 서로 간섭 되면서 음장을 형성하기 때문에 발생하는 현상이다. 라우드스피커 가진 신호의 위상차가 45°, 90° 이면 인텐시티 최대점의 위치는 각각 파장의 1/8, 1/4

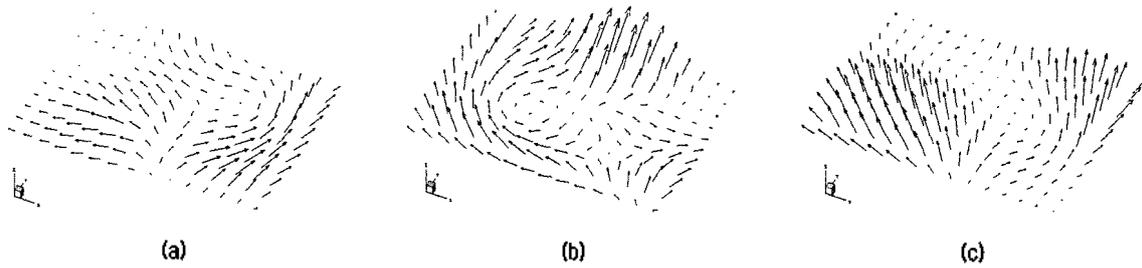


그림 7. 450 Hz의 모드에 있어서 측정면에서의 계산된 액티브 음향 인텐시티 벡터선도: (a), (b), (c)는 각각 1, 4, 5번 데이터 셀에 대한 계산 결과

Fig. 7. Calculated active intensity on the measurement field plane for 450 Hz mode. (a) set 1, (b) set 4, (c) set 5.

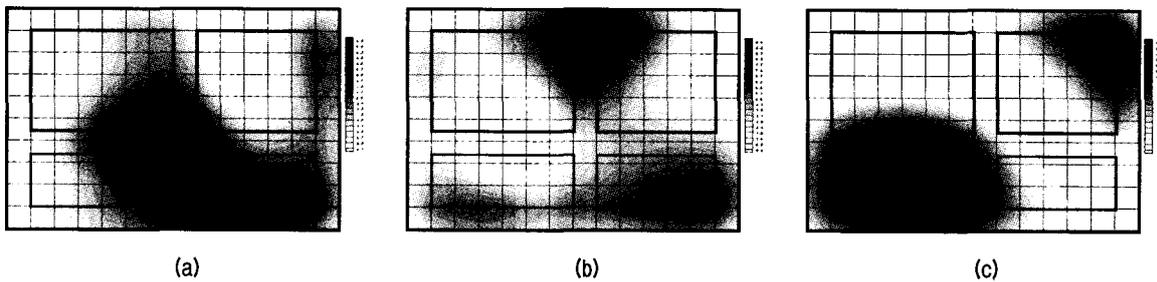


그림 8. 450 Hz 모드의 측정면에서 계산된 액티브 음향 인텐시티의 수직 성분. (a), (b), (c)는 각각 1, 4, 5번 데이터 셀의 결과

Fig. 8. Normal component of calculated active intensity on the measurement field plane for 450 Hz mode. (a) set 1, (b) set 4, (c) set 5.

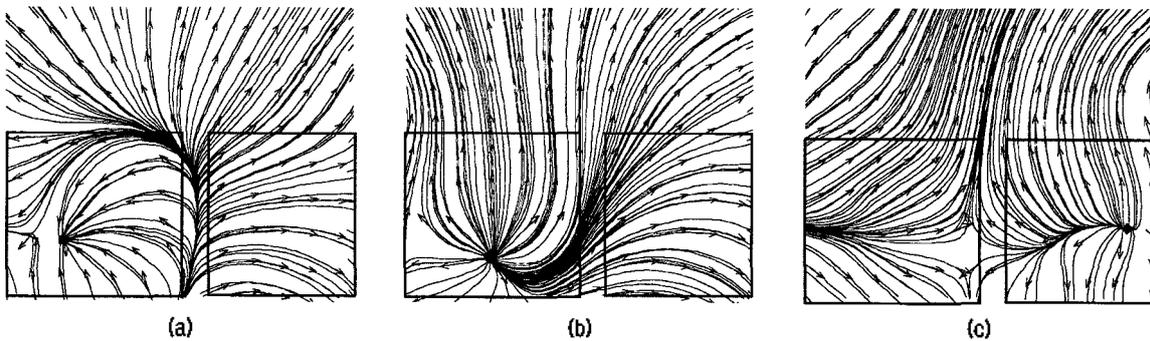


그림 9. 450 Hz 모드에 있어서 음원을 이루는 내부 상자들과 바깥쪽 케이스 사이 공간의 수직면에 대한 에너지 유선. (a)는 데이터 셀10에 대한 수직면 2, (b)는 데이터 셀4에 대한 수직면 1, (c)는 데이터 셀5에 대한 수직면 2의 결과

Fig. 9. Energy streamlines on the vertical field plane between boxes and outer case for 450 Hz mode. (a) set 1 for vertical plane 2, (b) set 4 for vertical plane 1, (c) set 5 for vertical plane 2.

정도씩 이동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 액티브 인텐시티 최대점의 위치가 라우드스피커의 위치와 일치하지 않게 되어, 이렇게 리액티비티(reactivity)가 큰 음장에서는 액티브 인텐시티 분포를 이용해 소음원 위치를 정확히 찾는 것이 불가능하다는 것을 확인할 수 있다.

그림 8의 결과만을 놓고 분석하면, '주요 음원의 위치가 액티브 인텐시티 최대점 부근에 존재하지 않겠는가' 하는 일반론적 추정을 할 수도 있다. 이러한 문제를 좀 더 정확히 확인하기 위해 그림 1(a)에서와 같이 상자들과 외부 케이스 사이에 있는 수직 측정면 1, 2에 대하여 음향

인텐시티를 구해 에너지 유선을 그려 보았다. 그림 8(b)를 보면 음원인 것처럼 보이는 액티브 인텐시티 최대점이 그림의 상부 중앙에 위치하고 있어 box-1, box-3에 있는 음원의 영향을 받는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 그림 9(b)의 에너지 유선으로 확인해 보면 이 인텐시티 최대점은 box-1에 있는 음원으로부터의 음향 에너지 흐름에 의해 발생하는 것으로 나타나 box-3에 있는 음원과는 무관한 것을 확인할 수 있다. 그림 9(a)의 경우는 box-2의 스피커 위치가 오히려 음향학적인 소멸점(sink)으로 작용하고 있음을 보여주고 있다. 그림 8(c)와 그림 9(c)를 비교

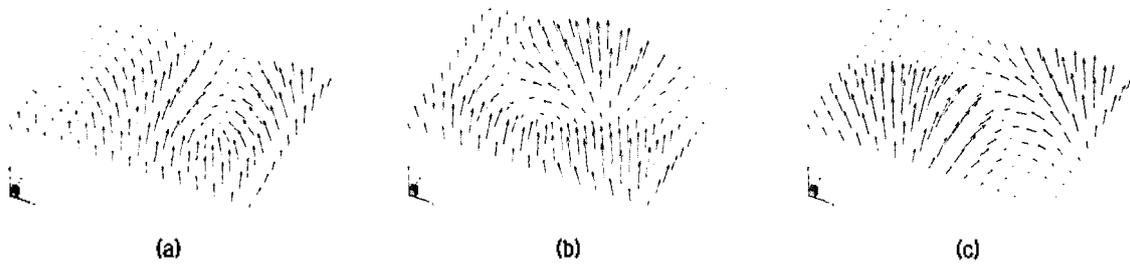


그림 10. 450 Hz의 모드에 있어서 측정면에서의 계산된 리액티브 음향 인텐시티 벡터선도: (a), (b), (c)는 각각 1, 4, 5번 데이터 셀에 대한 계산 결과

Fig. 10. Calculated reactive intensity on the measurement field plane for 450 Hz mode. (a) set 1, (b) set 4, (c) set 5.

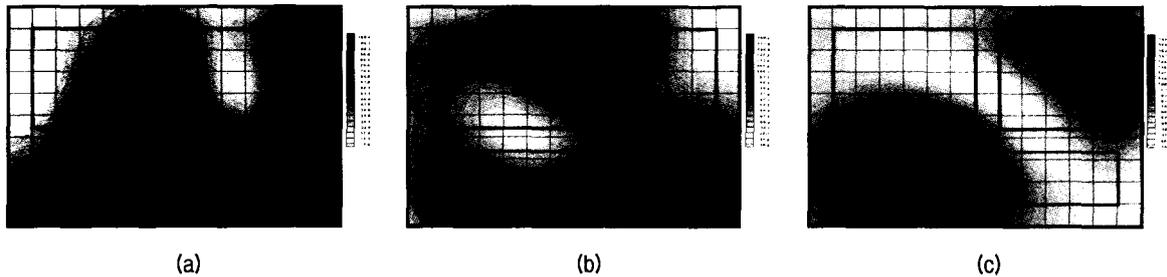


그림 11. 450 Hz 모드의 측정면에서 계산된 음압레벨의 등음압선도. (a), (b), (c)는 각각 1, 4, 5번 데이터 셀의 결과

Fig. 11. Calculated sound pressure level on the measurement field plane for 450 Hz mode. (a) set 1, (b) set 4, (c) set 5.

해도 인텐시티 최대치는 단순히 가장 근접한 음원 만에 의해서 발생하는 것이 아니라 상자들 사이의 공간에서 발생하는 매우 복잡한 에너지 흐름에 의해 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과의 주된 원인은 음장의 리액티비티가 매우 높고, 음원의 위상이 서로 상관되어 있기 때문이다. 이렇게 서로 위상이 상관된 음원은 운전 중에 고유 모드로 진동하는 엔진이나 각종 기계류에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 따라서 일반적인 승용차, 버스, 트럭, 중장비 등의 엔진룸에서 측정된 액티브 인텐시티 최대점의 위치는 실제 음원의 위치를 정확히 표현하고 있지 못할 가능성이 매우 높다. 특히 이러한 경향은 음장의 리액티비티의 영향을 크게 받는 저주파수 영역에서 발생할 가능성이 매우 높다.

그림 10은 음원의 위상 조건이 위와 같을 때 450 Hz에 대한 리액티브 인텐시티 벡터 계산 결과이다. 부록 A의 (A2)식에서와 같이 리액티브 인텐시티는 포텐셜 에너지의 공간 미분에 해당되므로 음향 포텐셜 에너지원의 위치를 표현한다. 따라서 서로 상관된 음원들로부터 나오는 소리들의 상호 간섭 때문에 액티브 인텐시티로 음원 탐색이 어려운 경우 리액티브 인텐시티 분포를 음원 탐색의 보조적인 수단으로 사용할 수 있다는 연구 결과가 있다 [6]. 그러나 이 방법도 리액티비티가 높은 음장에서는 실제 음원의 위치를 정확히 표현할 수 없다. 그것은 리액티

브 인텐시티 분포가 음압의 공간 분포와 동일한 결과를 나타내기 때문이다. 그림 11은 리액티브 인텐시티에서 음원인 것처럼 보이는 부분들이 음압의 최고점 위치들과 일치하고, 소멸점인 것처럼 보이는 부분은 음압 최저점 분포와 일치함을 보여주고 있다. 이 결과로부터 리액티브 인텐시티는 음원의 위치를 보여주는 인자라기보다는 정재파의 위치를 알려주는 인자임을 알 수 있다.

음장이 가지고 있는 특성이 음원 탐색 등의 많은 음향학적 성질을 결정하는데 결정적인 영향을 미침에 따라 단순한 음장특성지표를 이용하여 음장 특성을 표현해 보려는 연구들이 있었다[7,8]. 리액티비티 지수 레벨 (Reactivity index level,  $L_K$ )도 이러한 음장특성지표 중의 하나이다. 음향 인텐시티 레벨  $L_I$ 와 음압 레벨  $L_P$ 에 의해  $L_K$ 는 다음과 같이 정의된다[8]:

$$L_K = L_I - L_P. \tag{1}$$

여기서  $L_K$ 는 실제로는 음장특성, 마이크로폰들 사이의 위상 오차, 측정에 사용되는 장비들의 위상 오차 등에 의해서 영향을 받는다. 그러나 위상오차가 거의 없는 측정 장비를 이용해서 측정을 실시한다면,  $L_K$ 를 이용하여 음장이 지나치게 리액티브 한지의 여부를 정성적으로 빨리 판단하는 지표로 사용할 수 있다.  $L_K$  값에 대해서는 흡음이 매우 강한 음장에서는 약 5 dB 정도, 리액티브한

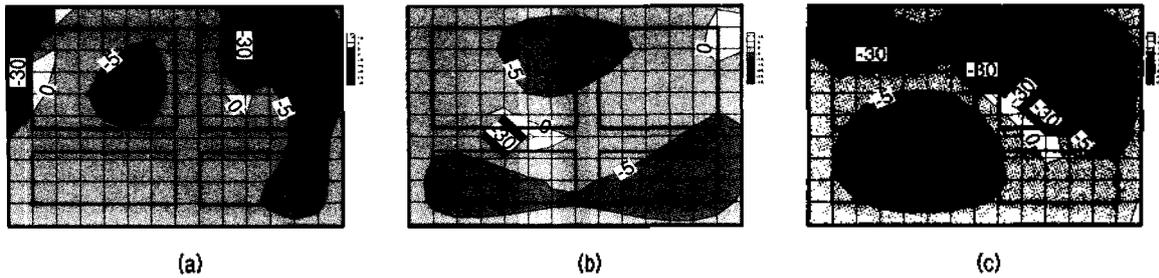


그림 12. 450 Hz 모드의 측정면에서 계산된 리액티비티 지수 레벨. (a), (b), (c)는 각각 1, 4, 5번 데이터 셀의 결과  
 Fig. 12. Calculated reactivity index level on the measurement field plane for 450 Hz mode. (a) set 1, (b) set 4, (c) set 5.

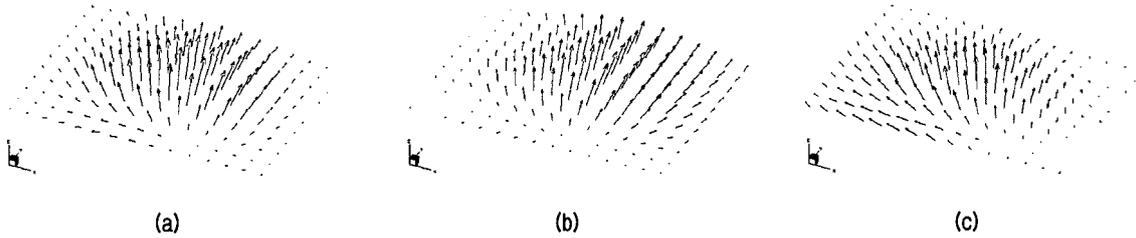


그림 13. 450 Hz의 모드에 있어서, 흡음재가 바깥쪽 강체 케이스의 안쪽에 부착되어 있을 때, 측정면에서의 계산된 액티브 음향 인텐시티 벡터선도: (a), (b), (c)는 각각 1, 4, 5번 데이터 셀에 대한 계산 결과  
 Fig. 13. Calculated active intensity on the measurement field plane for 450 Hz mode when the sound absorbing material is lined on the inner surface of the rigid outer case. (a) set 1, (b) set 4, (c) set 5.

음장에서는 -12 ~ -23 dB 정도라는 연구 결과가 있고 [9], 또 다른 연구 결과로서 자유 음장에서는  $L_K = -0.2 \sim -0.5$  dB, 리액티브한 음장에서는 -6 ~ -8.4 dB 정도라는 보고도 있다[10]. 그림 12는 앞의 모델에 대한  $L_K$  계산 결과이다. 음장 내 대부분의 영역에서  $L_K$ 가 -5 dB보다 작은 값을 보이고 있으며, 이 결과로부터 측정평면은 대체로 리액티비티가 큰 음장으로서 인텐시티를 이용하여 음원의 위치를 정확히 찾기 어려움을 알 수 있다.

또 다른 시도로서 승용차나 중장비의 엔진룸이 위에서 의 결과와 같이 리액티비티가 큰 음장일 때, 엔진룸 내부 표면에 흡음재를 부착하여 음장의 리액티비티 특성을 줄이고 음향 인텐시티를 측정할 경우 음원의 위치를 정확히 탐색하는지 확인해 보았다. 수치해석 모델에서는 외부 케이스의 안쪽 표면에 두께 50 mm의 폴리우레탄 흡음재를 부착한 것으로 가정하고, 측정을 통해 구한 흡음재의 임피던스 값 (450 Hz의 경우  $432 - j385$  Pa.s/m)을 대입하여 수치해석을 시행하였다. 흡음재의 특성은 임피던스 관을 사용하여 측정하였다. 측정에서는 저주파수 영역에서 측정 정확도 향상을 위해 3개의 마이크로폰을 사용하였고, 임피던스 관 끝 부분의 부하로서 강철판과 무반사 종단 2가지를 바꿔가며 측정하였다[11]. 따라서 흡음재는 국소 반응 (locally reacting)하는 재료로 가정되었으며, 음파는 흡음재에 수직입사하는 것으로 고려되었다. 그림

13은 450 Hz 모드에 대한 계산 결과로서, 기대했던 음원 위치 탐색이 제대로 이루어지지 않음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론

복잡한 형상의 구조 음원에 의해 만들어지는 리액티브한 음장이 상관된 음원에 의해 위상차를 가지며 가진될 때 음향 인텐시티 기법을 사용하여 음원 탐색을 수행할 경우 발생할 수 있는 문제점에 대하여 살펴보았다. 실험 및 수치해석에 사용된 모델은 승용차의 엔진룸을 단순화하면서도 그 특성을 유지한 것이었다. 음향 경계요소법으로 계산한 액티브, 리액티브 인텐시티를 사용하여 음원 위치 탐색을 시도하였으나 두 인자 모두 실제의 음원의 위치를 표현하지 못하였다. 이것은 음장에 의한 정재파와 여러 개의 상관된 음원으로부터 나오는 소리들의 간섭에 의하여 리액티비티가 높은 공간에서 매우 복잡한 음장을 형성하기 때문이었다. 에너지 유선을 이용하여 복잡한 근접 음장에서의 음향 에너지 흐름을 가시화 함으로써 여러 개의 음원 중에서 음장에 영향을 미치는 음원을 분리하여 찾아낼 수 있었다. 측정 평면에서 리액티비티 지수 레벨을 계산하였고, 그 결과는 음장의 리액티브한 특성에 관한 유용한 정보를 제공해 주었으며, 음장에

서 음향 인텐시티 측정을 이용해 음원 탐색을 수행할 수 있는지 여부를 판단해 주는 정성적 지표로 사용할 수 있었다. 승용차 엔진룸 내부 표면에 흡음재를 부착하여 음장의 리액티비티를 줄이고 인텐시티를 계산하여 음원의 위치를 찾아보려는 시도도 실패하였다.

본 연구 결과 엔진룸이나 이와 유사한 복잡한 구조 소음원에 대하여 개방된 면에서 액티브, 리액티브 인텐시티를 측정하여 소음원의 위치를 찾아내려는 시도가 부적절할 수도 있음을 알 수 있었다. 이렇게 리액티브한 음장에서는 여러 개의 상관된 음원에서 나오는 소리들이 서로 간섭을 일으켜, 특히 저주파수에서, 가상의 음원이 존재하는 것과 같은 음장을 형성할 수 있으며, 인텐시티 측정 결과는 이 가상의 음원들의 위치를 표현하고 있다. 따라서 음원탐색 수행 전에 음장의 리액티비티에 대한 조사가 먼저 필요하며, 측정을 시행하기 전에 음장의 리액티비티를 없애거나 대폭적으로 줄이는 (예를 들어 -6 dB 이상) 작업이 선행되어야 할 것이다. 또한 이러한 복잡한 음장에 대한 정확한 음원 탐색을 위해서는 경제요소법에 기초한 음향 홀로그래피 (near-field acoustical holography based on the BEM)와 같은 다른 음원 탐색 기법이 필요하다고 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 BK21 프로젝트 및 NRL의 부분적 지원을 받았습니다.

### 참고 문헌

1. F. J. Fahy, *Sound Intensity*, Elsevier Applied Science, London, 1989.
2. J. Adin Mann, III, J. Tichy, and A. Romano, "Instantaneous and time-averaged energy transfer in acoustic fields," *J. Acoust. Soc. Am.*, **82** (1), 17-30, 1987.
3. S. Gade, "Sound Intensity (Part I, Theory)," *Technical Review No.3*, Brüel and Kjær Instruments, Inc., Naerum, Denmark, 1982.
4. R. V. Waterhouse, T. W. Yates, D. Feit, and Y. N. Liu, "Energy streamlines of a sound source," *J. Acoust. Soc. Am.*, **78** (2), 758-762, 1985.
5. R. V. Waterhouse and D. Feit, "Equal-energy streamlines," *J. Acoust. Soc. Am.*, **80** (2), 681-684, 1986.
6. J. Adin Mann, III and J. Tichy, "Acoustic intensity analysis: Distinguishing energy propagation and wave-front propagation," *J. Acoust. Soc. Am.*, **90** (1), 20-25, 1991.

7. F. Jacobsen, "Active and Reactive, Coherent and Incoherent sound fields," *J. Sound Vib.*, **130** (3), 493-507, 1989.
8. S. Gade, "Validity of intensity measurements in partially diffuse sound field," *Technical Review No.4*, Brüel and Kjær Instruments, Inc., Naerum, Denmark, 1985.
9. E. T. Bühlmann and A. Stimmemann, "Suppression of external noise in sound intensity measurements in reverberant rooms and in the near field of the external source," *Proceedings of the Second International Congress on Acoustic Intensity*, 23-26, Senlis, France, 1985.
10. E. L. Noé, "The influence of the configuration of sound intensity measurements on the determination of sound power over a range of environmental conditions," *Proceedings of the Second International Congress on Acoustic Intensity*, 343-348, Senlis, France, 1985.
11. 이화수, 장승호, 이정권, "다공질형 재료의 음향전파상수와 특성 임피던스의 결정," 한국음향학회 추계학술대회 논문집, 235-240, 서울, 1997.

## (부록 A) 음향 인텐시티

시간상 조화음으로 ( $e^{j\omega t}$ ) 표현되는 음장 내의 한 점에서  $r$  방향으로의 복소 인텐시티  $C$ 는  $C = I + jQ$ 로 표현되며, 액티브 인텐시티  $I$ 와 리액티브 인텐시티  $Q$ 는 각각 다음 식과 같이 정의된다[1-3]:

$$I(r) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ p(r) u^*(r) \} = \frac{1}{2\omega\rho} P^2(r) \nabla \phi(r), \quad (A1)$$

$$Q(r) = \frac{1}{2} \operatorname{Im} \{ p(r) u^*(r) \} = \frac{-1}{2\omega\rho} P(r) \nabla P(r). \quad (A2)$$

여기서  $p(r)$ 과  $u(r)$ 은 각각 음압과 입자속도의 공간좌표 성분들이며,  $u^*(r)$ 은  $u(r)$ 의 공액 복소수이고,  $P(r)$ 과  $\phi(r)$ 은 다음 식과 같이 음압을 정의하는 음압의 크기와 거리에 따른 위상차이다:

$$p(r, t) = p(r) e^{j\omega t} = P(r) e^{j[\omega t - \phi(r)]}. \quad (A3)$$

또 매질의 흐름이 없을 때의 입자속도는 Euler 방정식에 의해서  $r$  방향에 대해서 다음과 같이 정의된다:

$$u(r, t) = \frac{1}{\omega\rho} [P(r) \nabla \phi(r) + j \nabla P(r)] e^{j[\omega t - \phi(r)]}. \quad (A4)$$

위의 (A1)식에서 액티브 인텐시티 벡터는 음압의 위상  $\phi(r)$ 의 공간미분에 비례하며, 음파의 진행방향과 같은 방향을 갖는다. 또한  $P(r) \nabla \phi(r)$ 은 음압과 같은 위상을 가지므로 액티브 인텐시티는 음파의 진행 방향으로 음향 에너지를 잘 전파하는 성질을 갖는다. 이에 비하여 (A2) 식으로 정의되는 리액티브 인텐시티는 음압의 크기의 공

간 미분에 비례하며, 음압 크기의 공간상 분포를 의미하고, 위치에너지의 분포차에 관해 부의 관계를 갖게 된다.  $\nabla P(r)$ 는 음압의 공간 미분이어서 공간상에 있는 각 점에서의 음압과 90° 만큼의 위상차를 갖는 (in-quadrature) 관계를 갖기 때문에 리액티브 인텐시티는 음향에너지를 원거리 음장 (far field)으로 거의 전파시키지 못한다.

한편 복소 인텐시티에 curl을 취하여 보면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다:

$$\nabla \times \mathbf{I} = 4\omega\rho(\mathbf{u}_a \times \mathbf{u}_b) \neq 0; \quad \nabla \times \mathbf{Q} = 0. \quad (\text{A5a,b})$$

따라서 액티브 인텐시티 벡터는 최소한 근접장에서 와류 (vortex)의 형태를 지니게 됨을 알 수 있다. 또 복소 인텐시티에 divergence를 취해 보면,  $L$ 이 Lagrangian (운동에너지+위치에너지)이라 할 때, 다음과 같은 관계식을 얻게 된다:

$$\nabla \cdot \mathbf{I} = 0; \quad \nabla \cdot \mathbf{Q} = -2\omega L \neq 0. \quad (\text{A6a,b})$$

음장에 대한 리액티브 인텐시티 계산 결과를 보면 매질 흐름이 최대인 지역이 음원인 것처럼 나타나고, 매질 흐름의 최소인 부위는 소멸점 (sink)인 것처럼 작용하게 되는데, 이에 비하여 액티브 인텐시티의 경우는 실제 음원만이 생성점 (source)으로 표현된다.

### (부록 B) 에너지 유선 (streamline)

에너지 유선은[1,2,4,5] 음장에서 액티브 인텐시티 벡터들의 접선을 부드럽게 연결한 선이다. 그 개념은 유체 역학에서 비압축성 유체가 정상류에서 정의되는 속도 유

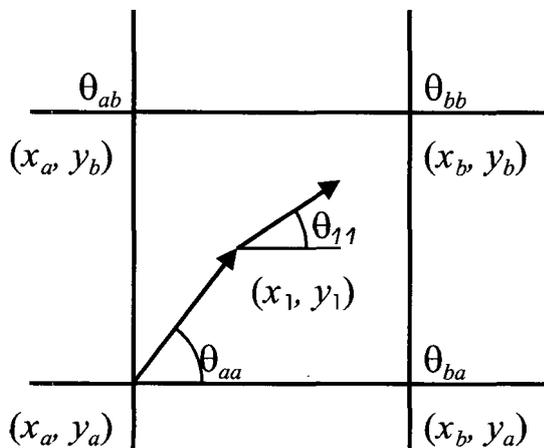


그림 B1. 에너지 유선을 계산하기 위한 격자 모델  
Fig. B1. Grid model for calculating the energy streamlines.

선과 같은 성질을 갖는다.

$xy$ -평면에서의 경우를 예로 들면, 임의의  $(x, y)$ 점에서의 액티브 인텐시티의 기울기는 다음 식과 같다:

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{I_y(x, y)}{I_x(x, y)} \right]. \quad (\text{B1})$$

여기서  $I_x$ 와  $I_y$ 는 각각  $x$ -,  $y$ -방향의 액티브 인텐시티 성분들이다. 그림 B1과 같은 격자 모델에서  $(x_a, y_a)$ 를 출발점으로 하고  $\theta_{aa}$ 를 그 점에서의 액티브 인텐시티 기울기라고 할 때,  $d$ 만큼 떨어진 다음 점  $(x_1, y_1)$ 의 위치는 다음과 같이 결정할 수 있다:

$$x_1 = x_a + d \cos \theta_{aa}, \quad y_1 = y_a + d \sin \theta_{aa}. \quad (\text{B2})$$

다음 점  $(x_1, y_1)$ 에서의 기울기  $\theta_{11}$ 는 유한요소해석 등에서 널리 사용되고 있는 이중 선형 보간 기법 (bi-linear interpolation)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\xi_a = \frac{x_1 - x_b}{x_a - x_b}, \quad \xi_b = \frac{x_1 - x_a}{x_b - x_a}, \quad (\text{B3a,b})$$

$$\eta_a = \frac{y_1 - y_b}{y_a - y_b}, \quad \eta_b = \frac{y_1 - y_a}{y_b - y_a}. \quad (\text{B3c,d})$$

$$\theta_{11}(x_1, y_1) = \theta_{aa} \xi_a \eta_a + \theta_{ab} \xi_a \eta_b + \theta_{ba} \xi_b \eta_a + \theta_{bb} \xi_b \eta_b. \quad (\text{B4})$$

(B2) 식을 이용하면 한 개의 인텐시티 측정점을 지나는 에너지 유선을 음장 내의 모든 점에서  $d$ 의 간격으로 그릴 수 있다. 이러한 형태의 에너지 유선은 2개의 유선들 사이에 있는 음향 에너지의 양이 일정하지 않기 때문에 부등간격유선이라고 한다. 부등간격유선은 음장 내에서 모든 격자점을 반드시 통과하게 되므로 비교적 고르게 분포되며, 음원이 음장에 주는 영향에 대한 정보를 제공한다. 그러나 음향 에너지 흐름의 크기는 알 수 없으며, 이를 위해서는 등간격 유선을 사용해야 한다[4,5].

유체역학에서 유선은 유체 입자의 이동 궤적을 나타내는 것이 아니라 단지 유체 입자 속도 벡터들의 접선을 부드럽게 연결한 것이다. 음향 문제에서도 마찬가지로 에너지 유선은 음장 내 각 점에서의 음향 에너지의 실제 전달 경로를 그대로 나타내는 것이 아니라 시간 평균된 음향 에너지의 흐름 벡터를 부드럽게 연결한 선에 해당된다. 그럼에도 불구하고 에너지 유선은 음장에서, 특히 복잡한 근접음장이나 리액티비티가 큰 음장에서의 평균적인 음향 에너지 흐름을 쉽게 이해할 수 있도록 가시적으로 보여주는 효과가 있다.

---

## 저자 약력

---

● 강 승 천 (Sung-Chon Kang)



1982년: 연세대학교 공과대학 기계공학과 (학사)

1984년: 연세대학교 대학원 기계공학과 (석사)

1984년~현재: 대우중합기계(주) 엔진연구개발담당,  
수석연구원

2000년: 한국과학기술원 기계공학과 (박사)

\* 주관심분야: 디젤엔진 소음/진동, 구조음향

● 이 정 권 (Jeong-Guon Ih)

한국음향학회지 제19권 제7호 참조