

소리를 시각화하는 다양한 방법

Sound Visualization Gallery: A means to express sound field in space and time

최 정 우† · 김 양 한*

Joung-Woo Choi, Yang-Hann Kim

Key Words : Sound Visualization(음장 가시화), Sound Intensity(음향 인텐시티), 3D Sound Field(3 차원 음장)

ABSTRACT

What does sound look like if we can see it? It might depend on the acoustic variables we want to see. In this article, we propose various ways to visualize or express sound field in much more intuitive manner. In particular, new visualization schemes that can effectively visualize sound intensity and 3D pressure field are proposed. This allows us to represent sound pressure, particle velocity and acoustic conductance at the same time, even in three-dimensional coordinate. Visualization examples corresponding to the proposed techniques show that we can successfully transfer the meaning of physical variable to visual space.

1. 서론

소리의 시·공간적 전파 특성을 이해하기 위해서, 적절한 방법으로 시각화(visualization)하여 그림 혹은 영상으로 표현하는 방법이 널리 사용된다. 이러한 시각화의 과정은 물리적인 영역(physical domain)의 각종 음향 변수(acoustic variable)들을 가시 영역(visual domain)의 각종 시각 변수(visual variable)로 치환하여 표현하는 일종의 사상(寫像, mapping) 작업으로 정의할 수 있다. 예를 들면, 공간의 음압 변화를 표현하기 위해, 음압의 크기를 색상 혹은 명암 변화로 나타내는 방법이 널리 사용된다. 이 경우, 공간적인 위치(x, y)는 그대로 영상의 공간 좌표로 사상되며, 음압이라는 음향 변수가 색상 혹은 명암이라는 시각 변수로 사상된 것으로 볼 수 있다.

소리를 시각화하는 데 있어 중요한 것은, 사상 과정에서 물리적인 현상을 오류없이 표현할 수 있어야 하며, 또한 음향 변수가 갖는 물리적인 의미를 보다 직관적으로 표현할 수 있어야 한다는 점이다. 이러한 관점에서 생각해보면, 표현하고자 하는 물리량에 따라서 여러 가지 다른 사상 방법을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

2. 음향 인텐시티의 표현 방법

음향 인텐시티, 그 중에서도 평균적인 음향 에너지 전달량을 나타내는 능동 음향 인텐시티의 경우,

그림 1과 같은 화살표로 사상하여 표현하는 것이 일반적이다. 그러나, 화살표로 표현하는 그림은 단지 인텐시티의 방향과 크기만을 표현할 수 있을 뿐, 음압이나 입자속도, 음향 어드미턴스와 같은 관련 물리량들은 별도의 그림으로 표현해야 하는 단점이 있다. 특히, 능동 음향 인텐시티와 이들 물리량은 서로 밀접하게 연관되어 있는 만큼, 이들을 통합적으로 표현할 수 있는 방법론이 필요하다

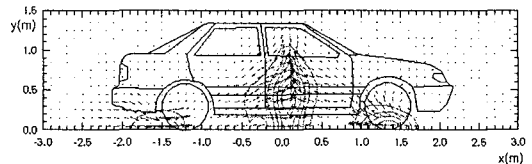


Fig. 1 Example of arrow plot (Intensity field of tire noise during pass-by test).

2.1 기본 이론

이러한 목적을 달성하기 위해서, 먼저 물리량들 사이의 관계를 살펴보고자 하자. 먼저 음압과 입자속도는 다음과 같이 복소 함수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$p(\vec{r}, t) = P(\vec{r})e^{-j\omega t} \quad (1)$$

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{U}(\vec{r})e^{-j\omega t} \quad (2)$$

여기서, $P(\vec{r})$ 과 $\vec{U}(\vec{r})$ 은 위치 \vec{r} 에서의 음압과 입자 속도의 복소 크기(complex magnitude)를 나타낸다. 잘 알려진 바와 같이, 시간 평균 음향 인텐시티인 능동 음향 인텐시티($\vec{I}_a(\vec{r})$)는 음압과 입자 속도를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다 (예를 들면 (1)참조).

† 한국과학기술원 소음 및 진동제어 연구센터
E-mail : jwoo@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8211

* 한국과학기술원 소음 및 진동제어 연구센터

$$\bar{I}_a(\vec{r}) = \frac{1}{2} \text{Re} [P(\vec{r}) \bar{U}(\vec{r})^*] \quad (3)$$

여기서, 음압의 복소 크기를 다시 다음과 같이 그 절대 크기 ($A(\vec{r})$) 및 위상 ($\phi(\vec{r})$)으로 표현하자.

$$P(\vec{r}) = A(\vec{r}) e^{j\phi(\vec{r})} \quad (4)$$

식 (1), (2), (4)와 오일러 방정식

$$-\frac{\nabla p}{\rho_0} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (5)$$

으로부터 입자 속도를 다음과 같은 두 가지 성분으로 나누어 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{U}(\vec{r}) &= \left(\frac{\nabla \phi}{\rho_0 \omega} P - j \frac{\nabla P}{\rho_0 \omega} \right) e^{j\phi(\vec{r})} \\ &= \bar{U}_{in}(\vec{r}) + \bar{U}_{out}(\vec{r}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\bar{U}_{in}(\vec{r})$ 은 음압과 동일한 위상 ($\phi(\vec{r})$)을 갖는 입자 속도 성분을 나타내며, $\bar{U}_{out}(\vec{r})$ 은 그에 수직한 위상을 갖는 속도 성분에 해당한다. 식 (6)을 이용하여 다시 식 (3)을 검토하면, 음압과 동일한 위상을 갖는 속도 성분만이 능동 음향 인텐시티에 영향을 미침을 알 수 있다.

$$\bar{I}_a(\vec{r}) = \frac{1}{2} |P(\vec{r})| |\bar{U}_{in}(\vec{r})| \quad (7)$$

2.2 새로운 음향 인텐시티 표현법

이와 같은 관계로부터, 능동 인텐시티와 음압의 크기, 그리고 음압과 동일한 위상을 갖는 입자 속도를 동시에 표현하는 아이디어를 얻을 수 있다. 즉, 그림 2의 좌측과 같이 밑변을 $|P(\vec{r})|$, 높이를 $|\bar{U}_{in}(\vec{r})|$ 로 갖는 삼각형을 표현하면, 그 삼각형의 면적은 식 (7)에 따라 능동 인텐시티의 크기를 나타내게 된다. 따라서, 음압의 변동 및 이에 따르는 입자 속도 변화의 크기를 동시에 관찰하여 자연스럽게 능동 인텐시티의 전파량을 나타낼 수 있다.

그림 3은 이러한 방법으로 차량의 측면에서 방

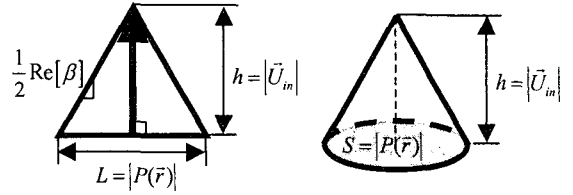


Fig. 2 Glyph(left) and cone(right) element for intensity field visualization

사되는 능동 음향 인텐시티를 도시한 예이다. 공간의 각 지점에서 비교해 보면, 같은 음압 크기 (밑변의 길이)를 갖더라도 어떤 지점에서는 음압과 동일한 위상의 속도 성분이 크게 발생되어 큰 능동 인텐시티가 전파하는 반면, 같은 음압 크기를 갖더라도 상대적으로 작은 능동 인텐시티를 갖는 지점도 존재함을 알 수 있다. 여기서, 삼각형의 기울기는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\frac{\bar{U}_{in}}{P/2} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\frac{\bar{U}}{P} \right] = \frac{1}{2} \text{Re} [\beta] \quad (8)$$

즉, 삼각형의 기울기는 입자 속도를 음압으로 나눈 값인 음향 어드미턴스의 실수부, 즉 음향 컨덕턴스(acoustic conductance)에 비례하는 물리적 의미를 지니고 있음을 알 수 있다.

제안된 방법은 서로 다른 물리량들을 면적 혹은 길이라는 하나의 시각 변수로 사상한 것으로, 오류없이 각각의 물리량을 표현하기 위해서는 그 척도를 그림에 함께 표시하여야 한다. 이를 위해, 그림 3의 우측과 같이 음향 컨덕턴스의 척도를 병기함으로써 서로 다른 물리량을 비교하는 오류를 방지할 수 있다. 또한 삼각형이 정삼각형 형태와 같은 비율로 나타날 경우, 그 전파 방향을 혼돈하기 쉬우므로, 중심축에 실선을 그려 전파 방향을 보다 명확하게 표현한다.

다음으로 3차원 공간에서 음향 인텐시티를 표현

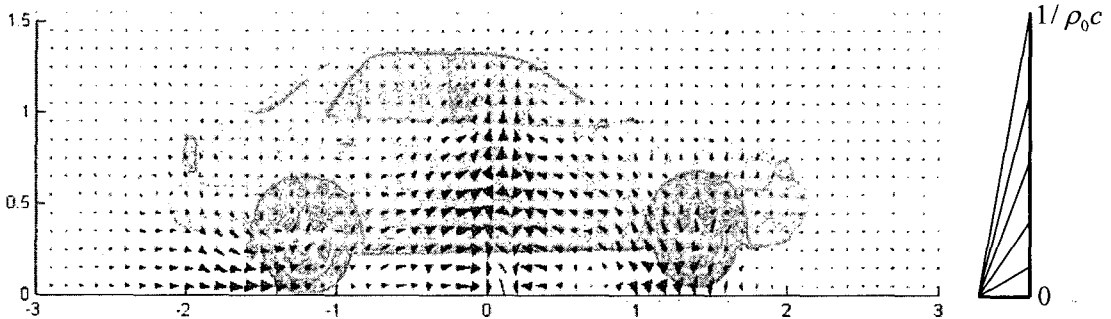


Fig. 3 Example of glyphs representation of intensity field (Tire noise radiation from a car)

하는 방법을 살펴보자. 3차원의 경우에는 2차원 도형인 삼각형보다 부피를 갖는 원추 형태(그림 2)로 나타내는 것이 보다 자연스럽다. 이러한 원추 형태는 흐르는 유체의 유량을 표현하거나 음향 인텐시티를 표현하는데 널리 이용되어 왔지만, 본고에서 제안하는 방법은 앞서 삼각형 표현과 마찬가지로 음압과 입자속도를 동시에 표현한다는 점에서 차이가 있다. 즉, 원추 바닥면의 면적이 음압의 크기를, 그리고 그 높이가 음압과 동일 위상을 갖는 속도의 크기를 나타내도록 표현한다. 이 경우 원추의 부피($Sh/3$)가 식 (7)과 같이 능동 인텐시티의 크기와 완전히 일치하지는 않으나, 모든 지점에서 동일한 비율로 비례하므로 오류 없이 능동 인텐시티를 표현 가능하다.

그림 4는 제안된 방법으로 3차원 공간상을 전파해 나가는 단극 음원의 능동 인텐시티를 표현한 것이다. 근접장에서는 그 반동(reactive)적인 특성으로 인해 음향 컨덕턴스가 비교적 작아 다소 둔탁한 형태의 원추 모양이 그려지지만, 원거리로 갈수록 resistive한 특성이 주로 나타나 원추들이 뾰족한 형태를 갖게 되는 것을 관찰할 수 있다.

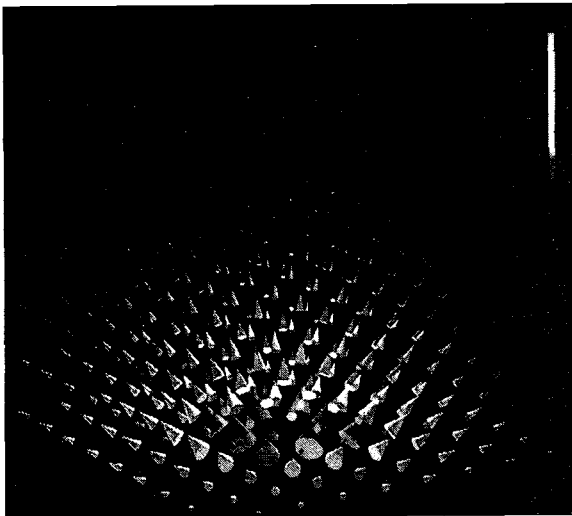


Fig. 4 Example of cone plot (Intensity field of a monopole source)

3. 3차원 음압의 표현 방법

음압을 색상의 변화로 표현하는 방법은 평면의 음압을 나타내는 데에는 매우 효율적이거나, 삼차원 음장을 표현하기에는 많은 어려움을 안고 있다. 대표적인 예가 그림 5와 같이 여러 단면의 형태로 음장을 표현하는 것인데, 이와 같은 경우 단면의 수직 방향으로 음압의 자세한 변화를 표현하려면

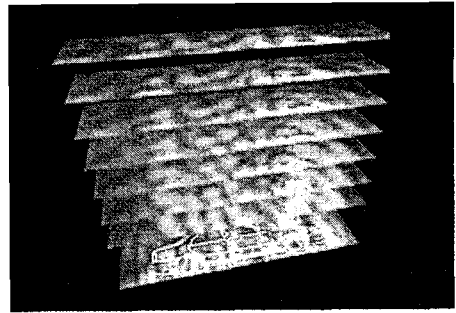


Fig. 5 Slice plot (Pressure field of tire noise)

많은 수의 단면들이 겹쳐져야 하므로 단면의 일부가 가려지거나, 단면에 수직인 방향으로 영상의 중횡비(縱橫比, aspect ratio)를 늘려야만 하는 단점이 있다. 따라서, 3차원 음장의 전체 구조를 가시화 하기 위하여, 새로운 시각변수를 도입할 필요가 있다.

3차원 음장을 투과하여 전체 구조를 파악하기에 알맞은 시각 변수로 물체의 투명도(transparency)를 들 수 있다. 물체의 투명도를 조절함으로써, 3차원 공간상의 어느 지점의 데이터도 파악이 가능할 것이기 때문이다. 실제적으로, 공간상에 다수의 단면을 그린 후 이들의 투명도를 조절하는 방식은 MRI나 CT 촬영 데이터를 가시화 하는 등의 의료 목적으로 널리 사용되어져 왔다(예를 들면, (2)). 이 방법이 갖는 문제점은 빛이 보다 다수의 평면을 투과하여 전달되는 중심부의 경우, 그 투명도가 저하되어 음압을 관찰하기 어려우며, 한 두 개의 평면만을 투과하는 외곽의 데이터일수록 투명하게 표현된다는 점이다.

이러한 문제점을 해결하는 방법은 음압의 크기에 비례하여 다른 투명도를 적용하는 것이다. 먼저, 다른 반경을 갖는 여러 개의 구면을 그림 6(a)와 같이 그리고, 음압값에 비례하는 α 값을 적용하여 그림 6(b)와 같은 결과를 얻는다.

그림 7은 음압의 크기에 반비례하는 투명도를 쌍극 음원이 방사하는 음장에 대해 적용한 예이다. 그림의 색상축에서, 가장 낮은 음압(0)을 갖는 데이터는 0의 α 값(투명)을 가지며, 가장 높은 음압을 갖는 데이터는 1의 α 값(불투명)을 갖는다. 보다 복잡한 사극 음원의 경우에 대해 적용한 예제가 그림 8에 표현되어 있다. 이와 같은 사상 방법은, 음압이 작을수록 희미하게 표현된다는 점에서 보다 직관적이며, 모든 방사체의 음압이 그 중심에서 거리가 멀어질수록 감소하므로 보다 다양한 음원의 경우에 대하여 무리 없이 적용할 수 있다는 장점이 있다.

결 론

보다 쉽게 그 물리적 의미를 이해할 수 있도록 각종 음향 변수들을 직관적으로 가시화 하는 방법에 대하여 논하였다. 음압의 크기를 원추의 바닥면의 면적, 그와 동일한 위상을 갖는 입자속도의 크기를 원추의 높이로 사상하여 능동 음향 인텐시티의 크기를 표현하는 방법을 제안하였다. 또한, 3차원 공간의 음장을 색상 변화와 투명도 변화를 통해 한눈에 파악하는 표현법을 제시하고, 간단한 음원에 대하여 그 효과를 살펴보았다.

후 기

본 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가지정연구실(NRL)사업과 교육부의 두뇌한국21 (BK21) 프로그램의 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다

참고문헌

- (1) F. J. Fahy, 1989, *Sound Intensity* (2nd edition, Elsevier Applied Science, London), p. 45.
- (2) J. Behr, M. Alexa, 2001, "Volume Visualization in VRML," in Proc. of ACM Web3D/ VRML 2001, pp. 23-28

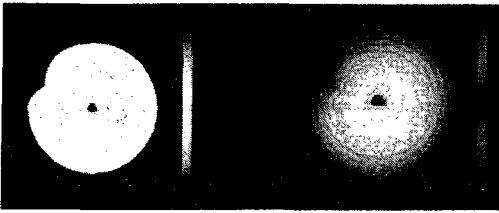


Fig. 6 Spherical slices of a pressure field (left) without transparency (right) with gradual transparency

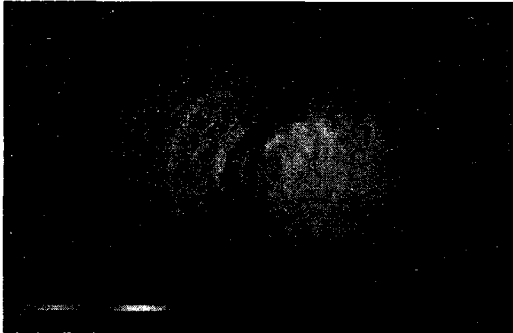


Fig. 7 Dipole radiation (pressure: linear scale)

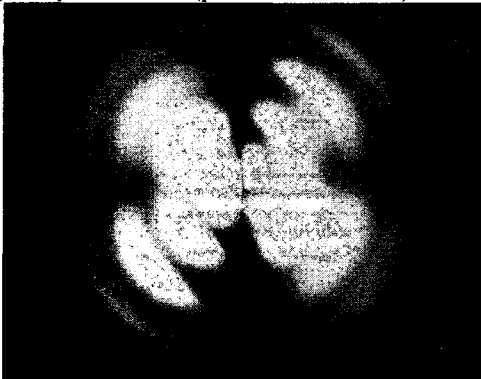


Fig. 8 Quadruple radiation (pressure: logscale)