

공간 상에 원하는 음장형상을 만드는 방법

How to make spatially focused sound shape: wavenumber spectrum matching

박진영† · 김양한*

Jin Young Park, Yang-Hann Kim

Key Words : 음장형상제어(sound shaping), 파수스펙트럼정합(wavenumber spectrum matching)

ABSTRACT

Sound focusing technologies has been studied for various purposes from early 1990s. As a result, these technologies make us possible to apply in many uses. For example, we can treat tumors using focused ultrasonic waves without surgical knife and communicate in the ocean using time reversal array. Also applications for personal audio system become issues. Recently, as technologies are developing, in some applications, needs for regional focusing become increasing because previously suggested focusing methods, such as phase conjugation, time reversal and inverse filtering, were all about a point focusing. Therefore, studies on regional focusing method are essentially needed. Regional focusing method was firstly mentioned by Choi and Kim in 2002: acoustic contrast control. However, in regional focusing, physical interpretations between control variables and results are still not easy because of its complexity. In this regard, we tried to understand the relations between control variables and results in wavenumber domain and suggested a solution method for regional focusing: wavenumber spectrum matching. We also showed how to make spatially focused sound shape using the suggested method from the simplest case: line focusing.

1. 서론

음향집적기술(Sound Focusing Technology)은 음향에너지를 원하는 공간에 집적시키는 기술이다. 이러한 음향집적기술은 1990년대 초, Dowling이 광학에서 많이 사용되어 왔던 위상 접합법(phase conjugation method)을 수중음향에 적용하고[1], Fink가 시간반전 음향기술(time reversal acoustics) 기술을 제안[2], 의료 초음파에 적용하면서 발전되기 시작하였다. 최근에는 음향집적기술을 이용한 다양한 적용 사례들이 제안되고 있으며, 실제로 수술 없이 인체 내부의 악성종양을 제거하는 고강도 초음파 집적술(HIFU: high intensity focused ultrasound)은 이미 상용화 되었으며, 사용자 개인에게만 잘 들리고 타인에게는 잘 들리지 않도록 하는 개인음향시스템(personal audio system)에 대한 다양한 기술들이 제안 및 개발되고 있다. 그러나 기존의 방법들은 특정 지점에 대한 음향집적 기술들이었으며, 최근 기술의 진보에 따라 특정 지점이 아닌 특정 영역에 대한 음향집적기술이 요구되고 있다.

영역에 대한 음향집적기술로는 음향빔대조제어(acoustic contrast control) 방법이 최와 김에

의해 처음 제안된 바 있다(2002) [3]. 이것은 음향학적으로 밝은 공간과 어두운 공간의 공간평균 음향위치에너지의 비를 최대로 만들어 줌으로써 음향 에너지를 원하는 영역에 집적하는 기술이다. 그러나 영역에 대한 음향집적기술을 적용하기 위해서는 여전히 가용한 제어변수와 그 제어효과에 대한 관한 연구들이 필요하다. 아울러 적용분야의 목적에 맞는 제어방법들에 대한 개발이 필요하다.

영역에 대한 음향집적기술에 대한 연구 접근 방법은 크게 두 가지로 생각해볼 수 있다. 하나는, 음향 시스템이 주어진 경우 제어 가능한 공간변수에 대한 연구이고, 다른 하나는, 제어하고자 하는 집적영역이 정해진 경우 요구되는 음향 시스템에 대한 연구이다.

음향빔대조제어의 경우 주어진 음향 시스템 하에서 정의된 문제이기 때문에 전자의 연구 접근 방법이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 새로운 접근 방법으로써, 제어하고자 하는 집적 영역(sound shape)이 주어질 때 필요한 음향시스템이 어떻게 갖추어져야 하는지에 대한 방법론으로 파수 스펙트럼 정합법(wavenumber spectrum matching)을 제안하고자 한다.

2. 문제 정의: 음장 형상 제어

2.1 음장 형상 (sound shape)

주어진 집적영역에 대한 구체적인 표현을 위해 먼저 음장 형상에 대해 정의하도록 한다. 음장

† 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과

소음 및 진동제어 연구센터(NOVIC)

E-mail : jypark1979@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

* 정희원, NOVIC, KAIST

형상이란, 음향에너지가 집적된 영역과 집적되지 않은 영역으로 이루어진 공간 상의 음압의 절대값 패턴으로 정의된다. 여기서 중요한 쟁점은 집적영역과 비집적영역을 구분 짓는 기준을 정하는 것이 될 것이다. 여러 가지 기준이 제안될 수 있겠지만, 본 논문에서는 음향에너지의 집적의 관점에서 최대음압을 기준으로 -6dB 가 되는 경계(6dB half pressure bandwidth)를 집적영역과 비집적 영역의 경계로 정의하도록 한다[4]. 또한 비집적 영역은 제어효과를 만족시키기 위해 최대음압 기준 -20dB 이하의 최대부엽준위(20dB peak sidelobe level)를 만족할 경우만 비집적 영역으로 정의하도록 한다.

2.2 음장 형상 제어(Sound shaping) 시스템

음장 형상 제어라는 것은 다수의 음원을 이용하여 공간상에 원하는 음장 형상을 만드는 것을 의미한다. 이를 위해서는 음장 형상 제어를 위한 시스템의 정의가 필요하며, 이를 통해 고려해야 할 제어변수들을 정의하도록 한다.

(1) 음장 형상 제어 시스템 정의

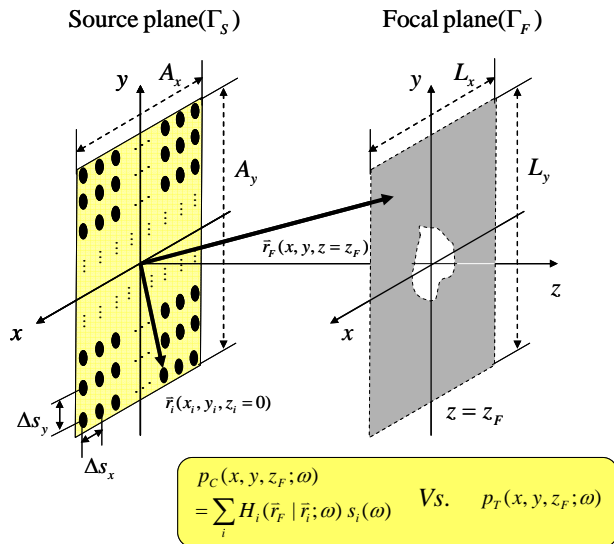


Figure 1. System configuration for sound shaping

Fig. 1 에서 보는 바와 같이, $A_x \times A_y$ 의 구경을 갖는 음원평면(source plane: Γ_S)과 음원평면으로부터 z_F 만큼의 거리에 떨어져 있고 $L_x \times L_y$ 의 구경을 갖는 집적평면(focal plane: Γ_F)을 생각해 보자. 음원평면에는 다수의 음원이 배열되어 있으며, 이때 음원의 종류에는 제한이 없는 것으로 가정한다.

음원평면에있는 다수의 음원들로 인해 집적평면에는 어떠한 음장이 만들어지게 될 것이다. 그 음장을 구현음장 (constructed field: $p_C(\vec{r}_F; \omega)$)이라 정의한다. 또한 원래 만들고자 하였던 음장의 형상을 목표음장형상(target sound shape : $p_T(\vec{r}_F; \omega)$)으로 정의한다. 결국 음장형상 제어는 구현음장의 형상을 목표음장형상과 최대한 유사하게 만드는 문제로 볼 수 있다.

(2) 음장 형상 제어에서 고려되어야 할 변수

음장 형상 제어에서 고려되어야 할 변수를 선정하는 기준은 적용분야 및 제어 목적에 따라 달라질 수 있다. 그러나 공통적으로 고려해야 할 변수들을 생각해볼 수 있다.

Fig. 1 에서 $H_i(\vec{r}_F | \vec{r}_i; \omega)$ 는 음원의 위치(\vec{r}_i)와 집적평면의 한 지점(\vec{r}_F) 사이의 관계를 표현해주는 전달함수로 정의된다. 이 전달함수에는 음원의 위치, 음원의 종류 및 형상에 대한 정보가 모두 포함되어 있다.

다음으로 고려되어야 할 변수들로는 음원배열의 구경(A_x, A_y)과 음원 사이의 간격($\Delta s_x, \Delta s_y$)이다. 음원배열의 구경은 집적영역의 폭 및 크기, 그리고 집적평면의 거리(z_F)와 관련된 변수이며, 음원 사이의 간격은 집적평면의 구경(L_x, L_y)과 관련된 변수라 할 수 있다.

마지막으로 고려되어야 할 변수는 음원으로 들어가는 입력신호($s_i(\omega)$)이다(Fig. 1). 그러나 이 변수는 최적해를 구하는 과정 속에서 전술된 제어변수들의 영향이 모두 고려된 경우 도출되는 종속변수이다. 따라서 최적해를 도출하는 방법을 정할 필요가 있다. 본 논문에서는 구현음장의 형상과 목표음장형상의 오차의 제곱의 평균을 최소화 하는 해인 최소자승해(least mean square solution)를 입력신호로 사용하도록 한다. 수학적으로 평균자승오차(MSE : mean square error)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$MSE = \frac{1}{L_x L_y} \int \| p_C(\vec{r}_F) - p_T(\vec{r}_F) \|^2 d\vec{r}_F \quad (1)$$

$$p_C(\vec{r}_F) = \sum_i H_i(\vec{r}_F | \vec{r}_i) s_i \quad (2)$$

3. 음장 형상 제어 방법론: 파수스펙트럼 정합(wavenumber spectrum matching)

3.1 공간영역과 파수영역의 관계

공간영역과 파수영역 사이는 공간 푸리에 변환을 통해서 연결되어있다. 유한한 영역에 대한 공간 푸리에 변환은 아래와 같이 정의된다.

$$\hat{p}(k_{x,m}, k_{y,n}) = \frac{1}{L_x L_y} \int \int p(x, y) e^{-j(k_{x,m}x + k_{y,n}y)} dx dy \quad (3)$$

$$(k_{x,m} = m\pi/L_x, k_{y,n} = n\pi/L_y)$$

$$MSE = \|\hat{H}(k_{x,m}, k_{y,n}, z_F | \bar{r}_i) s_i - \hat{p}_T(k_{x,m}, k_{y,n}, z_F)\|^2 \quad (4)$$

푸리에 변환은 선형변환이고, 또 역변환이 존재하기 때문에 공간영역과 파수영역 사이에는 일대일 대응 관계가 있다. 즉, 어떤 두 음장이 파수영역에서 같은 스펙트럼을 같으면, 공간영역에서도 같은 것이다. 식(1)에서 정의된 공간상의 평균자승오차 역시 파수영역에서의 평균자승오차와 동일하고(식(4)), 결국 파수영역에서 도출되는 해와 공간영역에서 도출되는 해가 동일하다. 따라서 본 논문에서는 파수영역을 통해 제어변수와 제어결과와의 관계를 고찰 하고자 한다. 파수영역에서의 음장형상제어를 위해서 파수영역에서 접근하는 이유는 파수영역을 통한 제어변수에 대한 물리적 해석이 공간영역에서보다 쉽기 때문이다.

3.2 파수스펙트럼정합(wavenumber spectrum matching)

파수스펙트럼정합은 구현음장의 형상과 목표음장형상의 파수영역에서의 스펙트럼을 동일하게 맞추므로 공간 상에서 음장형상을 제어하는 것을 의미한다. 따라서 중요한 것은 목표음장형상의 파수 성분들을 구현음장을 구성하는 음원들이 충분히 공급해 줄 수 있는 음향형상 제어시스템을 설계하는 것이 된다. 음원에 의해서 만들어지는 공간상의 음장은 파수영역에서 주요한 스펙트럼 성분들로 표현되는 경우가 많다. 평면파의 경우, 파수영역에서 델타함수로 표현되는 것이 좋은 예일 것이다. 따라서 음원의 위치 및 방사특성에 따라 목표음장형상에서 요구되는 파수성분을 제공할 수 있는 물리적 상황을 파수스펙트럼을 관찰함으로써

찾을 수 있다.

4. 파수스펙트럼정합을 이용한 음장형상 제어

제어변수와 제어결과의 상관성을 고찰하기 위해 가장 간단한 경우인 선음원배열(line array), 선음장형상제어(line sound shaping)의 경우를 통해서 살펴보도록 한다.

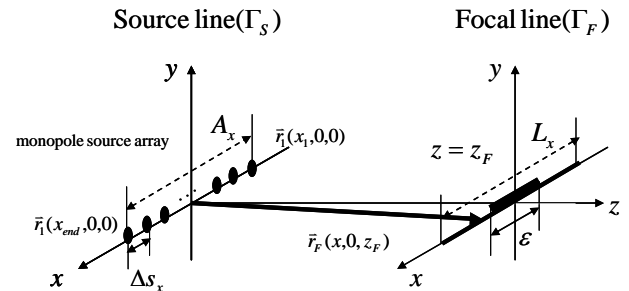


Figure 2. System configuration for line focusing ($L_x = 1m$, $\epsilon = 0.2m$, $z_F = 1m$, $\lambda = 0.1m$)

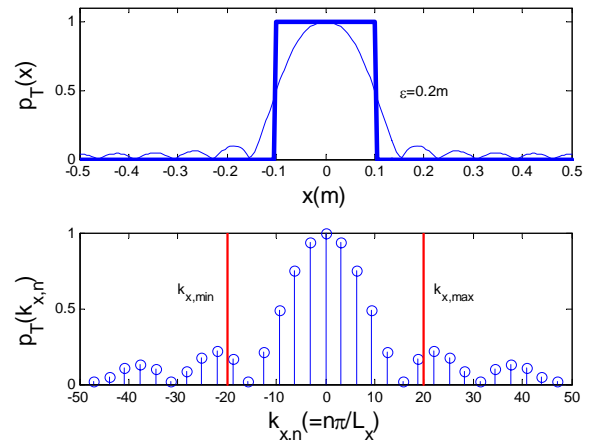


Figure 3. Target sound shape(top) and its wavenumber spectrum(bottom)

Fig. 2 와 같이 음장형상제어를 위한 시스템을 생각해보자. 사용음원은 단극 음원이며, 목표음장형상과 그것의 파수스펙트럼은 Fig. 3 과 같이 나타난다. Fig. 2 에서 $k_{x,max\ or\ min}$ 는 앞서 정의한 음장형상의 조건에 만족하기 위해 필요한 파수성분의 최대값(혹은, 최소값)을 의미한다.

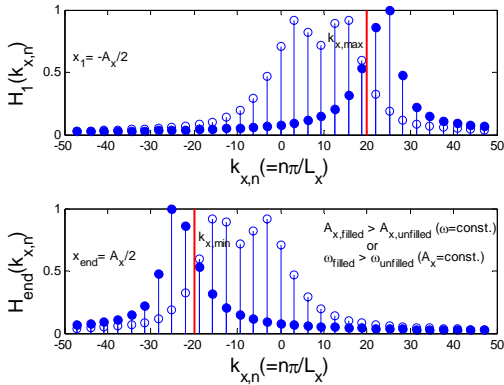


Figure 4. Wavenumber spectrum of the 1st source(top) and the last source(bottom) for different array aperture sizes and different frequencies.

Fig. 4 에서 볼 수 있듯이, 음원 어레이의 각 최 끝단에 있는 음원들의 파수 스펙트럼은 음장형상 제어 시스템이 공급할 수 있는 최대, 최소 파수성분을 결정한다. 따라서 Fig. 3 의 $k_{x,max\ or\ min}$ 의 파수성분까지 공급이 가능하도록 배열 음원의 구경을 정할 수 있다. 이 경우 필요한 배열 음원의 구경은 2.4m 이며, 음원은 0.15m 등 간격으로 17 개의 음원을 사용하면 Fig. 5(top)에서 보는 것과 같이 원하는 제어 효과를 얻을 수 있다. 이 시스템으로 집적폭(ϵ)이 0.4m 가 되는 경우까지 집적할 수 있는데(Fig. 5(bottom)), 이것은 집적 폭이 넓어질수록 필요한 파수 성분의 폭 ($|k_{x,max} - k_{x,min}|$)이 좁아지기 때문에 가능한 것이다.

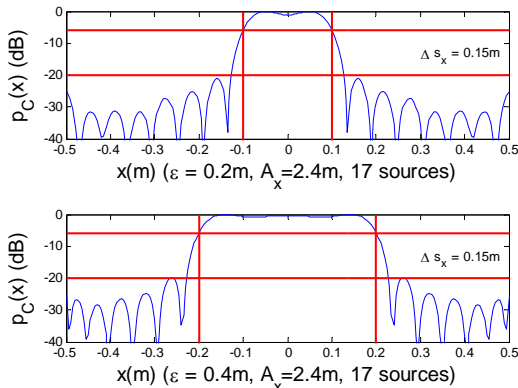


Figure 5. Results of sound shaping with respect to focal width(ϵ)

Fig. 6(top) 는 제어하고자 하는 전체관심공간의 구경(L_x)이 두 배로 커진 경우, 제안된 시스템에 대한 제어결과를 보여준다. 원하는 제어결과가 나오지 않은 것은 음원의 개수를 증가시킴(동일 구

경에 27 개의 음원)으로써 원하는 제어효과를 얻을 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 전체 관심공간의 증가가 파수영역에서의 해상도를 높이기 때문이다($\Delta k_x (= \pi / L_x)$ 의 감소). 따라서 좀더 정밀하게 파수성분들을 정합시키기 위해 음원의 개수가 필요한 것이다.

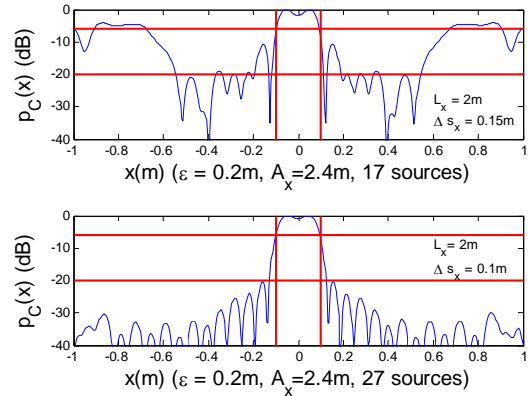


Figure 6. Results of sound shaping when aperture size of zone of interest becomes double. We can learn the number of sources is needed for enlarging L_x .

5. 결론

영역에 대한 집적공간을 형성하기 위해서는 제어 가능한 변수와 그로 인해 나타나는 음장 사이의 관계를 알아야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 파수영역에서의 접근을 통해 그 관계들을 고찰하였으며, 주어진 음장형상이 있을 때 요구되는 음장형상제어 시스템을 결정하는 방법으로 파수영역 정합법을 제안하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)의 국가지정연구실(NRL) 사업(과학기술부지원: M1050000112-05J0000-11210)과 교육인적자원부의 두뇌한국 21(BK21) 프로그램의 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Darrell R. Jackson and David R. Dowling, "Phase conjugation in underwater acoustics," J. Acoust. Soc. Am. 89(1), 1991.
- (2) Mathias Fink, "Time reversal of Ultrasonic Fields-Part I: Basic Principles," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 39(5), 567-578, 1992.
- (3) J.-W. Choi and Y.-H. Kim, "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources," J. Acoust. Soc. Am. 111(4), 1695-1700, 2002
- (4) Gao Kun and Mingxi Wan, "Effects Of Fascia Lata On HIFU Lesioning in Vitro," Ultrasound in Med. & Biol., Vol. 30, No. 7, pp. 991-998, 2004