

스피커 어레이를 이용한 개인용 모니터와 TV 오디오 시스템

Personal monitor & TV audio system by using speaker array

이찬희†·장지호*·박진영·김양한

Chan-Hui Lee, Ji-Ho Chang, Jin-Young Park, Yang-Hann Kim

Key Words : Acoustic contrast(음향 밝기대조), Speaker array(스피커 어레이), Spatial variables(공간 변수), Genetic algorithms(유전 알고리즘).

ABSTRACT

With development of high display quality of TV and Monitor, personal audio system is arising great interest. In this study, we applied a method to make a good bright zone around the user and dark zone to other region by maximizing the ratio of sound energy between the bright and dark zone. We have attempted to use a line speaker array system to localize the sound in our listening zone. It depends on the size of the zone and array parameters, for example, array size, speaker spacing, wave length of sound.

1. 서론

최근 Wide TV 나 모니터의 개발과 함께 이들로 부터 재생되는 소리를 사용자 개인에게만 집중시키는 음향 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 관련된 연구로 다수의 음원을 제어하여 한 공간에서 사용자가 원하는 영역에서는 소리가 잘 들리게 하고(bright zone), 동시에 원하지 않는 공간에서는 소리가 잘 들리지 않게 하는(dark zone) 방법이 연구되었으며, ⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 밝은 공간(bright zone)과 어두운 공간(dark zone)의 음향 포텐셜 에너지의 비를 최대화함으로써 그 해결책을 제시하였다.

본 연구에서는 그 실제적인 예로 모니터나 TV 에 쉽게 적용할 수 있는 스피커 어레이 시스템을 선택하여 Fig-1 과 같이 사용자 주위에 음향학적 밝은 공간을 형성하고 그 외 공간에 어두운 공간을 형성함으로써 그 효과를 살펴보았다.

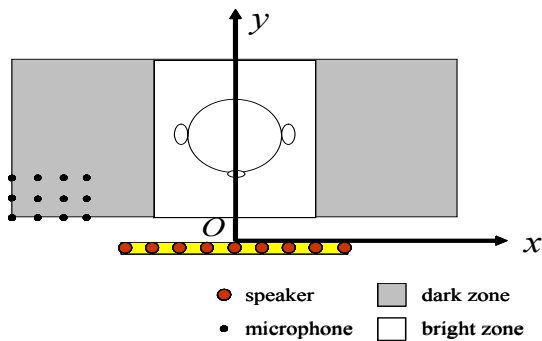


Fig-1 Definition of the control zone

2. 음원 어레이 이용한 음향 밝기대조

2.1 문제의 정의

다음 Fig-2 와 같이 N 개의 음원이 크기가 L_a 인 라인 어레이(Line array) 형태로 배열된 경우를 생각해 보자.

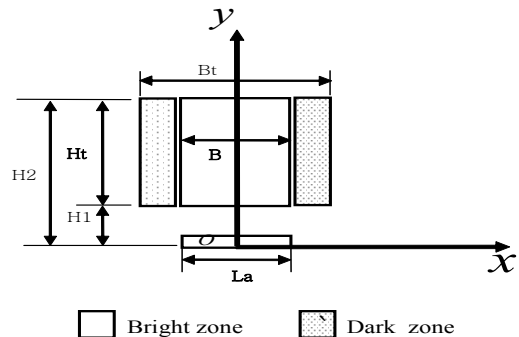


Fig-2 Definition of bright zone and dark zone & spatial variables

음원의 배치와 관심공간은 음원 어레이의 구경 (L_a), 밝은 공간의 가로 폭(B), 밝은 공간의 세로 폭(H_t), 전체 관심공간의 가로 폭(B_t) 그리고 음원과 밝은 공간의 거리(H_1)를 이용하여 표현하였으며, 이를 공간 변수(spatial variable)로 정의하였다.

밝은 공간과 어두운 공간을 형성하는 방법으로 두 공간의 평균 음향 포텐셜 에너지 밀도의 비를 고려할 수 있으며, 이를 음향 밝기대조(acoustic contrast)로 정의하였다⁽¹⁾.

밝은 공간과 어두운 공간은 음향 밝기대조를 최대화함으로써 형성 가능하며, 결국 음향 밝기대조를 최대화시키는 각 음원의 최적해를 구하는 문제로 정의할 수 있다.

음향 밝기 대조 제어에 의한 제어결과를 살펴

† 교신저자; 한국과학기술원 소음진동제어센터
E-mail : chance99@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3064, Fax : (042) 869-8220

* 한국과학기술원 소음진동제어센터

보기 위해서는 밝은 공간의 폭(또는 main lobe 의 폭)을 측정할 인자가 필요하다. 이에 Fig-3 과 같이 밝은 공간의 폭을 표현할 인자로써 중심축으로부터 특정 반경 R 에 대해 beam pattern 을 측정하여 특정 음압 레벨만큼 낮은 위치를 나타내는 각도를 drop angle 로 정의하였다. drop angle 이 크다는 것은 밝은 공간이 넓게 형성되었다는 것을 의미하며, 반대로 drop angle 이 작다는 것은 밝은 공간이 보다 좁게 형성되었다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 중심축의 음압으로부터 비해 20dB 낮은 두 지점의 drop angle 을 고려하여 밝은 공간에 형성된 main lobe 의 폭을 살펴보았다.

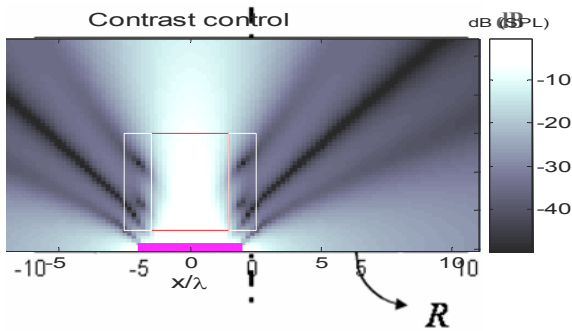
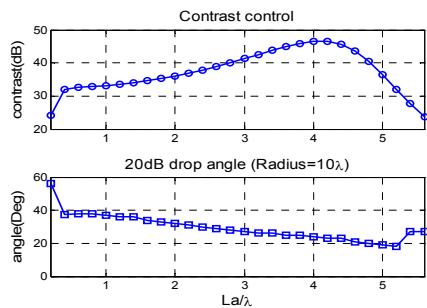


Fig-3 Drop angle to appraise the width of bright zone

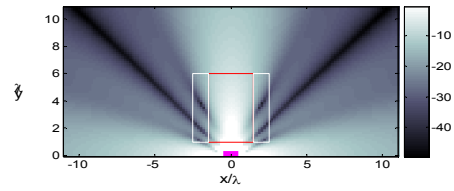
2.2 공간 변수들의 영향

음원의 배치와 관심공간은 공간 변수에 의해 표현되며, 각 공간 변수의 변화가 음향 밝기대조 제어 결과에 미치는 영향을 살펴보았다.

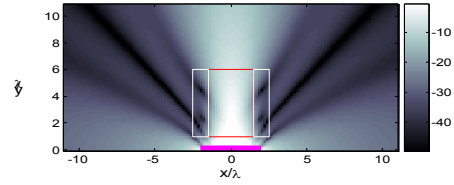
이를 위해 음원 어레이를 7 개의 단극음원으로 이루어진 경우로 가정하고 각 공간 변수의 크기를 파장의 길이에 대해 무차원화하여, $La=3\lambda$, $B=3\lambda$, $Bt=5\lambda$, $Hl=1\lambda$, $Ht=5\lambda$ 를 비교기준으로 각 공간 변수의 영향을 살펴보았다.



(a) Contrast and 20dB drop angle



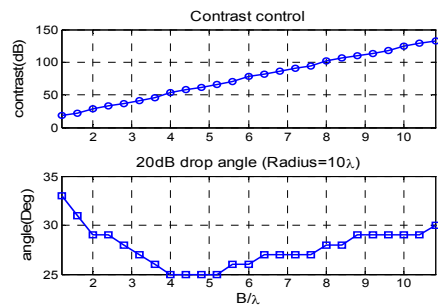
(b) $La=1\lambda$



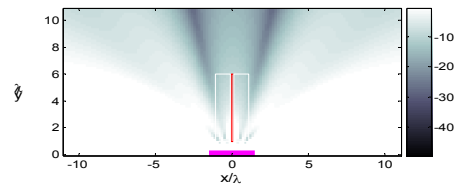
(c) $La=4\lambda$

Fig-4 The effect of source array size (La)

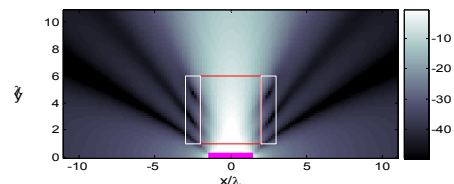
음원 어레이의 구경(La)의 변화는 음원 간격의 변화를 의미한다. $La=4\lambda$ 부근에서 음향 밝기대조가 가장 크게 나타났으며, 20dB drop angle 역시 작게 나타났다. 그리고 F-g-4 (b), (c)에서 알 수 있듯이 음향 밝기대조의 값이 크다는 것은 side lobe 들을 보다 작게 제어된다는 것을 의미한다.



(a) Contrast and 20dB drop angle



(b) $B=0.2\lambda$

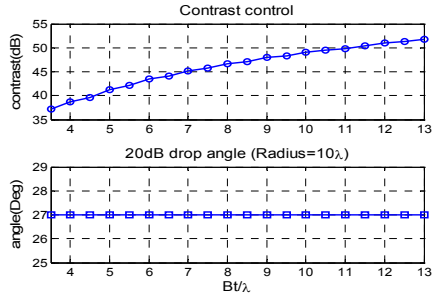


(c) $B=4\lambda$

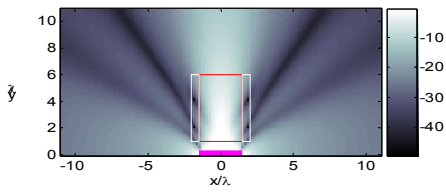
Fig-5 The effect of bright zone width (B)

밝은 공간의 가로 폭(B)의 크기가 증가할수록 음향 밝기대조는 증가하는 경향을 보였으며, 20dB

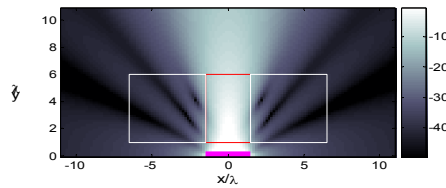
drop angle 은 $B=5\lambda$ 부근에서 가장 작은 값을 나타내었다.



(a) Contrast and 20dB drop angle



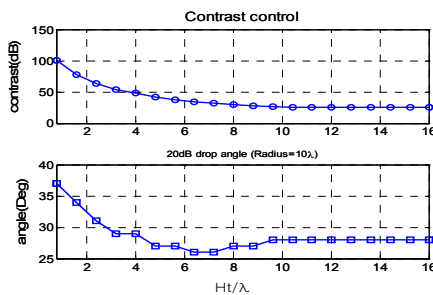
(b) $B=0.2\lambda$



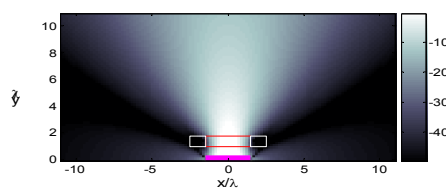
(c) $Bt=13\lambda$

Fig-6 The effect of Total zone width (Bt)

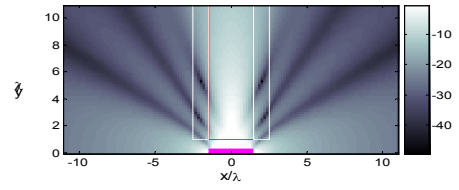
전체 관심공간의 가로 폭(Bt)은 그 크기가 증가할수록 음향 밝기대조는 증가하는 경향을 보였으나, 20dB drop angle 은 변화를 보이지 않았다.



(a) Contrast and 20dB drop angle



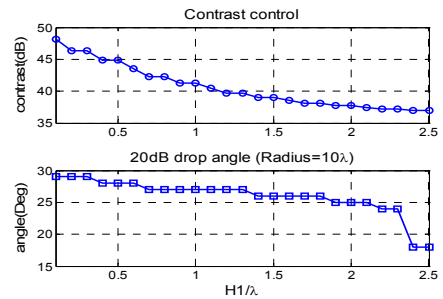
(b) $Ht=0.8\lambda$



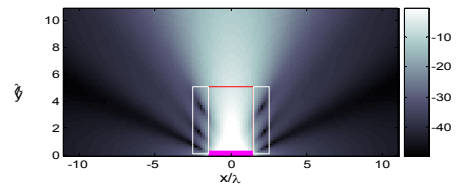
(c) $Ht=10\lambda$

Fig-7 The effect of bright zone height (Ht)

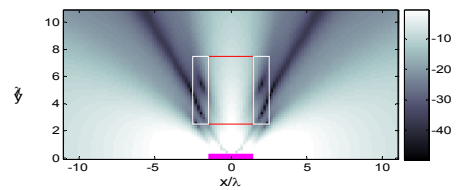
밝은 공간의 세로 폭(Ht)은 그 크기가 증가할수록 음향 밝기대조와 20dB drop angle 모두 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며, side lobe 의 개수와 크기의 증가를 보였다.



(a) Contrast and 20dB drop angle



(b) $H1=0.1\lambda$



(c) $H1=2.5\lambda$

Fig-8 The effect of distance between source array and bright zone ($H1$)

음원과 밝은 공간의 거리($H1$)의 경우 그 크기가 증가할수록 음향 밝기대조와 20dB drop angle 모두 전체적으로 감소하는 경향을 보였으나, Fig-8 (c)에서 확인할 수 있듯이 $H1$ 이 증가함에 따라 음원 아래와 관심공간 사이에 형성된 side lobe 의 크기가 증가하였다. 이처럼 각 공간 변수들은 음향 밝기대조 제어에 비선형적으로 기여하는 경향을 나타냈으며, 이는 각 공간 변수들의 크기를 다양

하게 고려함으로써 보다 효과적인 제어 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

3. 최적의 공간 변수 크기 조합

3.1 최적의 공간 변수 크기 조합 문제의 정의

음향 밝기대조가 클수록, 그리고 20dB drop angle 이 사람의 두상 쪽에 근접할수록 밝은 공간과 어두운 공간을 보다 효과적으로 형성할 수 있다. 음원 어레이로부터 0.4m 의 거리에 청취자의 두상이 위치하고 그 두상의 폭이 0.3m 내에 포함된 경우를 가정하면, 20dB drop angle 은 약 20° 가 된다. 또한 음향 밝기대조를 제약조건으로 사용하기 위해 음압 레벨 (SPL) 차이에 대한 청음자의 주관적인 청음 특성⁽⁵⁾을 고려하여 음향 밝기대조가 최소한 40dB 가 넘도록 제어하고자 하는 경우, 이는 다음과 같은 최소화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f = |\theta(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) - 20| \\ \text{Subject to} \quad & g_1 : 40 \leq \text{Contrast}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \quad (1) \\ & \text{where } x_1 = La/\lambda, \quad x_2 = B/\lambda, \quad x_3 = Bt/\lambda, \\ & \quad \quad \quad x_4 = Ht/\lambda, \quad x_5 = H1/\lambda \end{aligned}$$

3.2 유전자 알고리즘(GA's)을 이용한 최적의 공간 변수 크기 조합

유전 알고리즘은 제약조건이 있는 경우 이를 표현하기가 쉽지 않다. 이를 해결하기 위해 벌칙함수방법(penalty function method)를 적용하여 식(1)의 제약조건을 처리하였으며, 공간 변수들의 경향을 고려하여,

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f = |\theta(\mathbf{x}) - \theta_0| + r_k [\max(0, g_1(\mathbf{x}))]^2 \quad (2) \\ \text{where} \quad & \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3), \quad x_1 = La/\lambda, \quad x_2 = B/\lambda, \quad x_3 = Ht/\lambda \\ & \theta_0 = 20^\circ, \quad g_1(\mathbf{x}) = 40 - \text{Contrast}(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

와 같이 간단히 표현할 수 있다. 여기서 r_k 는 벌칙인자를 의미한다. 위 식 (2)에 유전 알고리즘을 적용하여 구한 최적의 공간 변수 조합은 다음과 같다.

Table 1 Optimization result By GA's

| | |
|-----------------|---------------------------------|
| 최적화 수행 조건 | 총 세대 : 100, 세대별 개체 : 100 |
| 최적의 공간 변수 | x1=4.0616, x2=4.0879, x3=6.8802 |
| Contrast (dB) | 55.0 dB |
| 20dB drop angle | 20° |

유전 알고리즘을 통해 얻은 최적의 공간 변수 크기 조합을 반영한 최적해는 제약조건을 모두 만족하였으며 결과 음장은 다음과 같다.

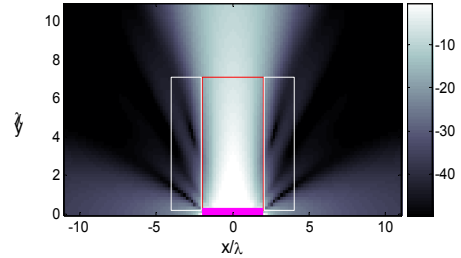
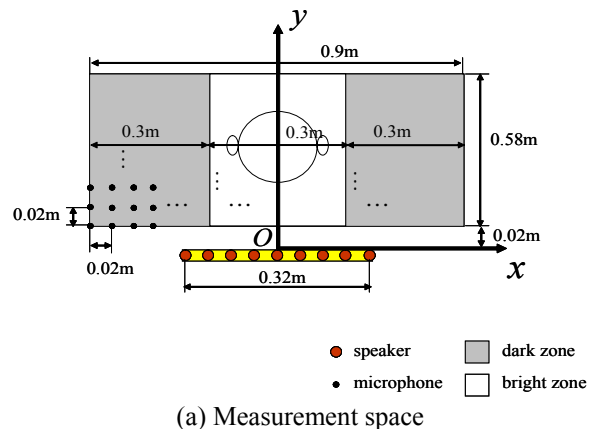


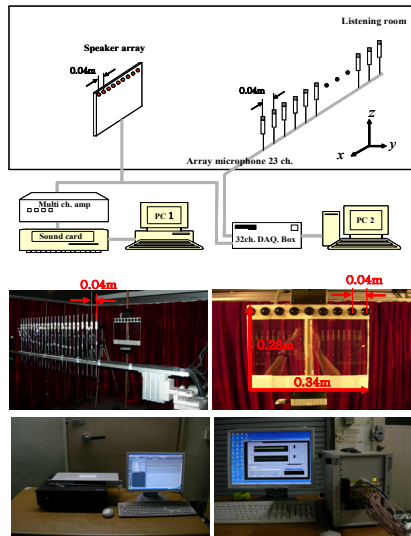
Fig-9 Controlled sound field by Optimized spatial variables

4. 실험 및 결과

4.1 실험환경 및 실험장치

실험은 한국과학기술원 소음 및 진동제어센터에 구성된 청음실(Listening room)에서 수행하였다. 1 열의 어레이 형태로 17" 모니터 크기의 아크릴(두께 10mm, 가로 330mm, 세로 275mm)에 9 개의 스피커를 등간격으로 배치하여 고정시켰으며, 관심 주파수는 800Hz, 2kHz, 3kHz 의 세 가지의 주파수를 선정하였다. 음장 측정시 공간 분해능을 결정하는 마이크로폰 사이의 간격은 파장이 가장 짧은 관심주파수인 3kHz 의 파장 0.1143m 를 고려하여 한 파장 당 최소한 5 개의 측정점이 위치하도록 0.02m 로 계측하여, 관심 주파수에서 충분한 공간 샘플링이 가능토록 하였다. 측정 공간은 스피커 어레이의 중심으로부터 0.1m 떨어진 가로 0.9m, 세로 0.58m 의 직사각형 평면으로 선정하였다.





(b) Experimental set-up

(2007. 7.25, KAIST, Listening room)

Fig-10 Measurement space & experimental set-up

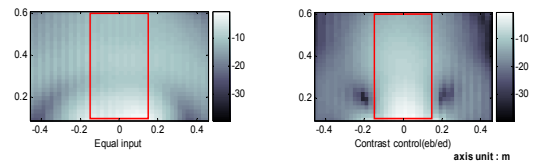
4.2 실험결과 및 고찰

이론적인 해석에서는 음원을 단극음원으로 가정하였으나 실제 시스템에서 음원으로 사용되는 스피커를 단극음원으로 취급하기 어렵고 스피커를 단극음원으로 가정한다 해도 체적속도를 직접 제어한다는 것은 계측상의 문제를 포함하여 어려운 점이 많다. 이러한 이유로 입력변수로 신호발생기의 출력신호를 선택하였다. 그리고 입력신호와 마이크로폰에서 측정된 신호 사이의 전달함수를 계측하여 음향밝기 대조 제어를 수행하였다.

실제 시스템에서는 스피커 어레이의 크기(L_a)는 0.32m 로 고정되었으며, 음원 어레이와 밝은 공간의 거리(H_1)은 근접장의 영향을 배제하기 위해 0.1m 로 선택하였다. 그리고 전체 관심공간의 가로 폭(H_t)는 0.9m 로 선정하였다. 그리고 20dB drop angle 을 측정하는 반경은 0.4m 로 선정하였다.

(1) 반복 실험에 의해 결정된 공간 변수를 반영한 음향 밝기 대조 제어 결과

제어하지 않은 경우와 비교하기 위해 각 음원에 동일한 크기와 위상의 입력 신호를 적용한 경우와 비교하였다. 반복 실험에 의해 결정된 공간 변수를 반영하여 음향 밝기 대조 제어를 적용한 결과 제어하지 않은 경우에 비해 contrast(dB) 차가 800Hz 인 경우 10.7dB, 2kHz 의 경우 8.8dB 그리고 3kHz 의 경우 13.9dB 로 상당히 개선되었으며, 결과 음장에서도 밝은 공간과 어두운 공간을 확연히 구분할 수 있다.

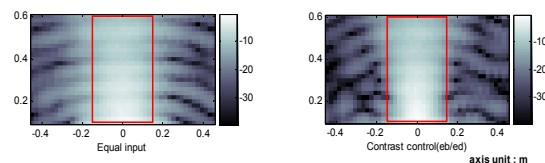


(a) Equal input (left) & controlled input (right)

| | Equal input | Contrast control |
|--------------|-------------|------------------|
| Contrast(dB) | 26.3 | 37 |

(b) Contrast

Fig-11 Controlled result (Case : 800Hz)

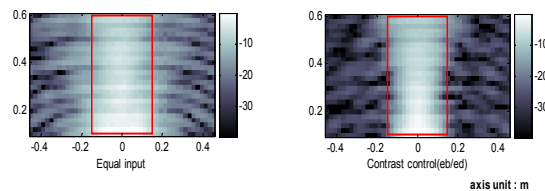


(a) Equal input (left) & controlled input (right)

| | Equal input | Contrast Control |
|--------------|-------------|------------------|
| Contrast(dB) | 37.8 | 46.6 |

(b) Contrast

Fig-12 Controlled result (Case : 2kHz)



(a) Equal input (left) & controlled input (right)

| | Equal input | Contrast Control |
|--------------|-------------|------------------|
| Contrast(dB) | 39.5 | 53.4 |

(b) Contrast

Fig-13 Controlled result (Case : 3kHz)

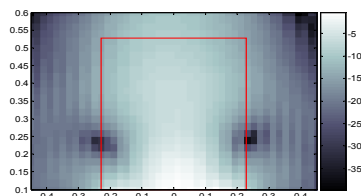
(2) 공간 변수들의 조합을 최적화한 후 음향 밝기 대조 제어 결과

결과를 비교하기 위해 반복 실험에 의해 결정된 공간 변수를 반영한 경우와 공간 변수들의 조합을 최적화한 후 음향 밝기대조 제어를 적용한 경우의 결과를 비교하였다. 음향 밝기대조는 공간 변수들을 최적화한 후 음향 밝기대조 제어를 적용한 경우가 반복 실험에 의해 결정된 공간변수를 반영하여 음향 밝기대조 제어를 적용한 경우에 비해 contrast(dB) 차가 800Hz 의 경우 3.2dB, 2kHz 의 경우 0.3dB 그리고 3kHz 의 경우

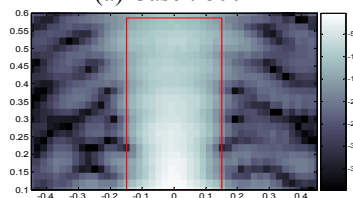
4.6dB 만큼 개선되었다. 그리고 20dB drop angle 의 경우에는 2kHz 의 경우에 1.5° 개선 되었으며, 3kHz 의 경우 변함이 없었다. 800Hz 의 경우 20dB drop angle 이 형성되지 않아 10dB drop angle 을 측정 한 결과 음향 밝기대조 제어만 적용한 경우 40.5° 였으나, 공간 변수의 크기 조합을 최적화한 후 음향 밝기대조를 적용한 경우 38.5° 로 훨씬 개선된 결과를 나타내었다.

Table 2 controlled results under optimization of spatial variables

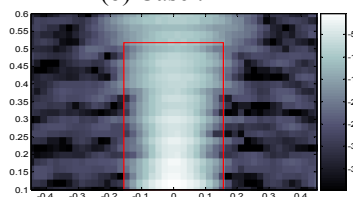
| | Acoustic contrast controlled by arbitrary spatial variables | | | Acoustic contrast controlled under optimization of spatial variables | | |
|-----------------|---|------|-------|--|-------|-------|
| | 800Hz | 2kHz | 3 kHz | 800Hz | 2kHz | 3 kHz |
| Contrast (dB) | 37 | 46.6 | 53.4 | 40.2 | 46.9 | 58.0 |
| 20dB drop angle | Not exist | 33° | 23° | Not exist | 31.5° | 23° |



(a) Case : 800Hz



(b) Case : 2kHz



(c) Case : 3kHz

Fig-14 Controlled result under optimization of spatial variable

5. 결 론

다수 음원을 제어하여 한 공간에서 사용자가 원하는 영역에서는 소리가 잘 들리게 하고(bright zone), 동시에 원하지 않는 공간에서는 소리가 잘 들리지 않게 하여(dark zone), 소리를 사용자 개인에게만 집중시키는 음향 시스템을 구현하기 위해 방법인 음향 밝기대조 제어를 적용하였다.

그 실제적인 예로 스피커 어레이 시스템을 선택하여 Fig-10 과 같이 사용자 주위에 음향학적 밝은 공간과 그 외 공간에 어두운 공간을 정의하고 선택한 세가지 주파수 800Hz, 2kHz, 3kHz 에 대하여 음향 밝기대조 제어를 적용한 결과 효과적으로 사용자에게 소리를 집중시킬 수 있음을 확인하였다(fig-11, 12, 13).

이와 함께 유전자 알고리즘을 이용한 최적화된 공간변수를 반영하여 음향 밝기 대조 제어를 수행하였으며, 이를 통해 반복실험에 의해 결정된 공간 변수를 반영한 경우에 비해 훨씬 제어 결과를 훨씬 개선하였다.(Table 2, Fig-14).

후 기

본 연구는 교육부의 두뇌한국 21(BK21) 프로그램의 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) J.-W. Choi, Y.-H. Kim, 2002, "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources", J. Acoust. Soc. Am., 111, 1695-1700.
- (2) J.-W. Choi, Y.-H. Kim, 2004, "A method to manipulation sound power within a selected region using source array", KSNVE Spring Annual Conference, pp. 278-281.
- (3) J.-W. Choi, Y.-H. Kim, 2004, "Manipulation of sound intensity within a selected region using multiple sources", J. Acoust. Soc. Am., 116.
- (4) Fuller, C. R., Elliot, S.J. & Nelson, P.A., 1996, Active Control of Vibration, Academic Press Limited
- (5) Scott D. Snyder, 2000. Active noise control primer, Springer-verlag, pp. 7-44.
- (6) S. E. Wright & B. Vuksanovic, 1996, "Active control of environmental noise", Journal of sound and vibration, 190(3), 565-585.
- (7) Connor Duke and Scott Sommerfeldt, 2005, "Multi-channel active noise control on an axial fan using variable loads (A)", J. Acoust. Soc. Am. 117, 2449.
- (8) L. Meirovitch, 1997, Principles and Techniques of Vibrations, Prentice Hall, pp.232-249.
- (8) Zbigniew Michalewicz, 1996, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs, Springer-Verlag.
- (9) Ashok D. Belegundu, Tirupathi Chandrupatla, 1999, Optimization concepts and applications in engineering, Prentice Hall, pp.222-258.
- (11) Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, 2000 Fundamentals of Acoustics, 4th ed., John Wiley&Sons, Chap. 7.