

# 스피커 배열을 이용한 개인용 모니터와 TV의 오디오 시스템

## Personal Monitor & TV Audio System by Using Loudspeaker Array

이 찬 희\* · 장 지 호\* · 박 진 영\* · 김 양 한\*

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

(2007년 12월 24일 접수 ; 2008년 7월 2일 심사완료)

**Key Words** : Acoustic Contrast(음향 밝기대조), Loudspeaker Array(스피커 배열), Spatial Variables(공간 변수)

### ABSTRACT

Including a TV set and a monitor, personal audio system is raising a 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. It has been well known as acoustic contrast control. We have attempted to use a line loudspeaker 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, loudspeaker unit spacing, wave length of sound. We have considered these parameters as spatial variables and studied the effects. And we have found that each spatial variable has its own characteristic and shows very different effect. Genetic algorithms are introduced to find out the optimum value of spatial variables. As a result, we can improve the result of the acoustic contrast control by optimum value of spatial variables.

### 1. 서 론

최근 wide TV나 모니터의 개발과 함께 이들로부 터 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 연구되었 으며<sup>(1-4)</sup>, 밝은 공간(bright zone)과 어두운 공간 (dark zone)의 음향 포텐셜 에너지의 비를 최대화함 으로써 그 해결책을 제시하였다.

이 연구에서는 그 실제적인 예로 모니터나 TV에

쉽게 적용할 수 있는 스피커 배열 시스템을 선택하 여 Fig. 1과 같이 사용자 주위에 음향학적 밝은 공간 을 형성하고 그외 공간에 어두운 공간을 형성함으로 써 그 효과를 살펴보았다.

이를 위해 이 연구에서는 먼저 음향 밝기대조 제 어를 적용하여 문제를 정의하고, 제어공간을 정의하 기 위해 도입한 공간 변수의 의미와 영향에 대해 설 명한다. 그리고 공간변수 크기의 최적화의 필요성에 대해 언급하고 이를 반영한 모의실험과 실제실험의 결과를 통해 제어 효과를 보다 개선할 수 있음을 검 증하고자 한다.

### 2. 음원 배열 이용한 음향 밝기대조

#### 2.1 문제의 정의

Fig. 2와 같이  $N$ 개의 음원이 크기가  $L_a$ 인 선형 형태로 배열(line array)된 경우를 생각해 보자.

음원의 배치와 관심공간은 음원 배열의 구경( $L_a$ ),

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

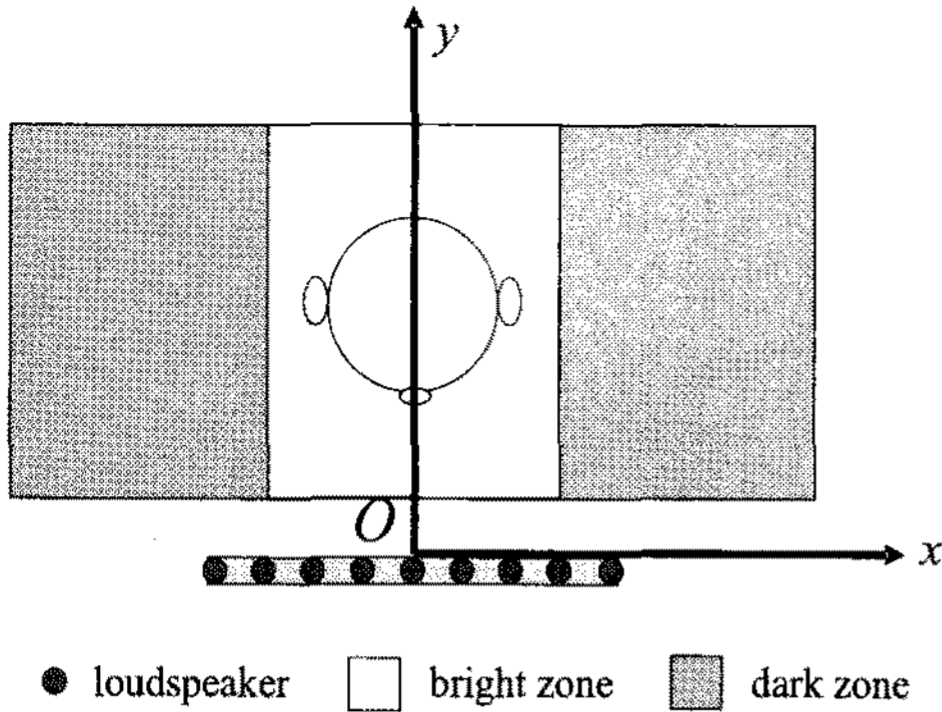


Fig. 1 Definition of the control zone

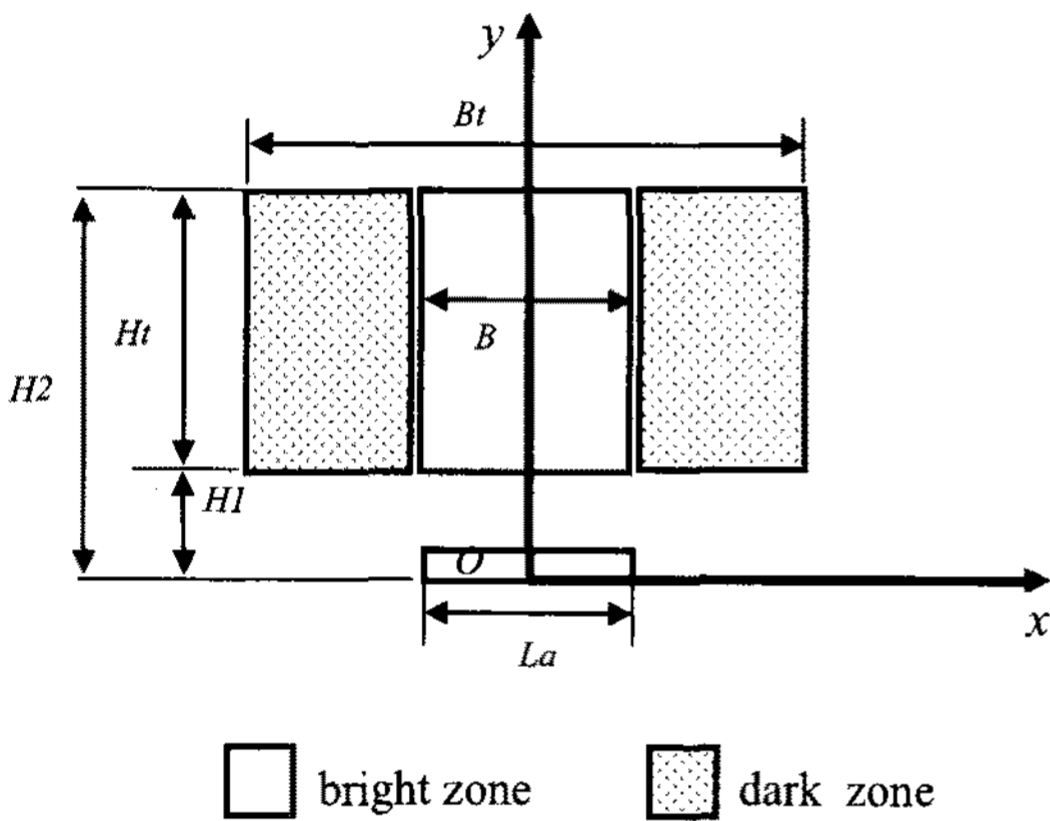


Fig. 2 Definition of bright zone and dark zone & spatial variables

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<sup>(1)</sup>.

밝은 공간은  $H_1 \leq y \leq H_1 + H_t$ ,  $-\frac{B}{2} \leq x \leq \frac{B}{2}$  크기의 직사각형의 면적으로 선정하고, 어두운 공간은  $H_1 \leq y \leq H_1 + H_t$ ,  $\left\{ x \mid -\frac{B_t}{2} \leq x \leq -\frac{B}{2} \text{ or } \frac{B}{2} \leq x \leq \frac{B_t}{2} \right\}$ 로 정의하자. 음원 배열 정면에 위치하는 밝은 공간에 청취자가 위치한다고 가정하면, 문제는 청취자가 포함된 밝은 공간과 이를 둘러싸고 있는 어두운 공간의 평균 음향 포텐셜 에너지 밀도의 비인 음향 밝기

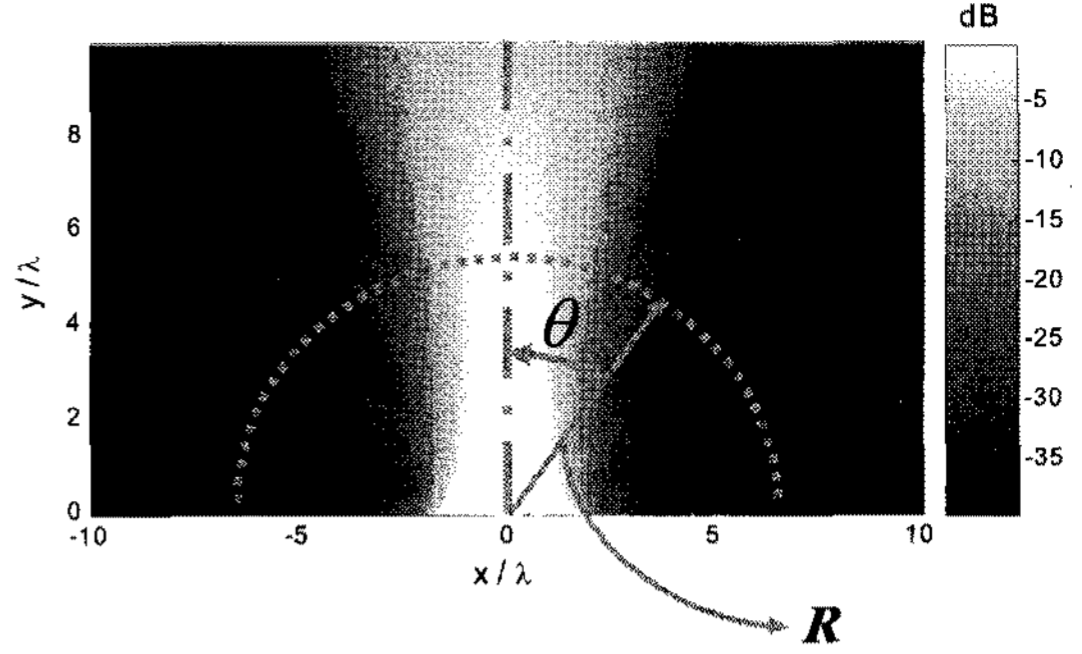


Fig. 3 Definition of drop angle( $\theta$ )

$$\mu = \frac{\frac{1}{V_b} \iiint_{V_b} |p(\vec{r})|^2 dV}{\frac{1}{V_d} \iiint_{V_d} |p(\vec{r})|^2 dV} \quad (1)$$

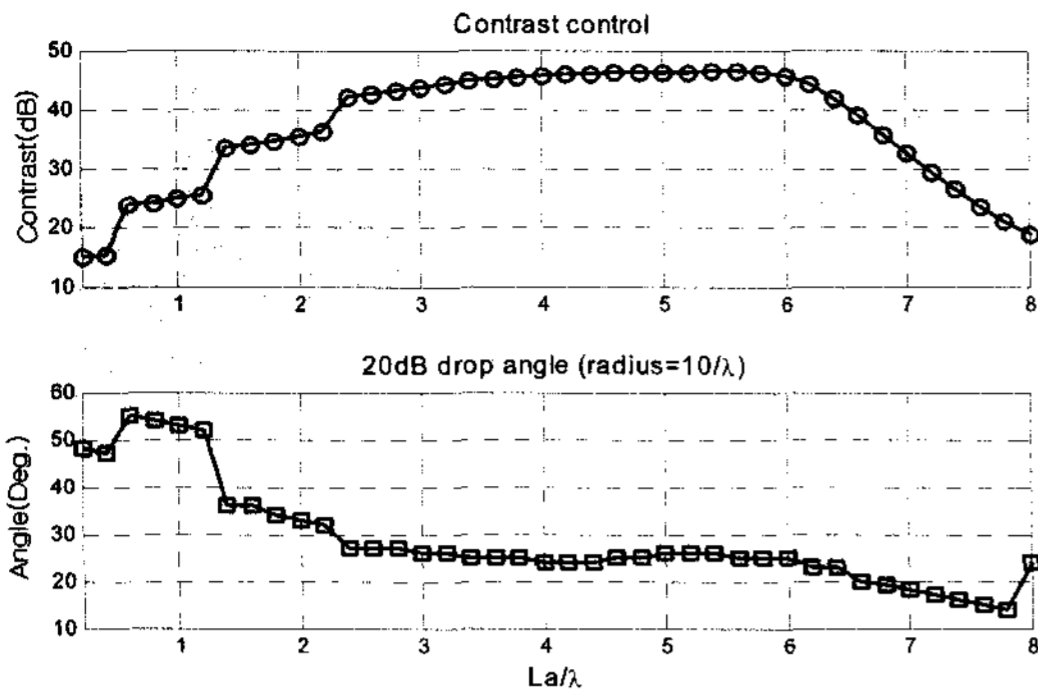
대조를 최대화하는 문제가 된다. 여기서  $V_b$ 는 밝은 밝은 공간을 의미하며,  $V_d$ 는 어두운 공간을 의미한다. 또한 이 경우 음향 밝기대조는

$$\mu = f\left(N, \frac{L_a}{\lambda}, \frac{H_1}{\lambda}, \frac{H_t}{\lambda}, \frac{B}{\lambda}, \frac{B_t}{\lambda}\right) \quad (2)$$

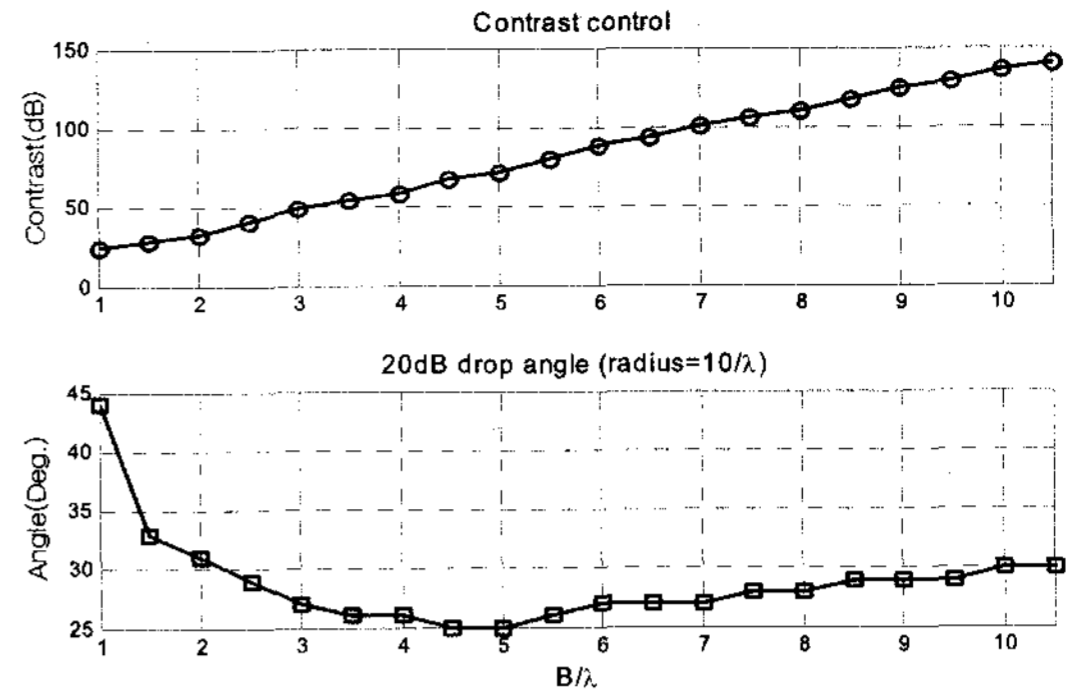
와 같이 음원의 개수와 제어공간을 정의하는 공간 변수들과 파장의 함수로 볼 수 있으며, 결국 음향 밝기대조를 최대화하는 공간변수의 크기를 구하는 문제로 정의할 수 있다.

음향 밝기대조 제어에 의한 제어결과를 살펴보기 위해서는 밝은 공간의 폭(또는 main lobe의 폭)을 측정할 인자가 필요하다. 이에 Fig. 3과 같이 밝은 공간의 폭을 표현할 인자로서 중심축으로부터 특정 반경  $R$ 에 대해 beam pattern을 측정하여 특정 음압 레벨만큼 낮은 위치를 나타내는 각도를 drop angle로 정의하였다. Drop angle이 크다는 것은 밝은 공간이 넓게 형성되었다는 것을 의미하며, 반대로 drop angle이 작다는 것은 밝은 공간이 보다 좁게 형성되었다는 것을 의미한다. 이 논문에서는 중심축의 음압에 비해 20 dB 낮은 두 지점의 drop angle을 고려하여 밝은 공간에 형성된 main lobe의 폭을 살펴보았다.

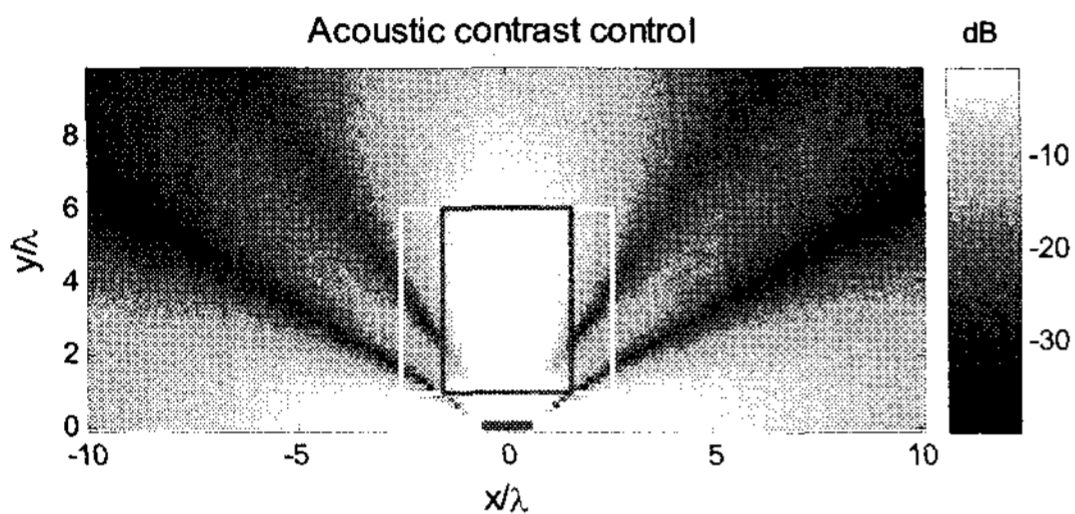
이 연구에서는 공간변수의 크기를 조절함으로써 음향 밝기대조와 20 dB drop angle을 제어하여 보다 효과적으로 음향학적 밝은 공간과 어두운 공간을



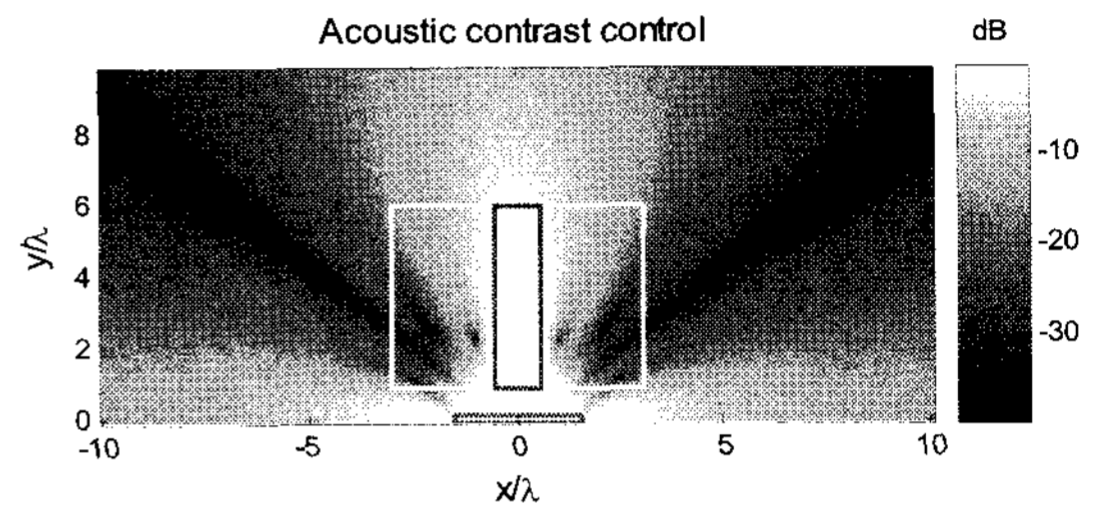
(a) Contrast and 20 dB drop angle



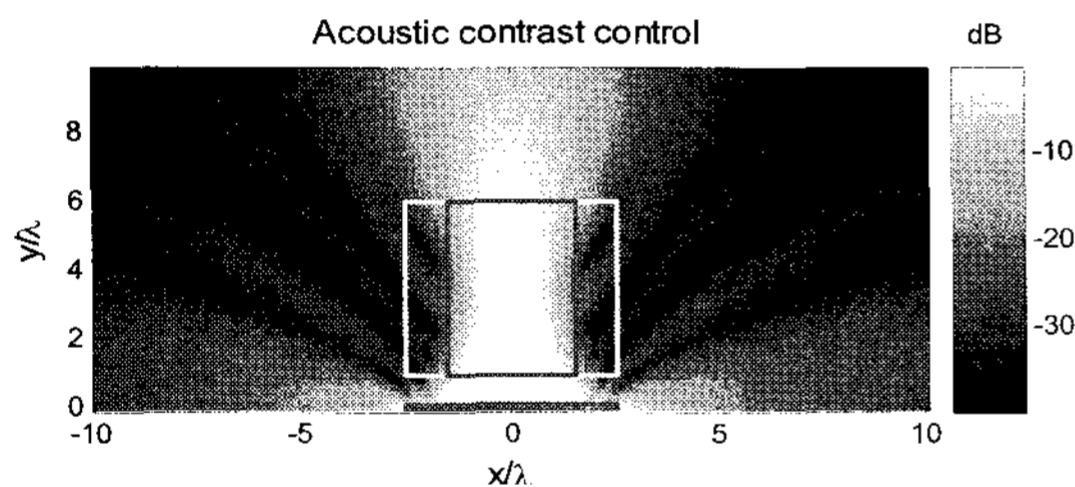
(a) Contrast and 20 dB drop angle



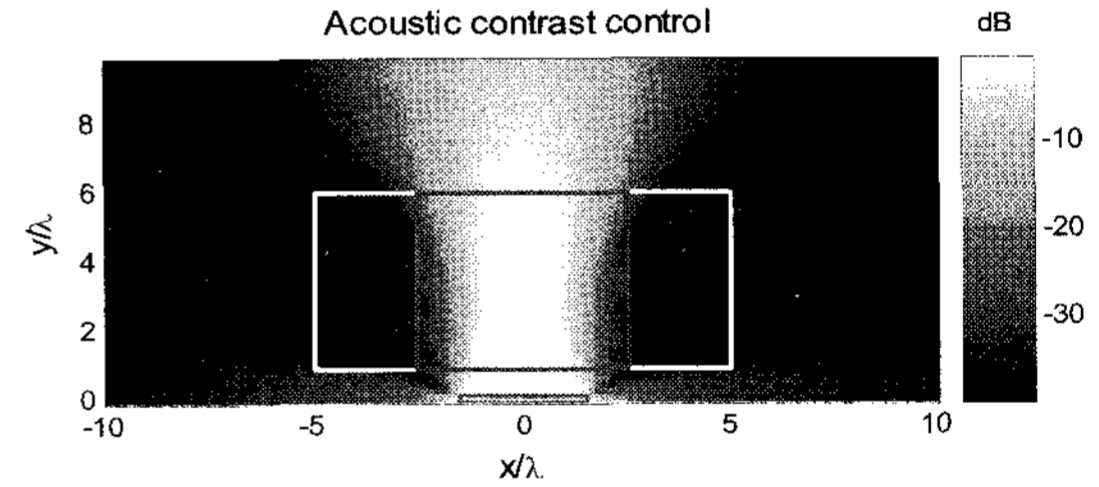
(b)  $La=1\lambda$



(b)  $B=1\lambda$



(c)  $La=5\lambda$



(c)  $B=5\lambda$

Fig. 4 The effect of source array size( $La$ )

Fig. 5 The effect of bright zone width( $B$ )

형성하고자 한다.

## 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 배열을 9개의 단극음원으로 이루어진 경우로 가정하고 각 공간 변수의 크기를 파장( $\lambda$ )의 길이에 대해 무차원화하여,  $La=3\lambda$ ,  $B=3\lambda$ ,  $Bt=5\lambda$ ,  $Ht=1\lambda$ ,  $Ht=5\lambda$ 를 비교기준으로 각 공간 변수 크기 변화의 영향을 살펴보았다. 그리고 20 dB drop angle은 반경  $10\lambda$ 를 기준으로 측정하였다.

음원 배열의 구경( $La$ )의 변화는 음원 간격의 변화를 의미한다.  $La=5\lambda$ 부근에서 음향 밝기대조가 가장 크게 나타났으며, 20 dB drop angle역시 작게 나타

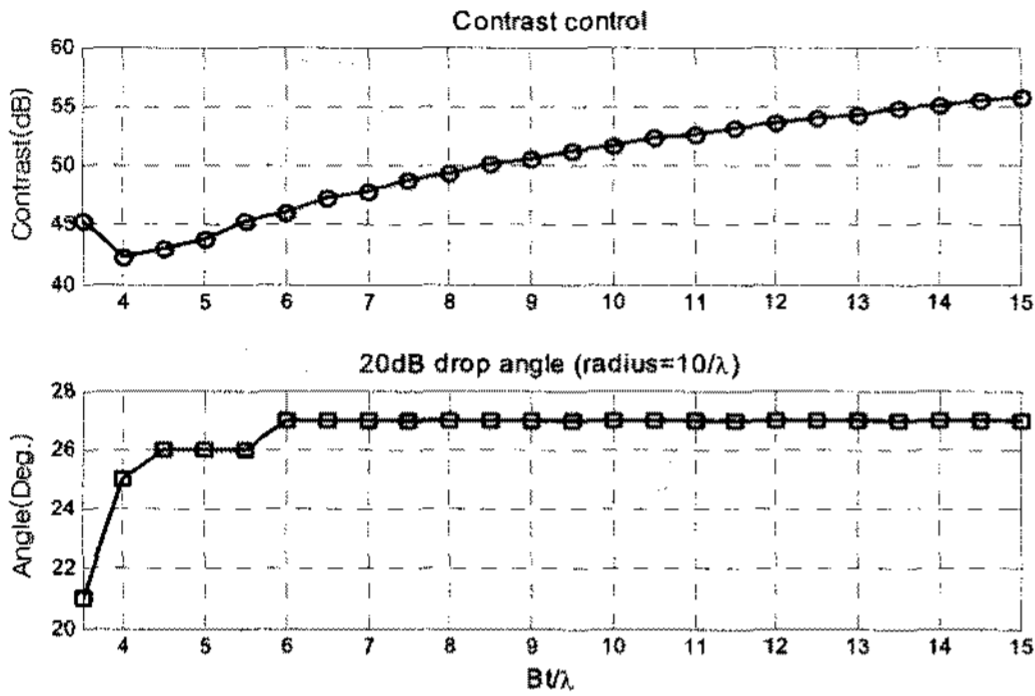
났다. 그리고 Fig. 4(b), (c)에서 알 수 있듯이 음향 밝기대조의 값이 크다는 것은 side lobe들이 보다 작게 제어된다는 것을 의미한다.

밝은 공간의 가로 폭( $B$ )의 크기가 증가할수록 음향 밝기대조는 증가하는 경향을 보였으며, 20 dB drop angle은  $B=5\lambda$ 부근에서 가장 작은 값을 나타내었다.

전체 관심공간의 가로 폭( $Bt$ )은 그 크기가 증가할수록 음향 밝기대조는 전체적으로 증가하는 경향을 보였으나, 20 dB drop angle은 처음에는 증가하다  $6\lambda$  이상에서는 일정한 값을 유지하였다.

밝은 공간의 세로 폭( $Ht$ )은 그 크기가 증가할수록 음향 밝기대조와 20 dB drop angle 모두 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며, side lobe의 개수와 크기는 증가하는 경향을 보였다.

음원과 밝은 공간의 거리( $H1$ )의 경우 그 크기가 증가할수록 음향 밝기대조와 20 dB drop angle 모두 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 Fig. 8(c)에서 확인할 수 있듯이  $H1$ 이 증가함에 따라 음원 배열과 관심공간 사이에 형성된 side lobe의 크기가 증가하는 현상이 발생하였다. 이처럼 각 공간 변수들은 음향 밝기대조 제어에 비선형적으로 기



(a) Contrast and 20 dB drop angle

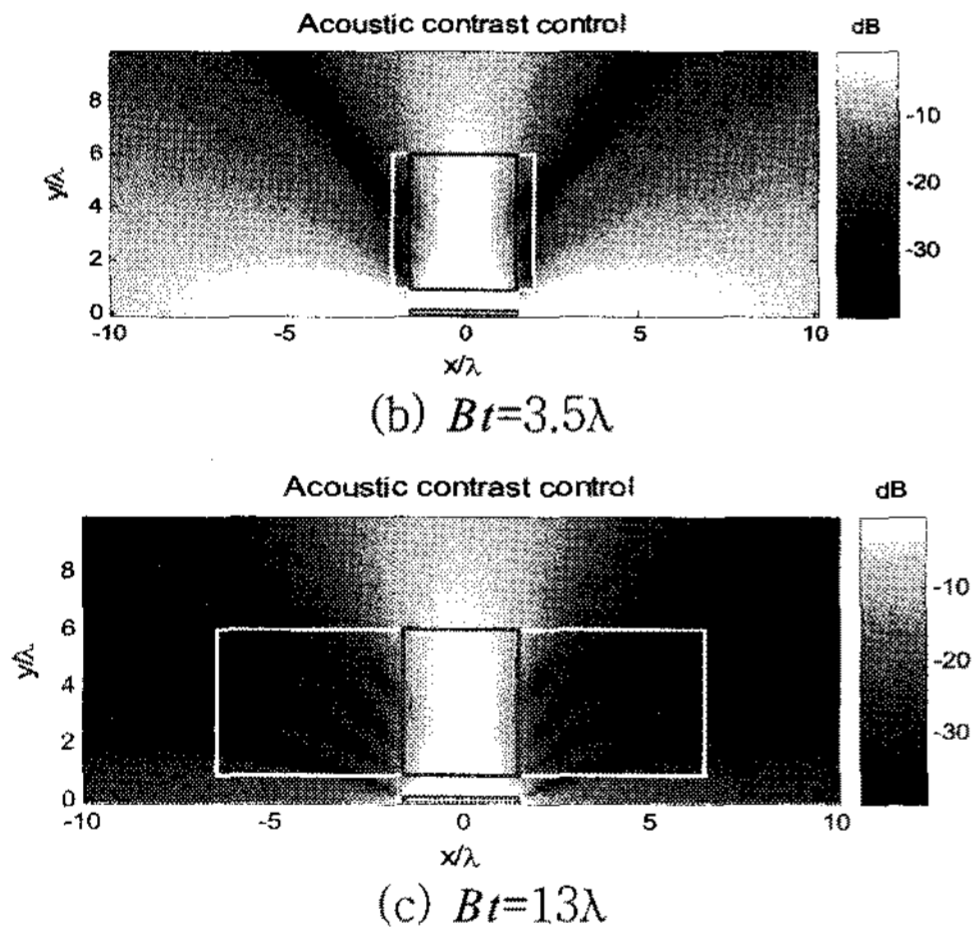
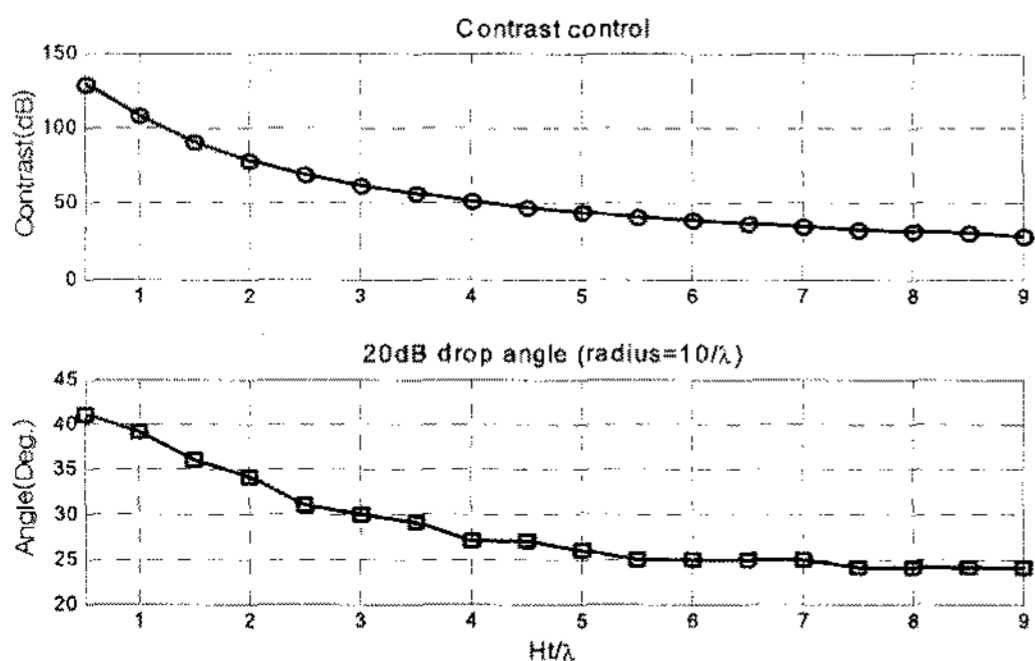


Fig. 6 The effect of total zone width( $Bt$ )



(a) Contrast and 20 dB drop angle

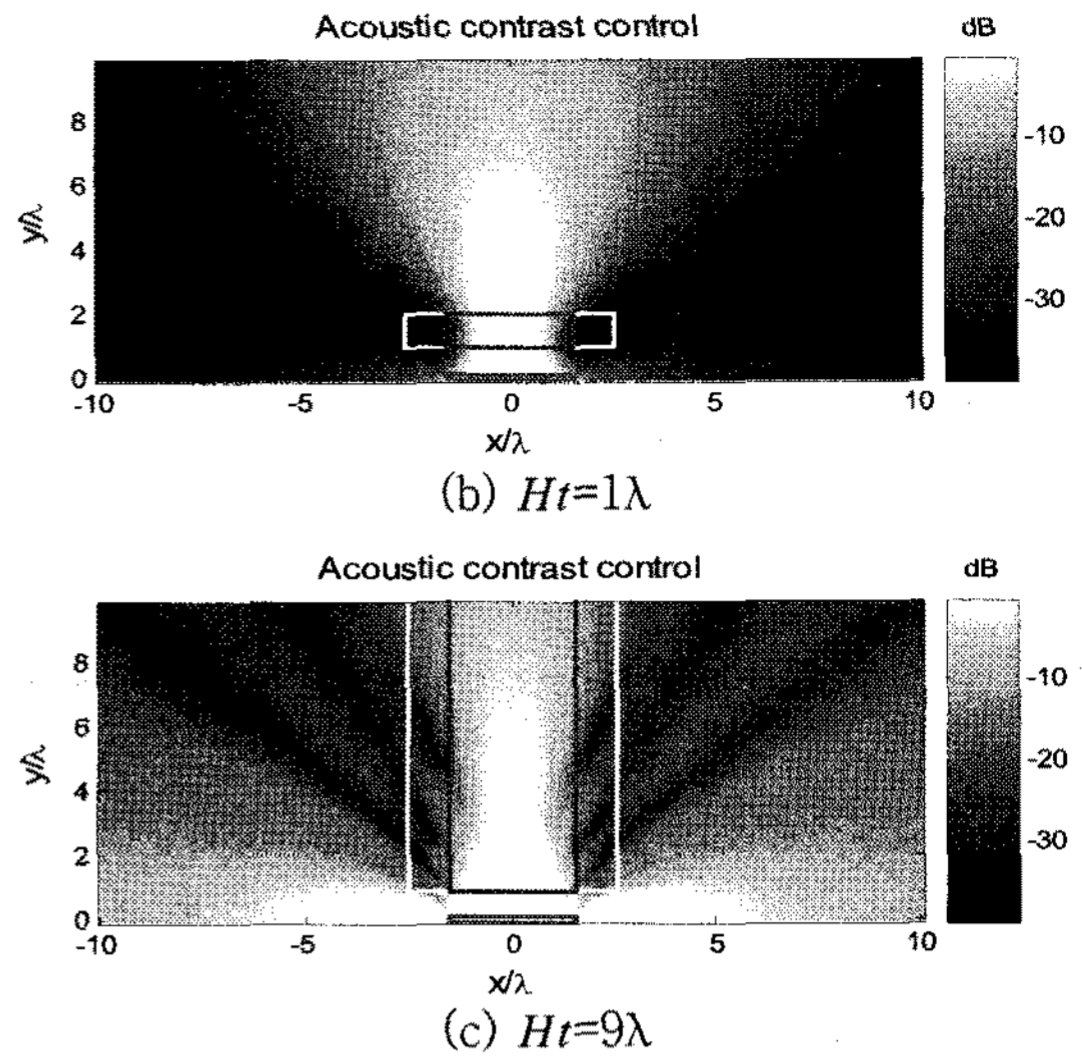
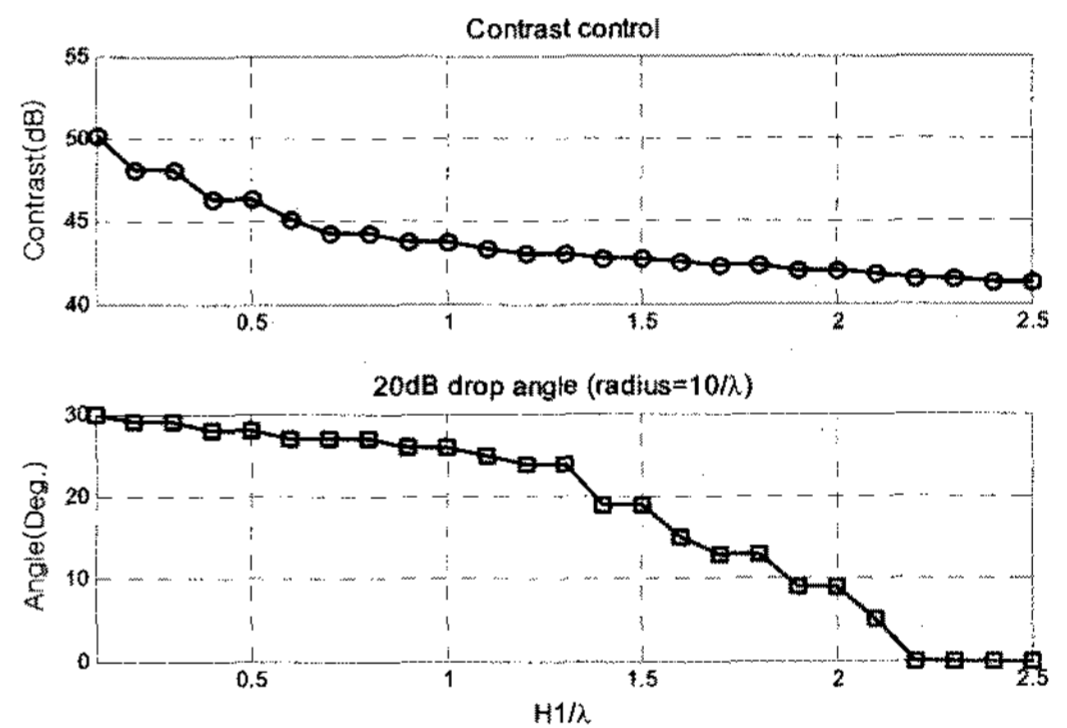


Fig. 7 The effect of bright zone height( $H1$ )



(a) Contrast and 20 dB drop angle

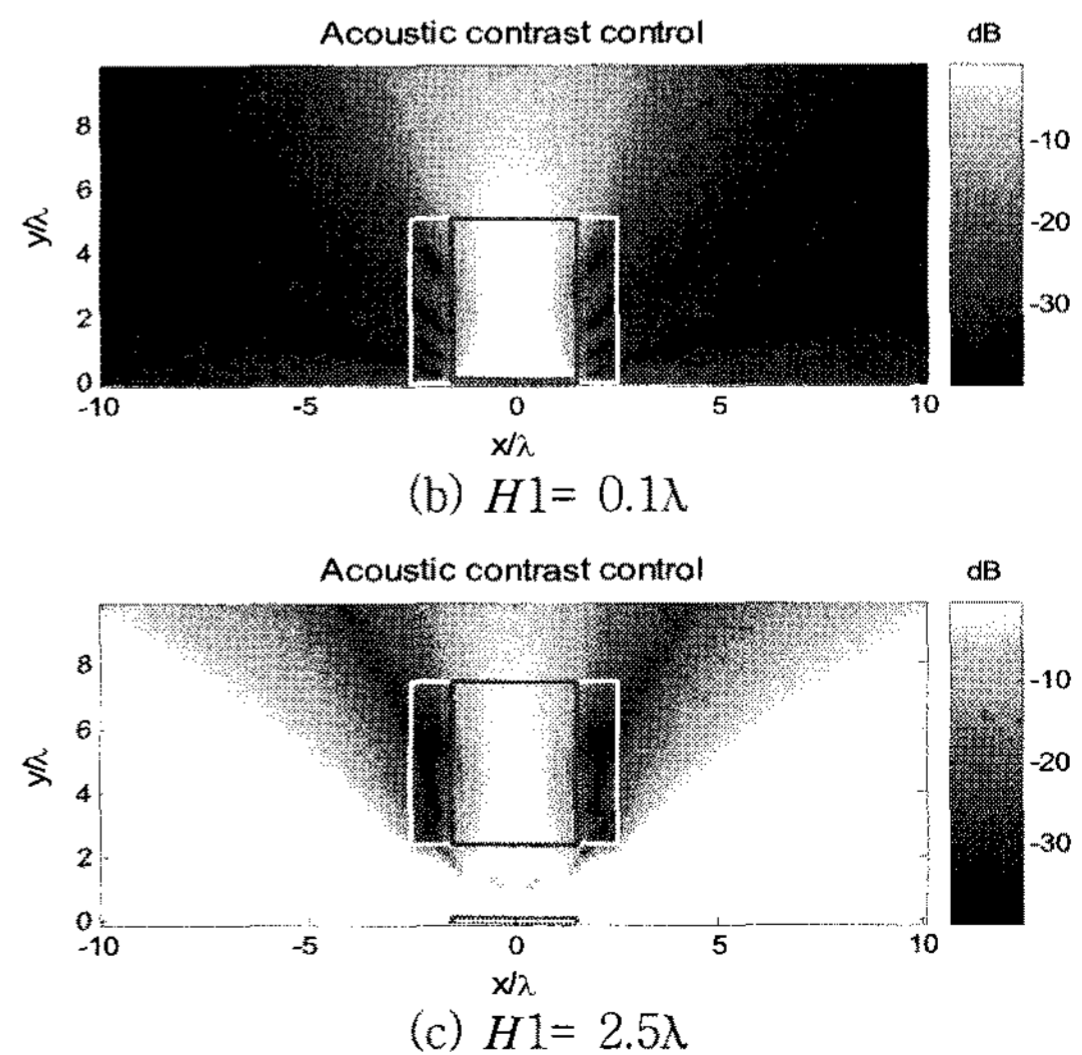


Fig. 8 The effect of distance between source array and bright zone( $H1$ )

여하는 경향을 나타내며, 이는 적절한 크기의 각 공간 변수들을 고려함으로써 보다 효과적인 제어 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

### 3. 공간 변수의 최적 크기 도출

#### 3.1 공간 변수의 최적 크기 도출을 위한 문제의 정의

음향 밝기대조가 클수록, 그리고 20 dB drop angle이 사람의 두상 폭에 근접할수록 밝은 공간과 어두운 공간을 보다 효과적으로 형성할 수 있다.

Fig. 9와 같이 음원 배열로부터 0.4 m의 거리에 청취자의 두상(head)이 위치하고 그 두상의 폭이 0.3 m내에 포함된 경우를 가정하면, 구현하고자 하는 20 dB drop angle은 약 20°로 선정할 수 있다.

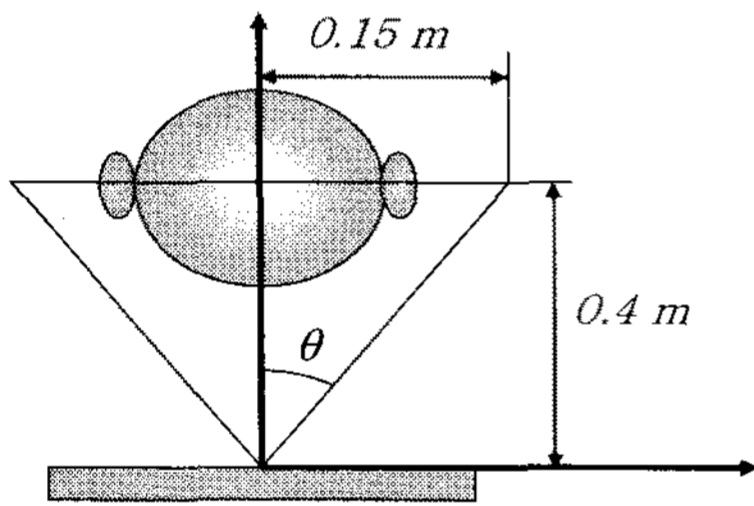


Fig. 9 Target value of 20 dB drop angle( $\theta$ )

Table 1 Optimization result by GA's

Condition	Generation : 100, individuals per a generation : 100
Optimized spatial variables	x1=4.3086, x2=5.3013, x3=6.8528
Contrast(dB)	84.1 dB
20 dB drop angle	20°

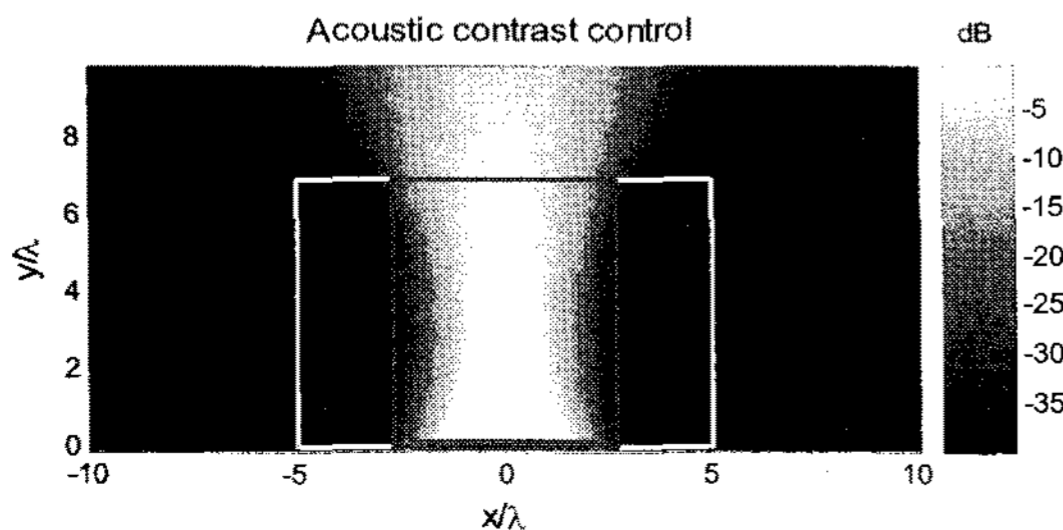


Fig. 10 Controlled sound field by optimized spatial variables

또한 음향 밝기대조를 제약조건으로 사용하기 위해 음압 레벨(SPL) 차이에 대한 청음자의 주관적인 청음 특성<sup>(5,6)</sup>을 고려하여 음향 밝기대조가 최소한 40 dB가 넘도록 제어하고자 하는 경우, 이는 다음과 같은 최소화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && f = |\theta(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) - 20| \\
 & \text{Subject to} && g_1 : 40 \leq \text{Contrast}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \\
 & && \text{where } x_1 = La/\lambda, \quad x_2 = B/\lambda, \quad x_3 = Bt/\lambda, \\
 & && \quad \quad \quad x_4 = Ht/\lambda, \quad x_5 = H1/\lambda
 \end{aligned} \tag{3}$$

#### 3.2 유전자 알고리즘(GA's)을 이용한 공간 변수의 최적 크기 도출

유전 알고리즘은 제약조건이 있는 경우 이를 표현하기가 쉽지 않다. 이를 해결하기 위해 벌칙함수방법(penalty function method)을 적용하여<sup>(7-9)</sup> 식(3)의 제약조건을 처리하였으며, 공간 변수들의 경향을 고려하여,

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && f = |\theta(\mathbf{x}) - \theta_0| + r_k [\max(0, g_1(\mathbf{x}))]^2 \\
 & \text{where} && \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3), \quad x_1 = La/\lambda, \quad x_2 = B/\lambda, \\
 & && \quad \quad \quad x_3 = Ht/\lambda, \quad \theta_0 = 20^\circ, \\
 & && g_1(\mathbf{x}) = 40 - \text{Contrast}(\mathbf{x})
 \end{aligned} \tag{4}$$

와 같이 간단히 표현할 수 있다( $H1$ 과  $Bt$ 는 Fig. 6, 8의 경향을 고려하여 각각  $0.1\lambda$ 와  $10\lambda$ 로 고정). 여기서  $r_k$ 는 벌칙인자를 의미한다. 위 식(4)에 유전 알고리즘을 적용하여 구한 최적의 공간 변수 조합은 Table 1과 같다.

유전 알고리즘을 통해 얻은 최적의 공간 변수 크기 조합을 반영한 최적해는 제약조건을 모두 만족하였으며 결과 음장은 Fig. 10과 같다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 실험환경 및 실험장치

앞서 3장 2절에서는 스피커 배열의 크기를 제어 변수로 하였다. 그러나 이는 주파수 별로 스피커 배열의 크기를 변화시켜야 한다는 것을 의미하므로 실제적 적용을 위해 실험에서는 1열 배열 형태의 17" 모니터 크기를 고려하여 스피커 배열의 구경( $La$ )의

크기를 0.32 m로 고정하였으며, 9개의 스피커를 등간격으로 배치하였다. 그리고 관심주파수는 800 Hz, 2 kHz, 3 kHz를 선정하였다. 음장 측정 시 공간 분해능을 결정하는 마이크론의 간격은 파장이 가장 짧은 관심주파수인 3 kHz를 고려하여 한 파장 당 최소한 5개의 측정점이 위치하도록 0.02 m로 계측하여, 관심주파수에서 충분한 공간샘플링이 가능토록 하였다. 측정 공간은 스피커 배열의 중심으로부터 0.1 m 떨어진 가로 0.9 m, 세로 0.5 m의 직사각형 평면으로 선정하였다.

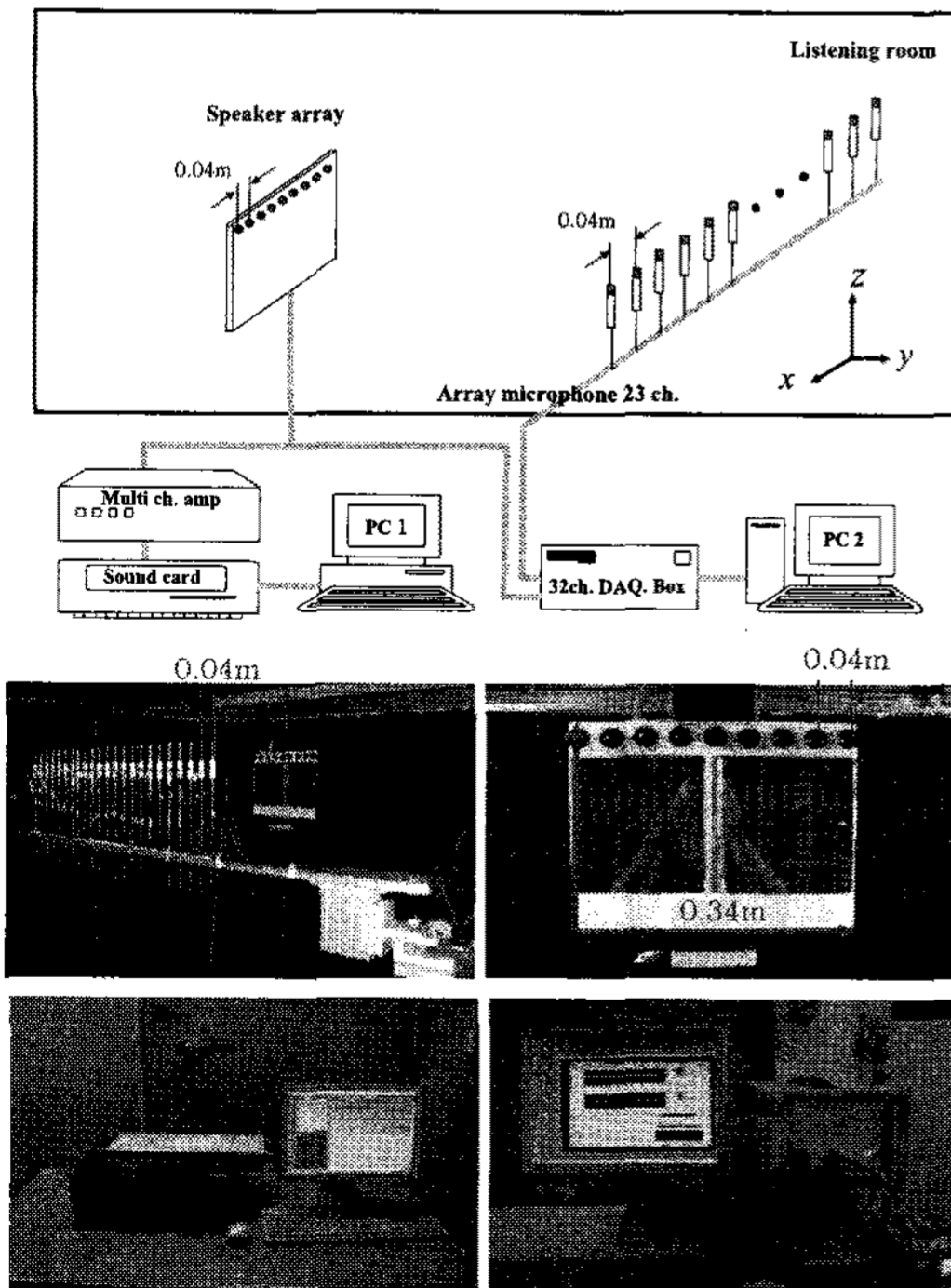
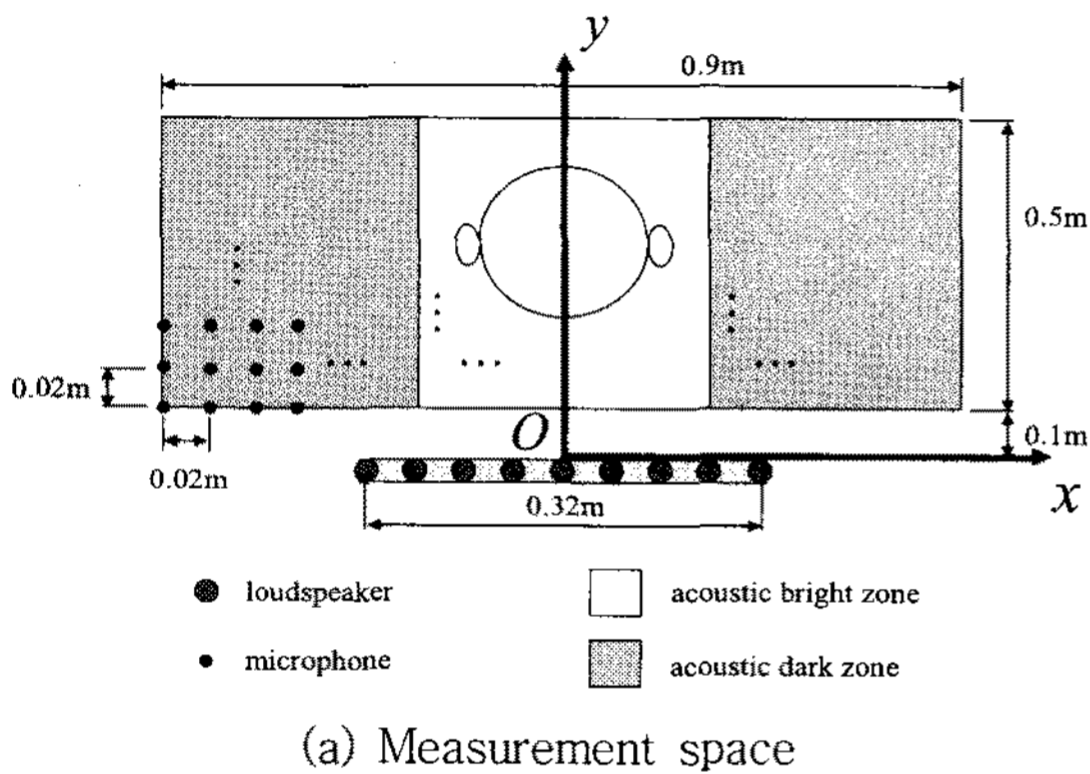


Fig. 11 Measurement space & experimental set-up

#### 4.2 모의실험 결과 및 고찰

실제 실험에 앞서 이론적인 모의실험(simulation)을 수행하였으며, 모의실험에서는 음원을 단극음원(monopole)로 가정하였다. 제어공간과 음원의 배치는 앞의 Fig. 11(a)와 동일한 조건으로 유지하였으며 20 dB drop angle을 측정하는 반경은 0.4 m로 선정하였다. 제어 효과를 확인하기 위해 제어를 하지 않고 각 음원에 동일한 입력신호를 준 경우와 공간변수의 최적크기를 적용하여 음향 밝기대조 제어를 적용한 경우의 결과를 비교하였다.

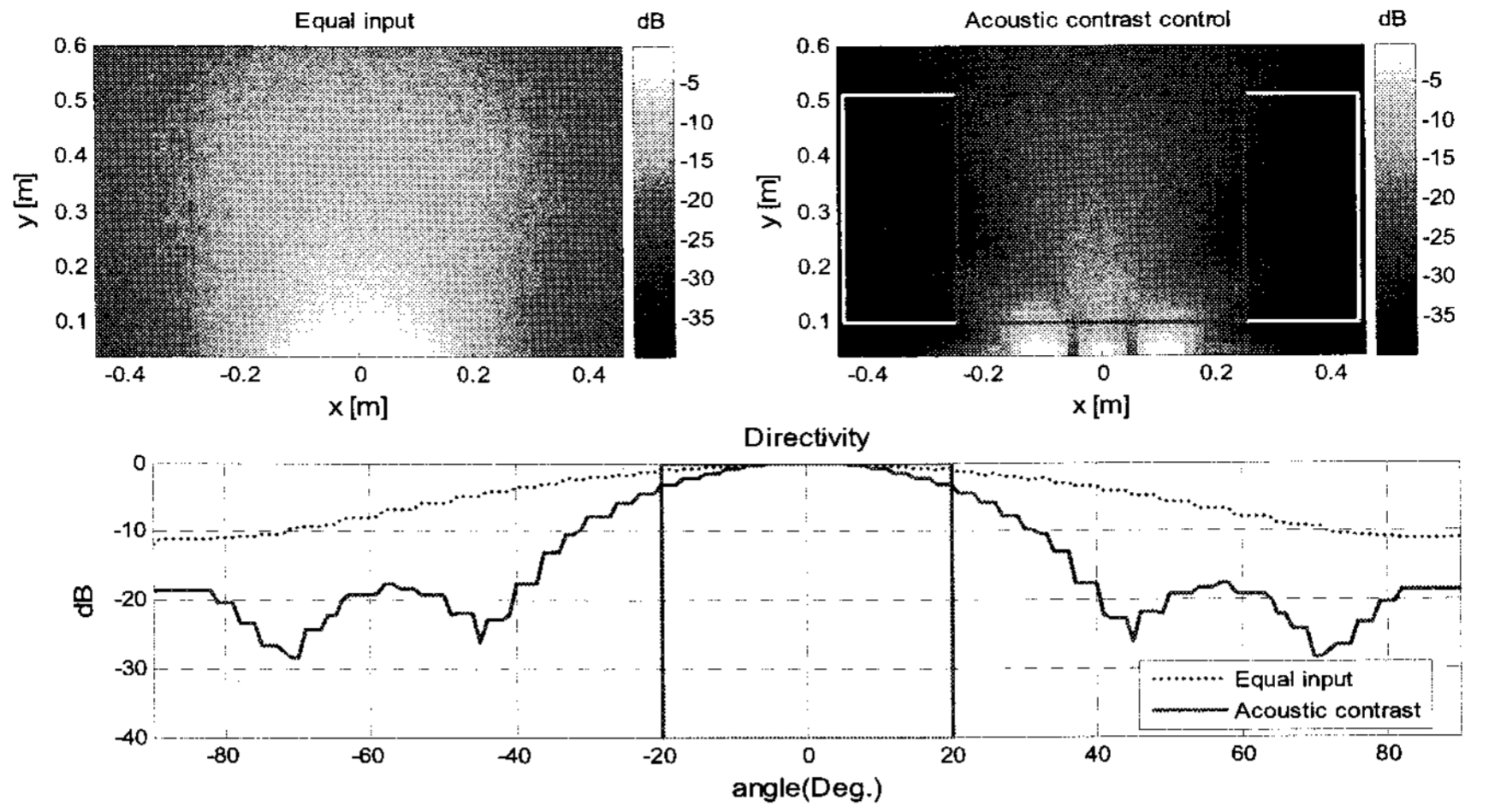
우선 음향 밝기대조의 크기를 비교해 보면, 공간변수의 최적 크기를 적용하여 음향 밝기대조 제어를 적용한 경우가 제어를 하지 않고 동일한 입력신호를 준 경우에 비해 800 Hz의 경우 16.9 dB, 2 kHz의 경우 18.7 dB 그리고 3 kHz의 경우 30.4 dB만큼 개선되었다(Table 3). 20 dB drop angle은 3 kHz의 경우, 제어를 하지 않고 동일한 입력신호를 준 경우에는 70°였으나, 공간변수의 최적 크기를 적용하여 음향 밝기대조를 적용한 경우는 24°로 약 46° 개선되었다. 그리고 2 kHz의 경우에는 약 41.5° 개선되었다. 그러나 제어를 하지 않고 동일한 입력신호를 준 경우 800 Hz의 경우에서 20 dB drop angle이 형성되지 않아 10 dB drop angle을 측정하여 비교한 결과, 제어를 하지 않고 동일한 입력신호를 준 경우에는 72°였으나, 공간변수의 최적 크기를 적용하여 음향 밝기대조를 적용한 경우는 32°로 약 40° 개선된 결과를 나타내었다.

Table 2 Optimization result by GA's

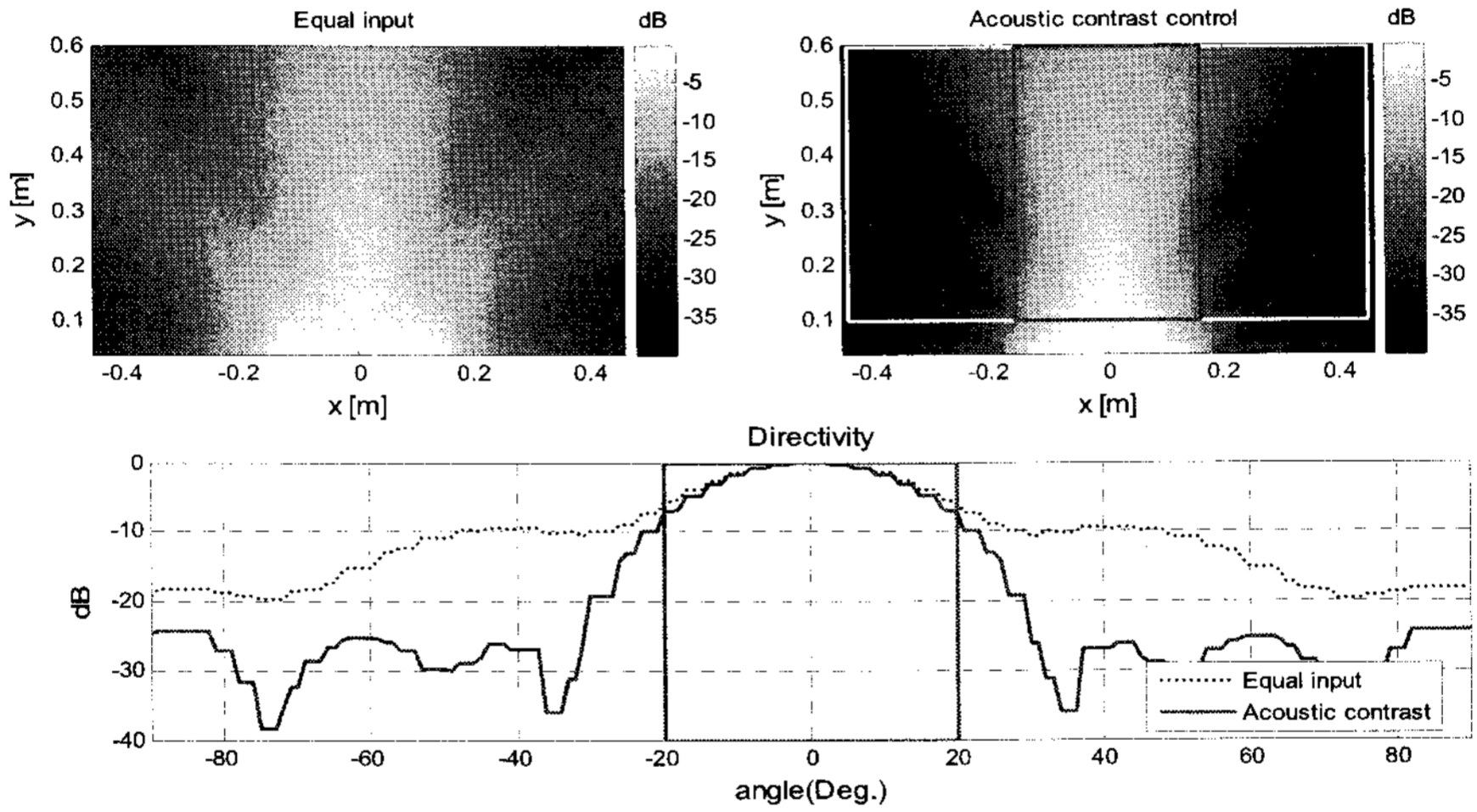
Condition		Generation : 30, individuals per a generation : 20
Optimized spatial variables	800 Hz	$B=0.5036$ m, $Ht=0.4120$ m
	2 kHz	$B=0.3193$ m, $Ht=0.4941$ m
	3 kHz	$B=0.3270$ m, $Ht=0.4619$ m

Table 3 Acoustic contrast controlled results under optimization of spatial variables

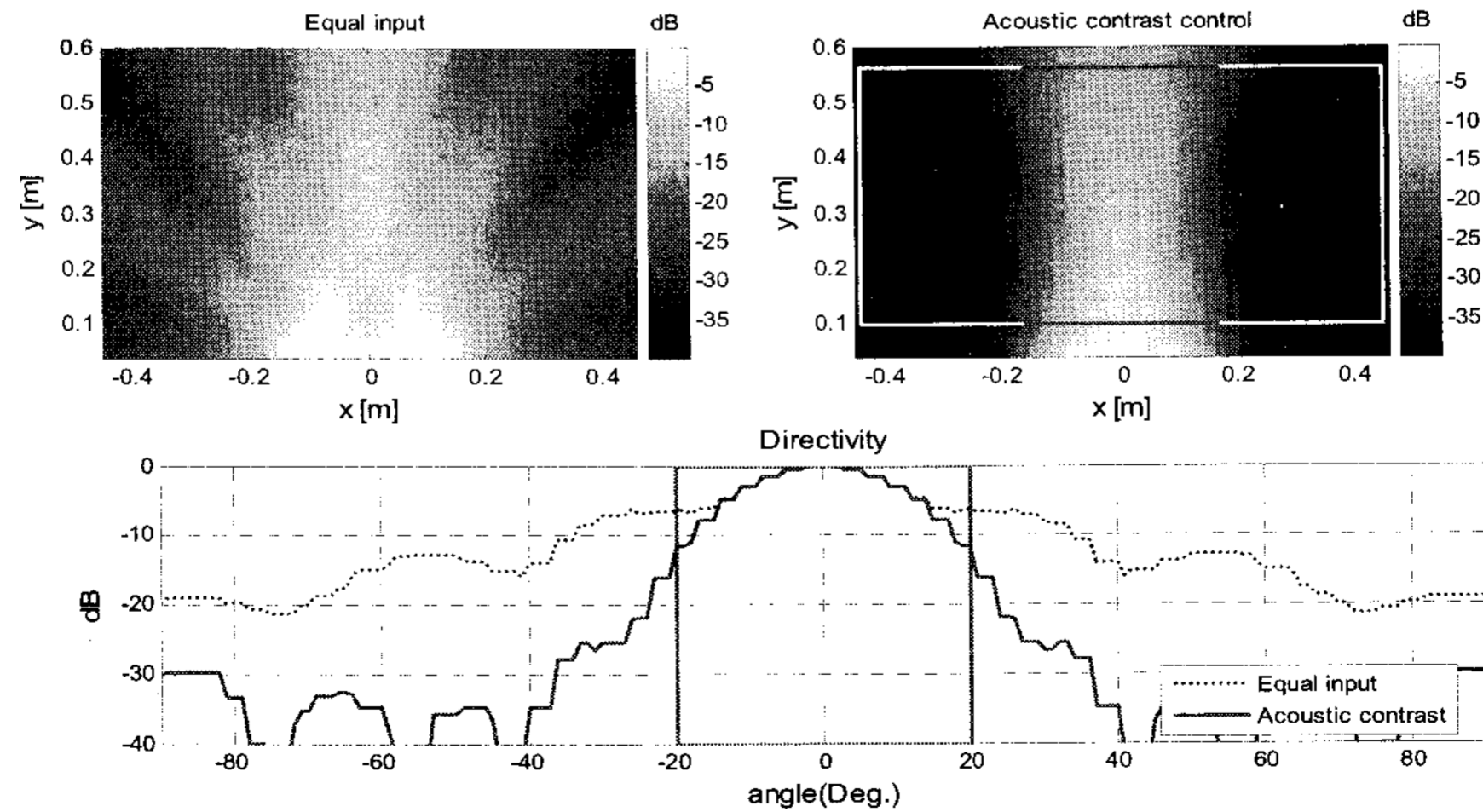
	Equal input			Acoustic contrast control under optimization of spatial variables		
	800 Hz	2 kHz	3 kHz	800 Hz	2 kHz	3 kHz
Contrast (dB)	16.9	19.6	22.0	33.8	36.3	52.4
20 dB drop angle	Not exist	72°	70°	40.5°	30.5°	24°



(a) Case of 800 Hz

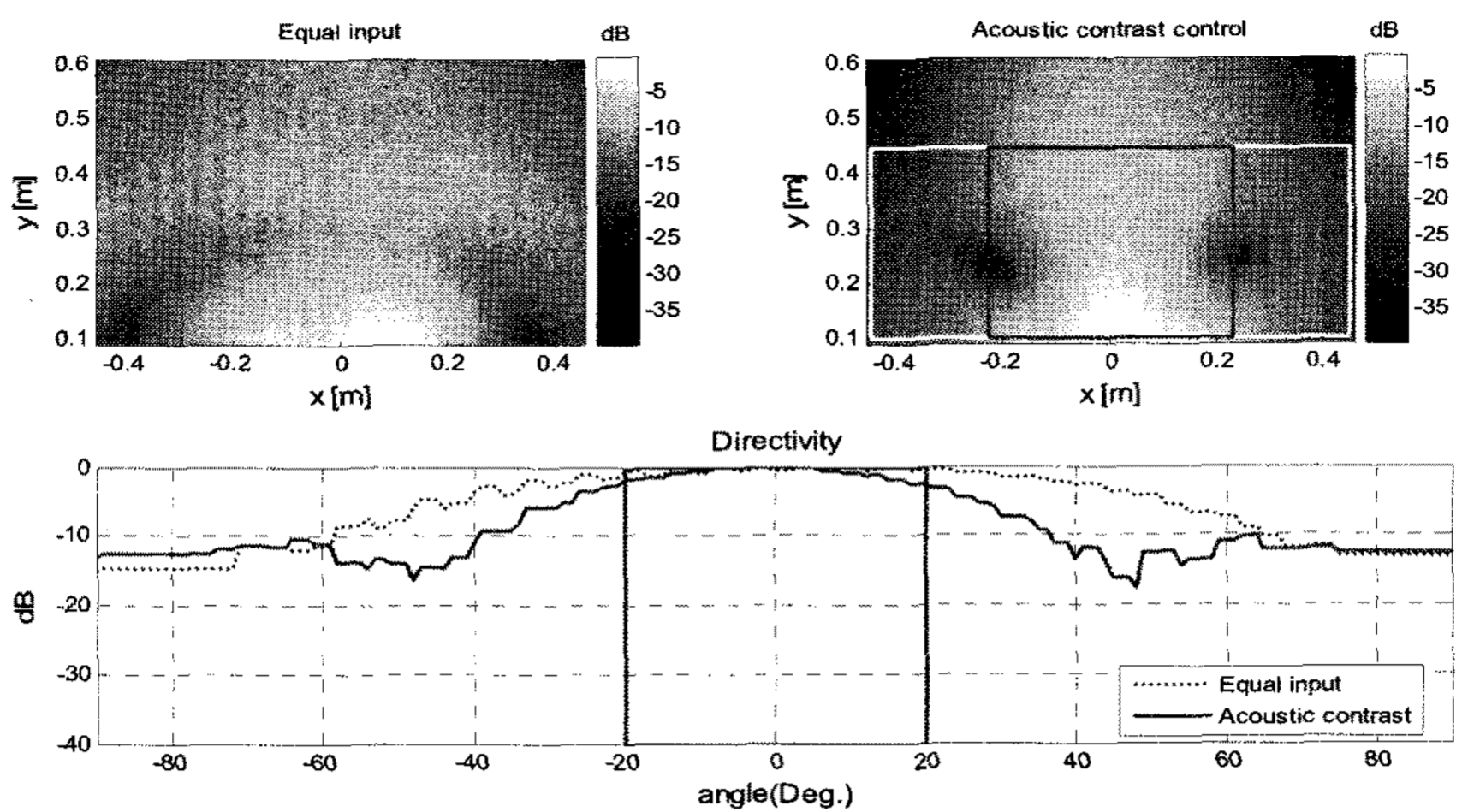


(b) Case of 2 kHz

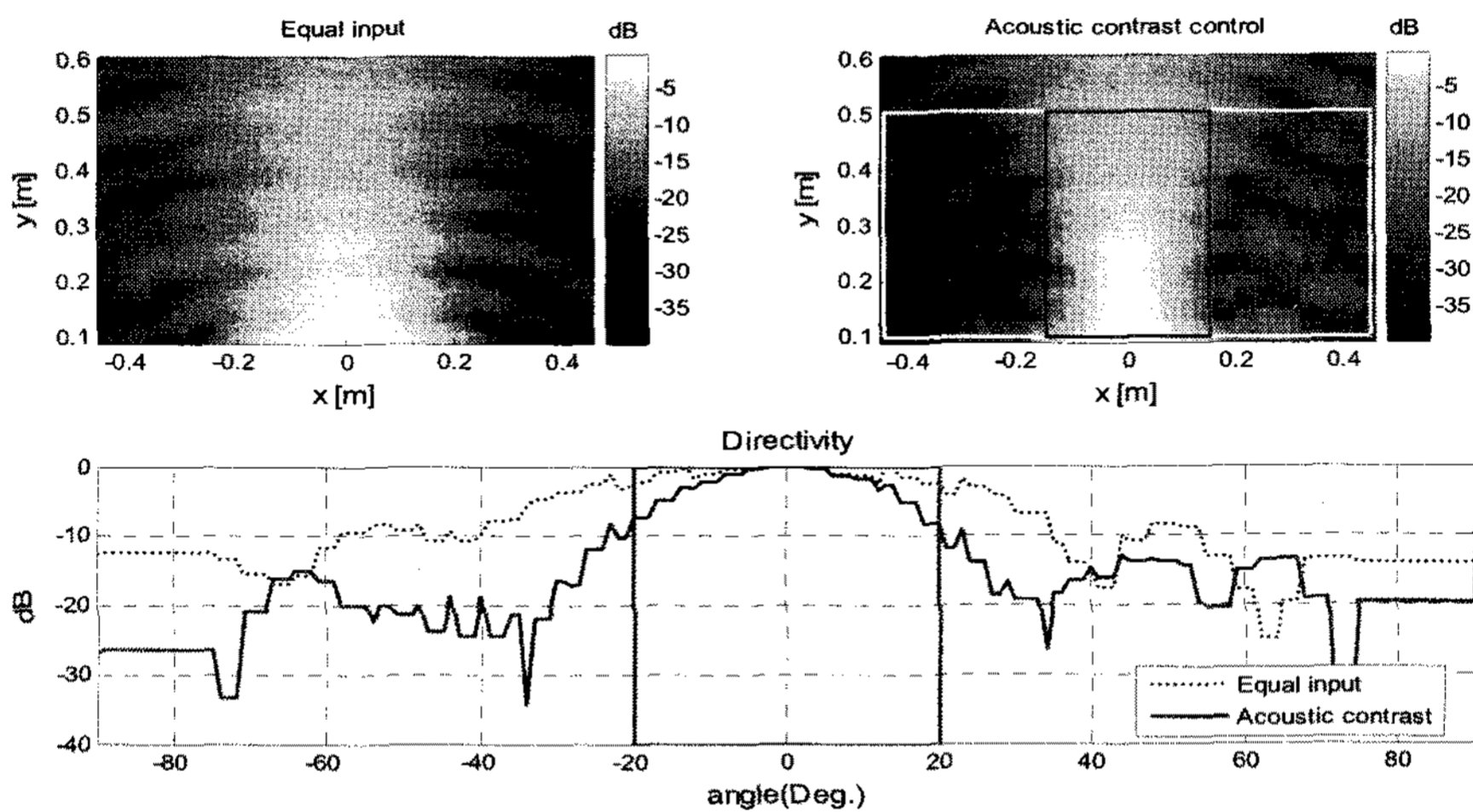


(c) Case of 3 kHz

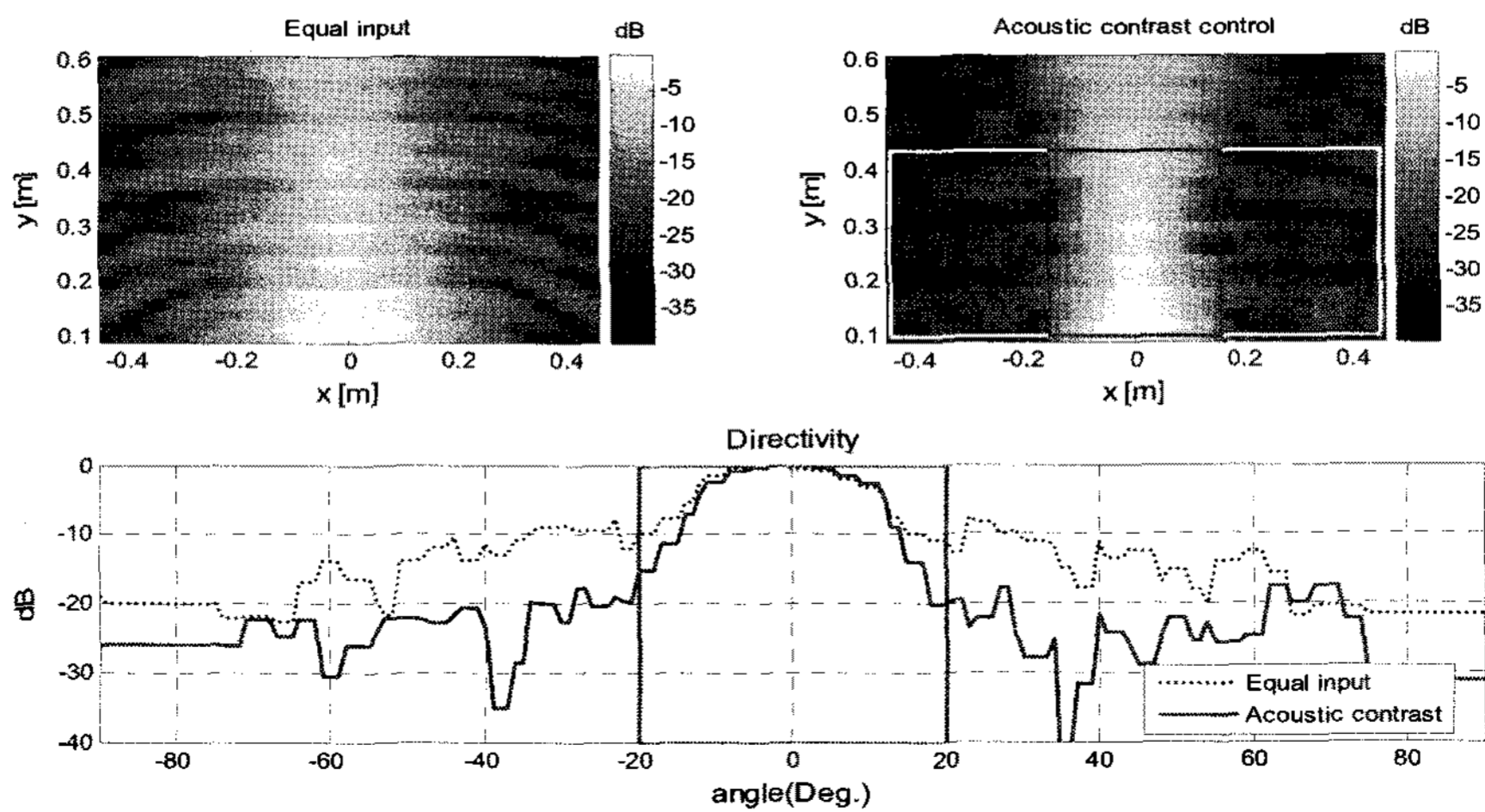
Fig. 12 Controlled result under optimization of spatial variables(simulation result)



(a) Case of 800 Hz



(b) Case of 2 kHz



(c) Case of 3 kHz

Fig. 13 Controlled result under optimization of spatial variables(experiment result)



### 4.3 실제 실험결과 및 고찰

이론적인 해석에서는 음원을 단극음원으로 가정하였으나 실제 구현을 위한 시스템에서 음원으로 사용되는 스피커는 단극음원으로 취급하기 어려우며, 또한 각각의 스피커들이 동일한 특성을 가졌다고 할 수 없다.

이러한 이유로 실제 실험에서는 각 스피커로 입력되는 전압 신호(input voltage signal)와 마이크로폰에서 측정되는 음압 신호 사이의 전달함수를 모두 측정하였다. 각 스피커와 마이크로폰의 특성(크기와 위상)은 이 전달함수에 모두 반영이 된다. 그리고 구한 전달함수를 이용하여 실제 공간 상관행렬을 구성하고, 음향 밝기대조 제어를 적용하여 각 스피커의 최적 제어입력 신호를 계산하였다.

앞서 살펴본 모의실험과 동일하게 제어 효과를 확인하기 위해 제어를 하지 않고 각 스피커에 동일한 입력신호를 준 경우와 공간변수의 최적크기를 적용하여 음향 밝기대조 제어를 적용한 경우의 결과를 비교하였다.

음향 밝기대조의 크기를 비교해 보면, 공간 변수의 최적 크기를 적용하여 음향 밝기대조 제어를 적용한 경우가 제어를 하지 않고 동일한 입력신호를 준 경우에 비해 800 Hz의 경우 9.9 dB, 2 kHz의 경우 8.2 dB 그리고 3 kHz의 경우 15 dB만큼 개선되었다(Table 5).

그리고 20 dB drop angle은 3 kHz의 경우에 공간 변수의 최적 크기를 적용하여 음향 밝기대조 제어를 적용한 경우가 제어를 하지 않고 동일한 입력신호를 준 경우보다 30°개선되었다.

그러나, 제어를 하지 않고 동일한 입력신호를 준 경우 800 Hz와 2 kHz의 경우에서 20 dB drop angle이 형성되지 않아 10 dB drop angle을 측정하여 비교하였다.

800 Hz의 경우, 제어를 하지 않고 동일한 입력 신호를 준 경우에는 62°였으나, 공간 변수의 최적크기를 적용하여 음향 밝기대조를 적용한 경우는 38.5°로 약 23.5° 개선되었다. 그리고 2 kHz의 경우, 제어를 하지 않고 동일한 입력 신호를 준 경우에는 38°였으나, 공간 변수의 최적 크기를 적용하여 음향 밝기대조를 적용한 경우는 21°로 약 17° 개선되었다.

주파수가 증가할수록 음향 밝기대조의 크기는 증가하는 경향을 보였으며, 20 dB drop angle(또는

Table 4 Optimization result by GA's

Condition		Generation : 30, individuals per a generation : 20
Optimized spatial variables	800 Hz	$B=0.4551$ m, $Ht=0.4271$ m
	2 kHz	$B=0.3000$ m, $Ht=0.4864$ m
	3 kHz	$B=0.3135$ m, $Ht=0.4181$ m

Table 5 Acoustic contrast controlled results under optimization of spatial variables

	Equal input			Acoustic contrast control under optimization of spatial variables		
	800 Hz	2 kHz	3 kHz	800 Hz	2 kHz	3 kHz
Contrast (dB)	30.3	38.7	43.0	40.2	46.9	58.0
20 dB drop angle	Not exist	Not exist	53°	Not exist	31.5°	23°

10 dB drop angle)은 감소하는 경향을 보였다. 이는 앞서 살펴본 이론적인 모의실험 결과의 경향과 동일함을 알 수 있다.

## 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 음향 밝기대조 제어를 적용하였다.

그 실제적인 예로 스피커 배열 시스템을 선택하여 Fig. 2(a)와 같이 공간변수를 이용하여 사용자 주위에 음향학적 밝은 공간을 그외 공간에는 어두운 공간을 정의하여 음향 밝기대조 제어를 적용하였다.

그 결과 공간 변수의 크기 변화가 제어 결과에 매우 중요한 영향을 미침을 확인하였으며(Figs. 4~8), 공간변수의 크기에 대한 최적화가 필요함을 확인하였다. 이를 반영하여 공간변수의 최적 크기를 찾기 위한 문제를 정의하였으며, 최적화 알고리즘으로 초기치 정보와 기울기 정보를 필요로 하지 않는 유전자 알고리즘을 사용하였다.

또한 실제 제어 효과를 확인하기 위해 모의실험과 실제 실험을 수행하였으며, 그 결과 공간 변수의 크

기를 최적화함으로써 제어를 하지 않은 경우에 비해 음향 밝기대조의 크기는 보다 크게 하면서 20 dB drop angle의 크기는 보다 작게 형성하여 제어 성능을 보다 개선할 수 있음을 확인하였다(Tables 3, 5, Figs. 12, 13).

## 후 기

이 연구는 교육부의 두뇌한국21(BK21) 프로그램의 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Choi, J.-W. and Kim, Y.-H., 2002, "Generation of an Acoustically Bright Zone with an Illuminated Region Using Multiple Sources", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, pp. 1695~1700.
- (2) Choi, J.-W., Kim, Y.-H. and Park, Y.-J., 2005, "Spatial Manipulation of Sound Using Multiple Source", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15 No. 12, pp. 1378~1388.
- (3) Choi, J.-W. and Kim, Y.-H., 2004, "Manipulation of Sound Intensity Within a Selected Region Using Multiple Sources", J. Acoust. Soc. Am., 116, pp. 843~852.
- (4) Fuller, C. R., Elliot, S. J. and Nelson, P. A., 1996, "Active Control of Vibration", Academic Press Limited.
- (5) Istvan L. Ver, Leo L. Beranek, 2006, "Noise and Vibration Control Engineering 2nd ed.", John Wiley & Sons.
- (6) Wright, S. E. and Vuksanovic, B., 1996, "Active Control of Environmental Noise", Journal of Sound and Vibration, Vol. 190, No. 3, pp. 565~585.
- (7) Meirovitch, L., 1997, "Principles and Techniques of Vibrations", Prentice Hall, pp. 232~249.
- (8) Zbigniew Michalewicz, 1996, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs, Springer-Verlag.
- (9) Belegundu, A. D. and Chandrupatla, T., 1999, "Optimization Concepts and Applications in Engineering", Prentice Hall, pp. 222~258.