

구조-음향 연성현상을 갖는 방사 방향을 가질 수 있는 방사체 설계방법

A Design Method for Direction Selective Structural-acoustic Coupled Radiator

서희선* · 김양한*

Hee-Seon Seo and Yang-Hann Kim

(2004년 12월 7일 접수 : 2005년 1월 14일 심사완료)

Key Words : Structural-acoustic Coupling(구조-음향 연성), Radiation Pattern(방사패턴), Multi-objective Optimization (다목적 최적설계), Weighting Method(가중치 방법)

ABSTRACT

This paper presents a design method for the structural-acoustic coupled radiator that can emit sound in the desired direction. A coupled system that has a finite space and a semi-infinite space separated by two flexible walls and an opening is considered. An objective function is selected to maximize radiation power on a main axis and minimize a side lobe level. To get initial values, prediction of a pressure distribution on field points and radiation pattern of the structural-acoustic coupling system is shown at a coupled-resonant frequency. Three different optimization methods are adapted to design the coupled radiator. Pressure and intensity distribution of the designed radiator is presented.

1. 서 론

박막이나 얇은 평판과 같이 구조물의 강성이 매우 작거나, 수중에서와 같이 매질의 임피던스가 큰 경우는 매질의 거동이 구조물의 거동에 영향을 주게 된다. 따라서 구조물의 거동과 매질의 거동을 동시에 고려하여야 하는 완전 구조-음향 연성 문제가 된다. 이러한 구조-음향 연성현상을 효율적으로 이용하기 위해서 음장과 유연한 경계로 구성된 연성계의 원인과 결과를 설명할 수 있는 메커니즘에 대해 많은 선행 연구가 수행되었다.^(1~11)

극단적인 예로서 유연한 구조물로 구성된 경계에

의해 분리된 두 개의 반 무한공간에 대한 연성 문제와 경계에 의해 분리된 유한 크기를 갖는 두 공간 사이의 연성 문제에 대해서는 이론적인 해가 비교적 잘 알려져 있다.^(1~4) 한편, 유한한 크기의 공간과 반 무한공간이 결합된 형태의 연성계에 대해서는 Kim과 Kim^(5~8)에 의해서 입구를 포함한 연성 구조물과 두 공간 사이의 연성 현상에 대해 홀로그래피 방법을 이용한 실험결과와 모드 해석 방법을 이용한 해석결과가 최근에 발표되었으며 이를 계기로 유한한 공간과 반 무한 공간 사이의 문제가 본격적으로 다루어지기 시작하였다. 한편, Seo와 Kim^(9~11)에 의해서 경계 값의 변화에 따른 연성 현상의 변화에 대한 고찰과 다양한 경계의 형상에 따른 내부 음장 및 외부 음장의 특성이 연구되었다. 이러한 연구들에서는 구조-음향 연성 현상을 이해하는데 그 연구의 목적이 있었으나, 연성 현상을 적극적으로 이용하여 방사체를 만드는 설계와 관련된 연구로 이어지지는 못하였다. 최근에 Seo와 Kim⁽¹²⁾에 의해서 방사체 설계에 관한 연구가

† 책임저자 : 정희원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : sonar@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220
* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

발표되었고, 이 논문은 참고문헌 (12)의 일부를 포함하고 있다.

이 연구는 구조-음향 연성현상을 이용하여 큰 방사 파워와 낮은 부엽 준위를 갖는 지향성 방사체를 설계하기 위한 연구로서 유한한 크기를 가지는 공간이 유연한 평판 구조물과 입구에 의하여 경계가 형성된 연성계를 대상으로 하고 있다. 수학적으로 취급이 간단한 Fig. 1과 같은 직사각 공동이 두 개의 평판과 입구를 갖는 경계에 의해 공동과 반 무한 공간으로 분리된 연성계를 이용하여 구체적으로 어떻게 연성에 의한 영향이 방사형태에 기여하는지 살펴보기로 하자. 외부 음장으로 큰 음압을 방사하고, 부엽준위를 최소화하는 다목적 함수를 선정하여 가중치 방법, ϵ -제한조건 방법, 최소-최대 방법을 적용하여 구한 최적화된 방사체 설계를 제시하고자 한다.

2. 문제 정의 및 수식화

2.1 문제정의

반사가 큰 음향학적으로 유한한 크기를 가지는 공간과 반 무한 공간이 입구 또는 유연 구조물을 통하여 서로 물리량을 주고 받는 일반적인 연성 현상을 모두 포함하는 Fig. 1과 같은 연성계에서 강한 연성현상을 이용하여 원하는 형태의 지향성 방사패턴을 설계할 수 있으면 보다 일반적인 형태의 구조-음향 연성계를 이용하여 다양한 형태의 방사패턴을 갖는 방사체를 설계할 수 있을 것이다.

일반성을 잃지 않으면서도 수학적 취급이 가능한 구조-음향 연성계를 위하여 다음과 같은 가정이 사용되었다. 먼저, 직사각 형태의 공동이 반 무한 공간의 강체 배플(rigid baffle)에 설치되어 있다. 단순화를 위하여 물리적 현상이 y 방향에 대해 독립이다. 또한 공동의 윗면에는 두 개의 평판과 입구로 구성된 경계가 부가되고 나머지 세 벽은 음향학적으로 강체벽 경계를 갖는다. 공동 위에 부가된 평판의 두께는 구조물의 강성에만 영향을 주고, 고려하는 주파수 범위 내에서 가장 짧은 파장에 비하여 매우 작다. 연성계는 공동의 바닥에 위치한 음원강도 Q 를 가지는 단극체적음원에 의해 가진 된다.

2.2 지배방정식과 경계조건

공동 내부와 외부의 음압에 대한 지배방정식은 조

화함수의 형태를 가정하면, 다음의 2차원 동차 파동방정식을 각각 만족한다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) p_{in, out}(x, z) = 0 \quad (1)$$

여기서 p_{in} 와 p_{out} 는 각각 공동 내부와 외부 음압을 의미하고 k 는 파수(wavenumber)를 의미한다. 유연한 구조물의 내부와 외부에 존재하는 압력의 차로 인한 외력을 포함하는 평판에 대한 지배방정식은 1차원 비 동차 파동방정식을 만족한다.

$$\left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + \kappa_i^4 \right) w_i(x) = -\frac{1}{D_i} \{ p_{in}(x, 0) - p_{out}(x, 0) \}, \quad i=1, 2 \quad (2)$$

여기서 w 는 구조물의 변위, κ 는 구조물 내에서 파수, D 는 평판의 굽힘 강성을 의미한다.

경계조건으로는 음원이 있는 바닥 면은 오일러 방정식을 이용하여 표현할 수 있고, 공동 내부에서는 x 축에 수직인 벽면에서 음압의 공간 미분이 0이 되는 조건을 적용하여 표현할 수 있다. 한편, 연속조건으로 입구에서 공동 내부와 외부의 압력과 속도에 대한 연속, 구조물의 법선 방향 속도는 공동 내부와 외부 유체의 입자 속도와 같아야 하는 조건이 있다. 이로부터 필요한 지배 방정식과 경계 조건을 모두 수학적으로 표현할 수 있다.

수학적으로 얻어진 지배 방정식과 경계 조건으로부터 해를 얻기 위해 연성 문제에서 잘 정립된 이론 중

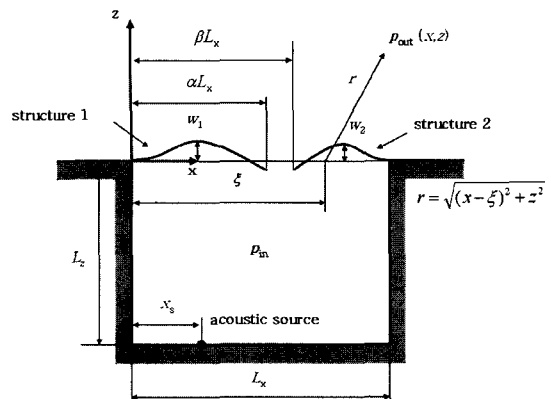


Fig. 1 The mathematical model of coupling system

하나인 모드 함수의 합을 이용하는 방법을 적용한다.^(4,8) x 방향의 경계 조건을 적용하면, 공동 내의 음압은 모드 조합의 형태인

$$p_{in}(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \psi_n(x) (A_n e^{-jk_{zn}} + B_n e^{jk_{zn}}) \quad (3)$$

로 표현할 수 있다. 여기서, $\psi_n(x)$ 는 공동 내의 x 방향으로 형성되는 모드 함수, k_{xn} 과 k_{zn} 은 각각 n 번째 모드에서 x 와 z 방향의 파수이다.

외부음장은 평판과 입구에 의해 연성되어 있으므로 평판의 속도와 공동 내/외부의 입자속도, 입구에서의 음압 및 입자 속도 연속 조건을 동시에 고려하여야 한다. 또한 외부음장은 $z=0$ 위치에 가상의 음원이 강제 배플에 놓여 있는 경우로 가정할 수 있다. 이로부터 키르호프-헬름홀츠 적분방정식을 이용하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$p_{out}(x, z) = -\int_0^{L_x} G_N(x, z | \xi, 0) \frac{\partial p_m(\xi, 0)}{\partial \xi} d\xi \quad (4)$$

유연한 구조물과 입구의 음압 분포를 모드 조합으로 표현할 수 있다고 가정하자. 경계조건을 모드조합을 이용하여 표현하고 모드 계수를 구하여 내/외부 음장 및 구조물의 변위를 구하는 방법은 참고문헌(8~11)에 잘 기술되어 있다. 여기서 참고문헌과 다른 것은 구조물이 박막이 아닌 평판으로 되어 있는 것이다. 이는 파동 방정식 형태로 표현되는 식 (2)의 차수가 2차에서 4차로 증가하고, 평판의 모드함수를 표현하는 방법이 복잡하여 수학적으로 그 표현 방법과 계산과정이 복잡할 뿐 그 물리적 의미 또는 수학적 전개과정은 동일하다.

3. 최적설계 및 고찰

3.1 다목적 최적화의 개념^(13~14)

이 논문은 방사파위를 최대와 부연준위를 최소로 하는 목적을 동시에 만족하는 방사체 설계를 원하는 경우이므로 여러 개의 목적을 동시에 만족하는 다목적 최적화 문제가 된다. 이를 수학적으로 표현하면

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \mathbf{f} = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})] \\ &\text{subject to } \mathbf{x} \in \Omega \end{aligned} \quad (5)$$

로 표현할 수 있으며, 다목적 최적화를 만족하는 설계변수($\mathbf{x}^* \in \Omega$)는 다음의 조건을 만족하는 벡터가 없을 때이다.

$$\begin{aligned} &f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x}^*) \text{ for all } i, i=1,2,\dots,m \\ &\text{and} \\ &f_i(\mathbf{x}) < f_i(\mathbf{x}^*) \text{ for at least one } i, 1 \leq i \leq m \end{aligned} \quad (6)$$

다시 말해 다목적 최적화의 결과는 다른 목적함수에 대한 조건이 나빠지지 않고는 개선된 해를 얻을 수 없는 해의 집합이라 생각할 수 있다. 이 목적함수를 만족하는 해를 연결한 곡선을 파레토 곡선(Pareto curve)이라 한다.

“그렇다면 다목적 최적화를 만족하는 점들의 집합인 파레토 곡선에서 하나의 해를 어떻게 선택할 것인가?”라는 문제에 놓이게 된다. 이상적으로는 모든 해를 구하고 이에 대해 공학적 직관력 또는 토론을 통해 가장 좋은 해를 선택하는 과정을 거쳐야 할 것이다. 그러나 무수히 많은 모든 해를 구하는 과정은 매우 복잡하고 시간이 많이 걸리는 일이므로 하나의 해를 정량적인 방법을 통해 구하는 과정이 필요하다.

파레토 곡선 상의 한 점을 얻기 위해 가장 많이 시도되는 방법으로 각각의 목적함수에 가중치(w_i)를 부여하는 방법(weighting method)이 있고, 이 문제는 수학적으로

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \mathbf{f} = w_1 f_1(\mathbf{x}) + w_2 f_2(\mathbf{x}) + \dots + w_m f_m(\mathbf{x}) \\ &\text{subject to } \mathbf{x} \in \Omega \end{aligned} \quad (7)$$

와 같이 표현된다. Fig. 2(a)는 두 개의 목적함수를 갖는 다목적 최적화 (최소화) 문제에서 가중치를 이용하여 최적해를 구하는 개념도이다. 목적함수 영역에서 각각의 가중치를 이용하여 얻어지는 최적해는 다목적 함수의 파레토 곡선의 임의의 위치가 된다. 가중치 방법의 장점은 다목적 함수를 쉽게 하나의 목적함수로 변환할 수 있다는 것이다. 단점으로는 가중치에 따라 결과가 매우 크게 변화하지만 가중치를 선정하는 합리적인 기준을 찾기가 어려워 경험적인 요소에 많이 의존한다는 것이다. 또한 가용 영역(feasible region)이 볼록 함수가 아닌 함수이면 완전한 파레토 곡선을 얻기 어려운 점이 있다.

파레토 곡선 상의 한 점을 얻는 또 다른 방법으로는 Fig. 2(b)에서와 같이 여러 개의 목적함수 중에서

하나를 목적함수로 선정하고 나머지 목적함수는 제한 조건으로 생각하는 방법이 있다. 이를 ϵ -제한조건 방법(ϵ -constraint method)이라 하며 그 수학적 표현은

$$\begin{aligned} &\text{minimize } f_1(\mathbf{x}) \\ &\text{subject to } f_2(\mathbf{x}) \leq c_2, \dots, f_m(\mathbf{x}) \leq c_m \\ &\mathbf{x} \in \Omega \end{aligned} \quad (8)$$

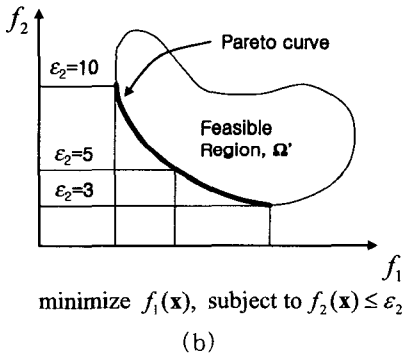
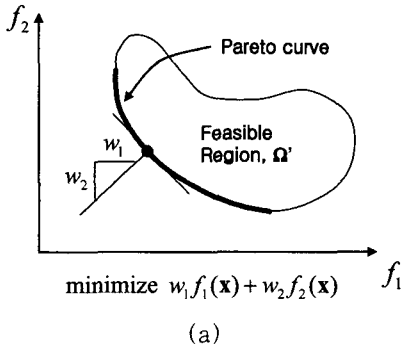


Fig. 2 Conceptual diagrams to get a single Pareto point: (a) weighting method; (b) ϵ -constraint method

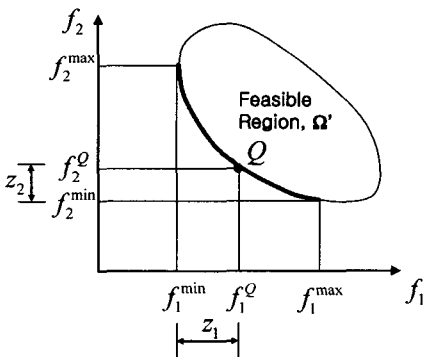


Fig. 3 Single best compromise Pareto point: mini-max method

이 되고, 이 경우도 마찬가지로 제한조건으로 선정한 목적함수의 한계인 c_i 를 선정하는 기준이 명확하지 않다는 것이다.

앞의 두 가지 방법이 가지는 단점을 보완하기 위해 사용되는 방법은 목적함수를 결정하는 추가적인 조건을 부여하는 것으로 가장 간단한 방법인 최소-최대 방법(mini-max method)을 살펴보자. 먼저, Fig. 3에서 보인 바와 같이 각 가용영역 내에서 각각의 목적함수의 최소값과 최대값을 f_i^{\min} 과 f_i^{\max} 라 하고 임의의 파레토 곡선상의 점에서 편차를 정의하자. 그런데 일반적인 경우 각 목적함수 별로 편차가 크게 나타나므로 다음의 식과 같이 각 목적함수의 최대-최소 범위에 해당하는 값으로 정규화한 값을 사용하게 된다.

$$z_i = \frac{|f_i(\mathbf{x}) - f_i^{\min}(\mathbf{x})|}{f_i^{\max}(\mathbf{x}) - f_i^{\min}(\mathbf{x})} \quad (9)$$

여러 목적함수에 대한 편차 중에서 가장 큰 값을 최소화하는 점을 찾아 이를 Q점이라 하면, 파레토 곡선 상에서 하나의 점을 선택할 수 있고, 이에 대한 변수 벡터 \mathbf{x}^* 를 구할 수 있다. 이를 수학적으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} &\min [\max \{ z_1, z_2, \dots, z_m \}] \\ &\text{subject to } \mathbf{x} \in \Omega \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 수치예제 및 고찰

Fig. 1에 보인 구조-음향 연성계에서 공동의 크기는 폭과 높이가 각각 0.16 m, 0.13 m이고, 평판의 경우는 2 mm 이하의 두께를 갖는 강판으로 고려하였다. 또한 단극 체적 음원은 공동의 바닥 $x_s = 0.07$ m의 위치에 두었다.

앞 장의 수학적 유도로부터 얻어진 공동 외부에 형성되는 최대 방사파워와 방사패턴은 구조물 및 입구 크기, 구조물의 강성, 가진 주파수에 대해 비선형 관계를 갖는다. 따라서 Fig. 4에서 제시한 바와 같이 주엽(main lobe)에서의 방사파워(P_{\max})를 최대를 하고, 부엽의 크기(SLL)를 최소로 하며, 주엽의 방향을 제한하여 지향성 방사패턴을 갖는 구조-음향 연성 구조물의 설계 문제는 여러 개의 목적함수를 갖는 제약조건이 있는 비선형 다목적 최소화 문제로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize } F(\mathbf{x}) = [SLL, -|P_{\max}|^2] \\ &\text{subject to : } \theta_1 \leq \theta_{\max} \leq \theta_2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 θ_{\max} 는 최대 방사 파워가 발생하는 각도를 표시하는 것으로서 θ_1 과 θ_2 는 주엽의 방향을 제한하는 제약조건 상한 및 하한이다. \mathbf{x} 는 설계 변수 벡터로서 구조물의 길이, 두께, 가진 주파수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\{x\}^t = \{\text{alpha, h, frequency}\} \quad (12)$$

앞 장에서 언급한 바와 같이 여러 목적함수를 동시에 만족하는 해는 무수히 많으며 그 중에서 하나의 해를 선택하기 위해 가중치 방법을 이용하여 문제를 변형하면

$$\begin{aligned} &\text{minimize } F(\mathbf{x}) = w_1 \times SLL - w_2 \times |P_{\max}|^2 \\ &\text{subject to : } \theta_1 \leq \theta_{\max} \leq \theta_2 \end{aligned} \quad (13)$$

이 된다. 여기서 w_1, w_2 는 부엽 준위 및 최대 방사 파워의 목적 함수에 대한 중요도를 조절하는 상수로서 같은 값을 적용하였다.

다음으로 설계자의 입장에서 하나의 목적함수에 대한 부엽준위의 값은 30 dB 이하이면 충분하고 방사파워를 최대로 하는 요구조건이 필요하다고 판단되면 ϵ -제한조건 방법을 이용하여 문제를 다음과 같이 변형하는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize } F(\mathbf{x}) = -|P_{\max}|^2 \\ &\text{subject to : } SLL \leq -30, \theta_1 \leq \theta_{\max} \leq \theta_2 \end{aligned} \quad (14)$$

다음으로 두 목적함수가 가지는 편차를 최소화하는

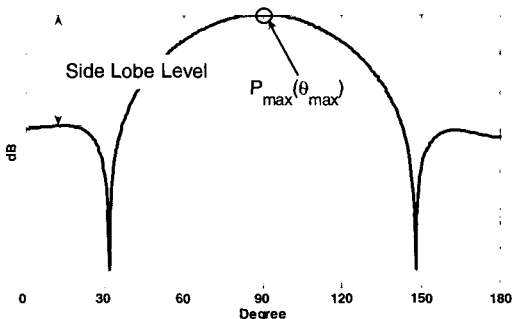


Fig. 4 Graphical description of the maximum pressure and side lobe level

방법인 최소-최대 방법을 이용하여 문제를 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\min [\max [f_1(SLL), f_2(-|P_{\max}|^2)]] \\ &\text{subject to : } \theta_1 \leq \theta_{\max} \leq \theta_2 \end{aligned} \quad (15)$$

그런데 일반적으로 비선형 최적화 알고리즘을 이용하여 설계를 하기 위해서는 초기 설계 변수를 필요로 한다. 0.68 mm의 두께를 갖는 유연한 구조물이 각각 0.4, 입구가 0.2의 공동의 x 방향 길이에 대해 정규화된 길이를 갖고, 큰 내부 음압이 발생하게 하고 이를 외부 음장으로 효율적으로 방사하게 하기 위해서 강한 구조 음향 연성 현상으로 인한 특성을 보이는 주파수(참고문헌 (11)의 Fig. 5 참조)를 초기 주파수(2530 Hz)로 선정하였다. 이에 대한 특성을 Fig. 5에 보였으며, 공동과 구조물이 강하게 연성되어 공동 내에는 모드가 형성되고, 구조물에는 큰 변위가 관측된다. 외부 음장의 경우 방사 면에 수직인 방향으로 지향성을 갖는 인텐시티가 형성된 것을 볼 수 있다. 이는 공동과 구조물이 강한 연성 작용을 일으켜 외부 음장으로 지향성 방사를 하는 예를 보인 것으로 구조-음향 연성 현상을 이용하여 지향성 방사 패턴을 갖는 방사체를 설계할 수 있는 가능성을 보인 것이다.

이를 초기값으로 하여 식 (13~15)로 표현된 3가지 다목적 최적화 방법을 적용하여 최대 방사파워와 최소 부엽준위를 갖는 구조-음향 연성 현상을 갖는

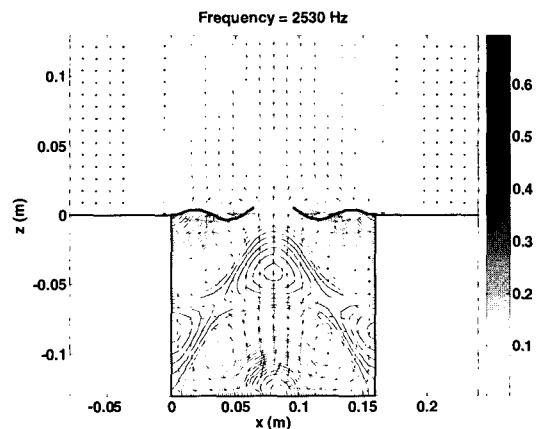


Fig. 5 Contour and vector plots of acoustic fields at the coupled 5th resonance frequency (2530 Hz), pressure and intensity are normalized by $\sqrt{\langle (p_{in})^2 \rangle}$ and $\langle (p_{in})^2 \rangle / 2\rho_0 c^2$ respectively

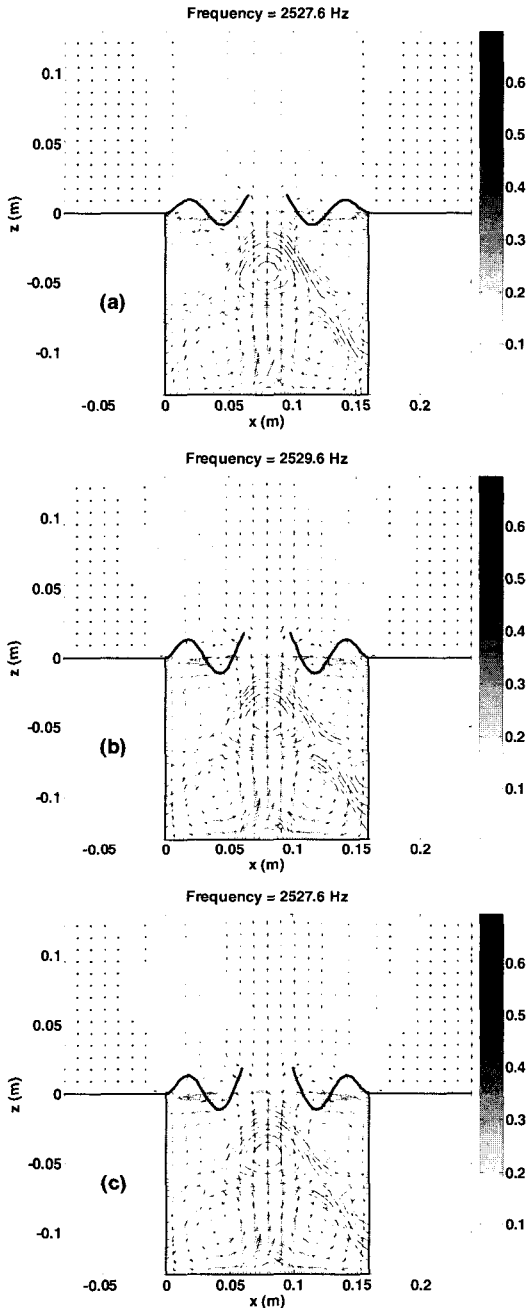


Fig. 6 Contour and vector plots of acoustic fields at (a) the weighted optimal output frequency, (b) the ϵ -constraint optimal output frequency and (c) dual-optimal output frequency

최적 방사체를 설계하였다. Fig. 6은 3가지 다목적 최적화 방법에 대한 음압, 인텐시티 및 변위의 분포를 보인 것으로 3 경우 모두 내부 및 외부 음장의 형태

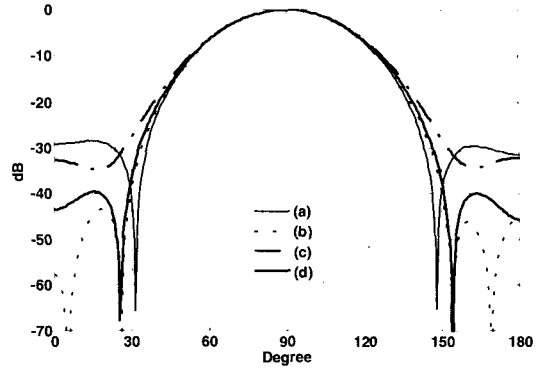


Fig. 7 Beam pattern of the coupled system at (a) the coupled 5th resonance frequency (2530Hz), (b) the weighted optimal output frequency, (c) the ϵ -constraint optimal output frequency and (d) dual-optimal output frequency

Table 1 Optimum variables and results

	Alpha	h (mm)	Freq.	P_{max}/P_{init}	SLL
Initial value	0.4	0.68	2530	1	-28.4
Weighting	0.405	0.695	2528	1.74	-43.3
ϵ -constraint	0.385	0.629	2530	2.21	-32.7
Mini-max	0.376	0.601	2528	2.15	-39.6

가 많이 변화하지 않은 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 7에 제시하고 있는 원거리음장에서 계산한 빔 패턴으로 살펴보는 경우는 3가지 다목적 최적화가 매우 다른 결과로 나타났음을 알 수 있다.

서로 다른 최적화 방법을 이용하여 구한 결과를 Table 1에 정리하였다. 가중치 방법의 경우는 초기치에 비하여 1.74배의 방사과워와 14.9 dB의 부엽준위 개선을 얻었다. ϵ -제한조건 방법의 경우는 부엽준위를 30 dB이하의 값으로 한정하였으므로 2.21배의 과워를 얻었지만 부엽준위는 4.3 dB 개선되었다. 마지막으로 최소-최대 방법의 경우는 방사과워는 2.15배, 부엽준위 개선은 11.2 dB의 값을 보여 앞의 두 가지 최적화 방법으로 얻은 결과의 중간 정도의 값을 보였다.

4. 결 론

강한 구조-음향 연성 현상을 이용하여 지향성 방사 패턴을 갖는 방사체를 설계하기 위해 입구와 두 개의

평판으로 구성된 연성계를 해석하였다. 공동과 구조물이 강하게 연성된 주파수에서 음압의 공간 분포, 능동 인텐시티의 흐름을 살펴보았다. 이를 초기값으로 하고 방사음압을 최대로 하며 부엽준위를 최소화하는 다목적 최적화 문제를 가중치 방법, ϵ -제한조건 방법 및 최소-최대 방법을 이용하여 초기값에 비하여 최대음압은 각각 1.74, 2.21, 2.15배 증가하고, 부엽준위는 14.9, 4.3, 11.2 dB 감소하는 특성을 갖는 구조-음향 지향성 방사체 설계하였다. 이 연구에서 제시한 방법을 이용하면 구조물의 공간 분포에 따라 달라지는 외부음장의 형태 즉, 원하는 형태의 방사패턴을 갖고 방사 파워를 최대화하는 구조-음향 연성현상을 이용한 방사체를 설계할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구의 일부는 교육부의 두뇌한국 21 (BK21) 사업의 지원으로 수행되었을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Morse, P. M., 1966, "Transmission of Sound Through a Circular Membrane in a Plane Wall," J. Acous. Soc. Am., Vol. 40, No. 2, pp. 354~366.
- (2) Mason, V., 1966, "On the Coupling of a Membrane with an Incident Sound Wave," J. Sound Vib., Vol. 4, No. 1, pp. 9~17.
- (3) Morse, P. M. and Ingard, K. U., 1968, "Theoretical Acoustics," pp. 679~688, McGraw-Hill.
- (4) Dowell, E. H., Gorman, G. F. and Smith, D. A., 1977, "Acoustoelasticity : General Theory, Acoustic Natural Modes and Forced Response to Sinusoidal Excitation, Including Comparisons with Experiment," J. Sound Vib., Vol. 52, No. 4, pp. 519~542.
- (5) 김시문, 김양한, 1997, "실험적 방법에 의한 평판-공동 연성계의 음장 가시화," 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 662~668.
- (6) Kim, S.-M. and Kim, Y.-H., 2001, "Structural-acoustic Coupling in a Partially Opened Plate-cavity System: Experimental Observation by Using Nearfield Acoustic Holography," J. Acous. Soc. Am., Vol. 109, No. 1, pp. 65~74.
- (7) 김시문, 김양한, 1999, "부분적으로 개방되어 있는 2차원 박막-공동 연성계의 임피던스 해석," 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 742~747.
- (8) S.-M. Kim and Y.-H. Kim, 2002, "Solution of Coupled Acoustic Problems: a Partially Opened Cavity Coupled with a Membrane and a Semi-infinite Exterior Field," J. Sound Vib., Vol. 254, No. 2, pp. 231~244.
- (9) 서희선, 김양한, 2004, "구조-음향 연성계의 경계값 변화에 따른 방사음 변화," 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권 제 7 호, pp. 604~611.
- (10) Seoand, H. -S. and Kim, Y. -H., 2004, "Transmission from Reverberant Field to Unbounded Space," Proceedings of the ICA2004 Conference, pp. 937~940.
- (11) 서희선, 김양한, 2004, "다양한 경계 형상에 따른 구조-음향 연성계의 음향특성," 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권 제 8 호, pp. 718~725.
- (12) 서희선, 김양한, 2004, "구조-음향 연성현상을 이용한 지향성 방사패턴 설계," 한국소음진동공학회, 추계학술대회논문집, pp. 751~754.
- (13) Belegundu, A. D. and Chandrupatla, T. R., 1999, "Optimization Concepts and Applications in Engineering", Ch. 11, Prentice-Hall.
- (14) Miettinen, K. M., 1999, "Nonlinear Multi-objective Optimization", Part II, Kluwer Academic Publishers.