

# 최적빔 설계를 위한 가중회로 구성기술 연구

최낙진, \*임준석, 김현석, 성광모  
서울대학교 전기컴퓨터공학부, \*세종대학교 전자공학과

## Research of weighting circuits for the design of optimum beamforming

Nakjin Choi, \*Jun-Seok Lim, Hyun-Seok Kim, Koeng-Mo Sung

School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University  
\*Department of Electronics Engineering, Sejong University

nakjin@acoustics.snu.ac.kr, jslim96@chollian.net, imp216@acoustics.snu.ac.kr,  
kmsung@acoustics.snu.ac.kr

※ 본 연구는 수중음향특화연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

### 요약

수중 음향 탐지 시스템에서 빔 형성 기법은 탐지 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 최적의 빔 설계는 오랫동안 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. 실제로 최적의 빔 형성기를 구현할 때에는 각각의 센서에 대한 특성 고려와 파워를 효율적으로 전달하기 위한 정합회로의 설계가 필수적이다. 이전의 논문에서는 BeamCAD Tool을 이용한 최적 가중치의 계산, 센서 임피던스 측정 데이터와 Sensor Modeling Tool을 이용한 등가회로 모델링 그리고 Impedance Matching Tool을 이용한 정합회로 설계 기법에 대해서 소개하였다. 본 논문에서는 이러한 기법들과 함께 ABCD 전송 파라미터를 이용한 센서 가중치 보정 기법을 소개한다. 그리고 이러한 여러 기법들을 이용하여 최적빔 설계를 위한 가중회로를 구성하는 방법에 대해서 논의한다.

### 1. 서론

수중에서 정보를 주고받는 효율적인 수단으로 초음파를 이용한다. 소나 배열을 위한 빔 패턴을 설계할 경우 빔폭(beam width), 부엽준위(sidelobe level), 지향성(directivity) 등 사용목적에 가장 중요한 특성을 기준으로 최적 합성 방법을 선택하여 개별소자의 가중치를

부여하게 된다. 최적빔 설계 후, 개별소자에 가중치를 부여하기 위해서는 전기적인 가중회로의 구성이 필요하다. 이런 가중회로 구성에서 최대의 전기에너지를 초음파 에너지로 변환하기 위해서는 정합회로의 최적 설계가 필수적이다. 또한 정합회로를 구성하기 위해서는 초음파 진동자를 전기 회로로 모델링하는 것이 필요하다. 그리고, 마지막으로 개별 센서 특성과 상호방사 영향을 고려하여 가중치를 보정하는 것이 중요하다.

이전의 연구에서는 초음파 진동자의 임피던스를 직접 측정하여 전기적인 등가모델을 구하는 방법이 제안되었고, 이를 S/W로 구현한 등가회로 모델링 Tool도 소개되었다.[1] 또한 주파수 영역에서 측정된 센서의 임피던스로부터 직접 정합회로의 소자값들을 구해내는 알고리즘과 이를 기초로 일련의 작업을 일괄 작업화한 설계프로그램이 소개되었다.[2]

본 논문에서는 개별 센서 특성 및 상호방사 임피던스를 고려하기 위해서 ABCD 전송 파라미터 모델을 이용하였다.[3] 이러한 등가회로 모델링, 정합회로 설계, 그리고 ABCD 전송 파라미터 모델을 이용한 가중치 보정을 통하여 효과적으로 최적빔 설계를 위한 가중회로를 구성하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 초음파 변환기의 상호작용

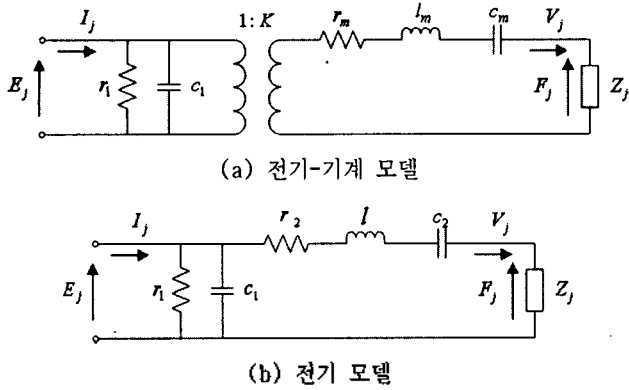


그림 2.1 초음파 변환기 등가회로 모델

일반적으로, 초음파 트랜스듀서는 그림 2.1 (a)와 같이 입력 전압과 전류 그리고 출력 힘과 속도를 연관시켜주는 다음과 같은 ABCD 변환 행렬로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_j \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_j & B_j \\ C_j & D_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_j \\ V_j \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서,  $K$ 는 전기기계 변환율을,  $r_m$ ,  $l_m$ ,  $c_m$ 은 각각 기계적인 저항, 질량 그리고 탄성을 나타낸다.  $Z_j$ 는 방사임피던스이다. 그림 2.1(a)와 같은 전기-기계 모델은 그림 2.1(b)와 같은 전기 모델로 등가화할 수 있다.

그림 2.1(b)와 같은 초음파 변환기 등가모델은 키르히호프 전압법칙에 의해서, 다음과 같이 정리된다.

$$-E_j + V_j \left( r_2 + j\omega l + \frac{1}{j\omega c_2} \right) + F_j = 0$$

즉,

$$\begin{aligned} E_j &= F_j + V_j \left( r_2 + j\omega l + \frac{1}{j\omega c_2} \right) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & \left( r_2 + j\omega l + \frac{1}{j\omega c_2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_j \\ V_j \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

식 (2.1), (2.2)로부터  $A_j$ ,  $B_j$ 를 구하면 다음과 같다.

$$A_j = 1, \quad B_j = r_2 + j\omega l + \frac{1}{j\omega c_2} \quad (2.3)$$

상호방사임피던스에 의해  $j$ 번째가 아닌 다른 초음파

변환기들이  $j$ 번째 초음파 변환기의 임피던스에 영향을 미친다. 이것을 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{ZV}, \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \cdots & Z_{1,N} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \cdots & Z_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N,1} & Z_{N,2} & \cdots & Z_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}$$

이때, 식 (2.1)에서  $E_j$ 와  $F_j$ ,  $V_j$ 의 관계를 행렬식으로 나타내면 식 (2.5)와 같이 된다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{AF} + \mathbf{BV}, \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & A_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} B_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & B_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & B_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식 (2.4), (2.5)로부터  $V$ 를 소거하면,  $E$ 와  $F$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = [\mathbf{A} + \mathbf{BZ}^{-1}] \mathbf{F} \quad (2.6a)$$

또는,

$$\mathbf{F} = \mathbf{Z}[\mathbf{AZ} + \mathbf{B}]^{-1} \mathbf{E} \quad (2.6b)$$

행렬  $A$ ,  $B$ 는 Sensor Modeling Tool에 의해서 구해진다. 그리고, 벡터  $F$ 는 BeamCAD의 최적 빔형성기에 의해 구해지는 가중치 값이다.

식 (2.6)에서 알 수 있는 바와 같이, ABCD 변환 행렬을 사용해서 초음파 변환기의 등가회로를 모델링하면, 변환기 상호간의 방사임피던스의 영향 뿐만 아니라, 개별 변환기 오차의 영향을 없애면서 최적 빔형성기를 구현할 수 있다.

## 3. 가중회로 설계 및 구성 과정

### 3.1 최적 가중치 계산(BeamCAD Tool)

소나배열을 설계할 때, 설계자는 원하는 빔패턴에 해당하는 최적 가중치를 계산하여야 한다. BeamCAD Tool

을 이용하면 배열의 형태, 원하는 부엽준위레벨(SLL), 조향각도(steering angle) 등의 빔패턴 정보를 가지고 최적의 빔패턴에 해당하는 최적 가중치를 계산해 낼 수 있다. 그림 3.1-1은 최적 가중치를 계산하는 개념도를 나타낸다.

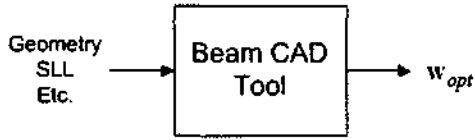


그림 3.1-1. 최적 가중치 계산(BeamCAD Tool)

그림 3.1-2는 여러 가지 최적화 방법으로 최적 가중치를 계산해 내는 BeamCAD Tool에 대한 그림이다.

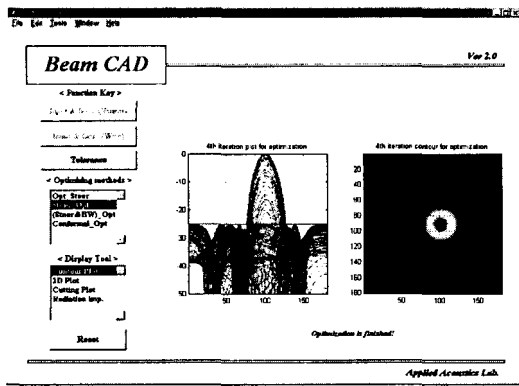


그림 3.1-2 BeamCAD Tool

### 3.2 센서 임피던스 측정

최적 가중치를 계산 한 후에는 그림 3.2와 같이 사용할 주파수에서의 개별 초음파 변환기에 대한 임피던스를 측정한다. 이렇게 측정된 센서 임피던스 값은 등가회로 모델링 및 정합회로 설계에 사용된다.

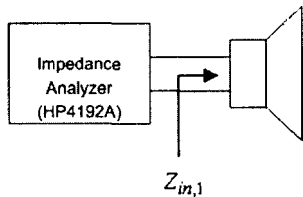


그림 3.2 센서 임피던스 측정

### 3.3 등가회로 모델링(Sensor Modeling Tool)

개별 센서에 대한 정합회로를 설계하고 상호방사 영향을 고려하고 위해서는 센서에 대한 전기적인 등가회로를 얻을 수 있어야 한다. 그림 3.3-1은 3.2절에서 측정된 센서 임피던스로부터 Sensor Modeling Tool을 이용하여 각각의 센서에 대한 등가회로 파라미터 값을 구

하는 개념도를 나타낸다.

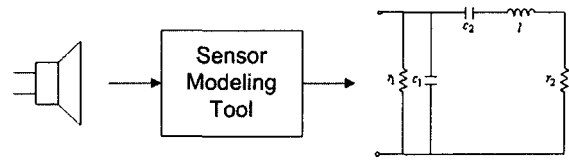


그림 3.3-1 등가회로 모델링

그림 3.3-2는 Sensor Modeling Tool에 대한 그림이다.

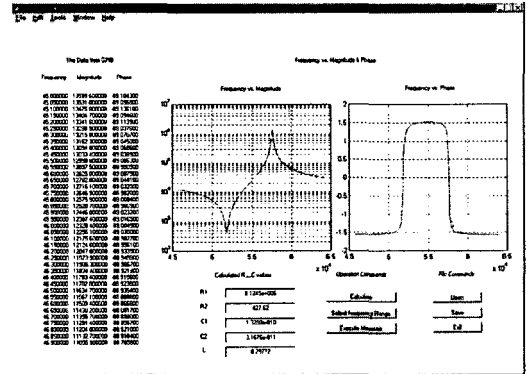
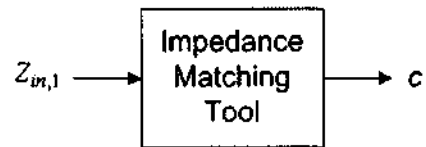


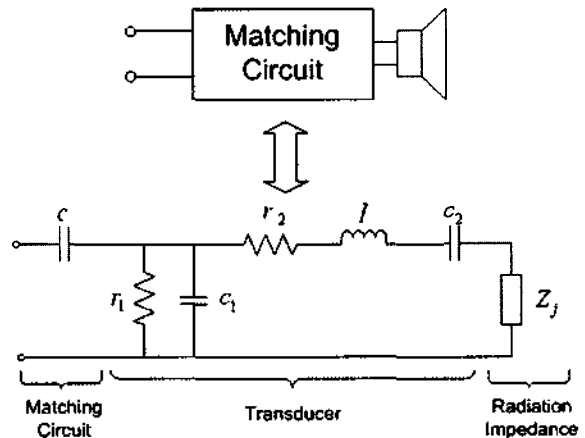
그림 3.3-2 Sensor Modeling Tool

### 3.4 정합회로 설계(Impedance Matching Tool)

등가회로 모델링과 마찬가지로 측정된 센서 임피던스로부터 개별 센서에 대한 정합회로를 그림 3.4-1과 같이 설계해야 한다. 그림 3.4-2는 Impedance Matching Tool에 대한 그림이다.



(a) 정합회로 설계



(b) 정합회로 설계 후 전체 등가회로

그림 3.4-1. 정합회로 설계

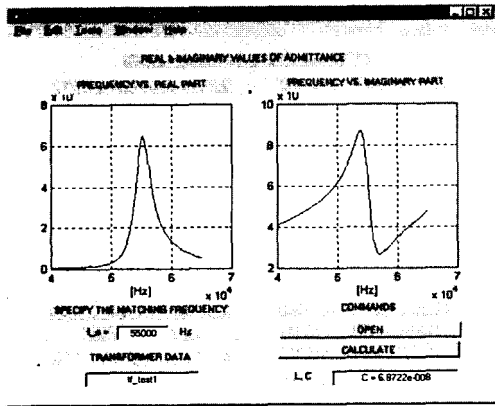


그림 3.4-2. Impedance Matching Tool

### 3.5 ABCD 전송 파라미터 구하기

2장에서 설명한 것처럼 ABCD 전송 파라미터를 이용해서 개별 센서 특성과 상호방사 영향을 고려할 수 있다. 그림 3.5-1은 개별 센서가 정합회로를 포함하고 있을 때의 동가회로를 의미하여 이때의 ABCD 파라미터 값은 식 (3.1), (3.2)와 같다.

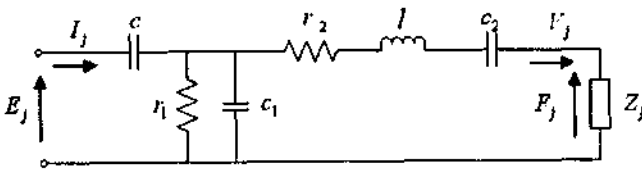


그림 3.5-1 정합회로를 포함한 초음파 변환기 동가회로

$$\begin{bmatrix} E_j \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_j & B_j \\ C_j & D_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_j \\ V_j \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$A_j = \frac{1}{j\omega c} + Z_a, \quad B_j = \frac{Z_a + Z_b}{j\omega c} + Z_a Z_b \quad (3.2)$$

여기서,

$$Z_a = \frac{1}{j\omega c_1 + \frac{1}{r_1}}, \quad Z_b = r_2 + j\omega l + \frac{1}{j\omega c_2}$$

### 3.6 개별 센서 및 상호방사, 정합회로 고려

3.5절에서 구해진 ABCD 전송 파라미터 값과 상호방사 임피던스를 이용하면, 2장에서 설명한 것처럼 ABCD 전송 파라미터를 이용하여 센서 개별 특성과 상호방사 영향을 식 (3.3)과 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{E} = [\mathbf{A} + \mathbf{BZ}^{-1}]\mathbf{F} \quad (3.3)$$

### 3.7 전체 흐름도

최적값 설계를 위한 가중회로를 설계하는 방법(3.1절~3.6절)을 그림 3.7-1에 도시화하였다. 이와 같은 순서로 가중회로를 구성하면 센서의 특성이나 상호방사 영향을 고려하면서 최적값을 형성할 수 있다.

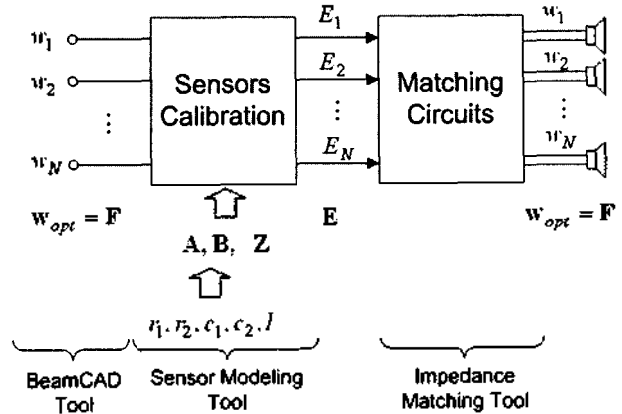


그림 3.7-1. 가중회로 구성 전체 흐름도

### 4. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 가중회로 설계 시에 개별 센서 특성, 상호방사 영향을 고려하기 위해서 ABCD 전송 파라미터를 이용하였다. 또한 기존에 제작된 Sensor Modeling Tool, Impedance Matching Tool을 ABCD 전송 파라미터와 함께 최적값 형성을 위한 가중회로 설계시 어떻게 적용하는지 소개하였다. 이와 함께 센서 임피던스를 이용한 동가회로 모델링, 정합회로 설계 등을 통하여 개별 센서 특성 및 상호방사 임피던스 영향을 없애면서 최적값 설계를 위한 가중회로를 구성하는 방법을 소개하였다.

#### 참고문헌

1. 최낙진, 송준일, 성평모, 전병두, 임준석, "정합회로 설계를 위한 초음파 진동자 Modeling S/W Tool 구현," 한국음향학회 학술대회 논문집, 제19권, 제2(s)호, pp.341~344, 2000.
2. 최낙진, 송준일, 임준석, 성평모, "임피던스 정합회로의 설계를 위한 Design S/W Tool 구현," 한국음향학회 하계 학술대회 논문집, Vol. 20, No.1(s), pp. 841~844, 2001.
3. Christian Audoly, Some aspects of acoustic interactions in sonar transducer arrays, J. Acoust. Soc. Am. 89 (3), pp. 1428~1433, March 1991