

# 스피커 어레이를 이용한 빔형성 가중회로 구성실험에 관한 연구 II

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

## Research of weighting circuits for beamforming using speaker array II

Jeong-Hun Seo, Nakjin Choi, \*Jun-Seok Lim, Koeng-Mo Sung  
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University  
\*Department of Electronics Engineering, Sejong University

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

\* 본 논문은 수중음향특화연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

### 요약

수중 음향 탐지 시스템에서 빔 형성 기법은 오랫동안 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. 빔 형성 기법은 탐지성능에 직결되기 때문에 최적의 빔 설계는 중요한 문제가 된다. 그리고 최적의 빔 형성을 구현하기 위해서는 개별 센서에 대한 가중회로의 구성이 필수적이며, 가중회로를 구성하기 위해서는 개별 센서에 대한 등가회로 모델링과 정합회로 설계가 필수적이다. 이전의 연구에서는 센서 등가회로 모델링 Tool과 정합회로 디자인 Tool 각각의 구성과 사용방법에 대해서 소개하였다. 이 두 가지 Tool을 모두 이용하여 센서 등가회로 및 정합회로를 모델링하였고, 이를 바탕으로 실제 가중회로를 구현하였다. 가중회로는 정합회로와 트랜스포머로 구성된다. 본 논문에서는 이와같이 구성된 가중회로와 스케일 모델에 맞게 제작된 스피커 어레이를 이용하여 빔형성 실험을 하였으며, 그 결과를 이론치와 비교하였다. 이것을 바탕으로 BeamCAD, 센서 등가회로 모델링 Tool 그리고 정합회로 디자인 Tool로 이루어진 소나 센서 디자인 Tool의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

초음파 시스템에서 최대의 전기에너지를 초음파 에너지로 변환하기 위해서는 정합회로의 최적설계가 필수적

이다. 또한 정합회로를 구성하기 위해서는 초음파 진동자의 전기회로로 모델링하는 것이 필요하다.

이전의 연구에서는 초음파 진동자의 임피던스를 직접 측정하여 신호처리에서 사용하는 시스템 인식의 방법으로 등가의 모델을 구하는 방법과 S/W로 구현한 등가회로 모델링 Tool도 소개되었다.[2][3] 또한 주파수 영역에서 측정한 센서의 임피던스로부터 직접 정합회로의 소자값을 구해내는 알고리즘과 이를 기초로 일련의 작업을 일괄 작업화한 설계 프로그램이 소개되었다.[4][5]

실제보다 작은 공간에서도 효과적으로 실제와 유사한 wave propagation 연구를 가능하게 해주는 acoustical scale model이 있다. 이 모델을 이용하면 적은 경비와 장소로도 실제와 유사한 측정결과를 얻을 수 있다. [6]

본 논문에서는 acoustical scale model을 이용하여 공기 중에서의 스피커 어레이로 수중음향 어레이를 모델링 하였으며, 정합회로 모델링에 있어서 반복적인 커패시터 값의 보정을 통해 좀더 이상치에 가까운 빔패턴을 측정하였다.

### 2. Acoustical scale model

Acoustical scale model을 이용하면 넓은 공간에서 수행한 실험과 같은 결과를 작은 공간에서 손쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있다.[6] 그림 2-1에서와 같이  $a=1.9$  cm인 초음파 센서가 35.3kHz 중심주파수에서 사용된다

고 가정하자. 이때 직경  $a'=3.5\text{cm}$ 인 스피커를 공기 중에서 사용해서 수중음향 센서와 같은 효과를 내기 위해서는  $3.728\text{kHz}$ 를 사용하여야 한다.

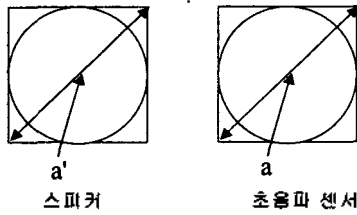


그림 2-1. Scaling Model

이와 같이, acoustical scale model을 이용하면, 적은 비용으로 손쉽게, 수중에서의 가중회로를 이용한 빔포밍 실험을 공기 중의 스피커 어레이를 이용하여 할 수 있다.

### 3. 가중회로 디자인

#### 3.1 동가회로 모델링 Tool

초음파 진동자 시스템 설계에서 정합 회로 구성을 위해서는 진동자 동가회로에 대한 정확한 추정이 필수적이다. 동가회로를 구하는 여러 가지 방법 중 한 방법으로 임피던스 측정 장치로부터 얻은 데이터를 바탕으로 시스템 인식 방법에 의해서 동가의 모델을 구하고 이로부터 전기회로화된 모델을 구현하는 방법이 있다.[2][3]

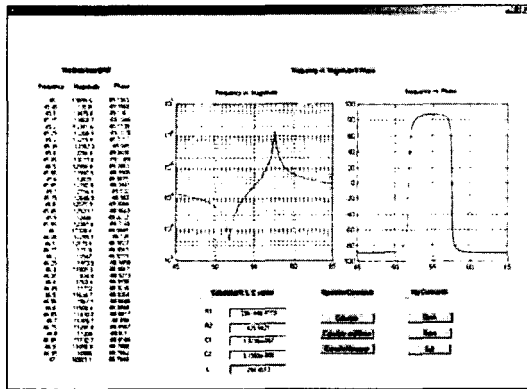


그림 3.1-1. 동가회로 모델링 Tool

이 방법으로 구현한 Tool이 그림 3.1-1이다. 동가회로 모델링 Tool(그림 3.1-1)의 "Open" 버튼을 눌러서 측정된 임피던스를 읽는다. 그런 후에 "Calculate" 버튼을 누르면 동가회로 R, L, C 값들이 자동으로 계산되어서 그 값들이 GUI에 출력된다.

그리고 나서 그림 3.2-2와 같이 원하는 타입의 정합회로 모델을 선택하고 사용하고자 하는 주파수와 소자값의 범위를 지정한다. 그런 후에 계산을 통해 그림 3.2-1과 같이 정합회로의 소자값들을 얻을 수 있다.

#### 3.2 정합회로 디자인 Tool

정합회로 디자인 Tool에서는 그림 3.2-1에서와 같이 주파수 영역에서 측정된 임피던스를 입력으로 받는다.

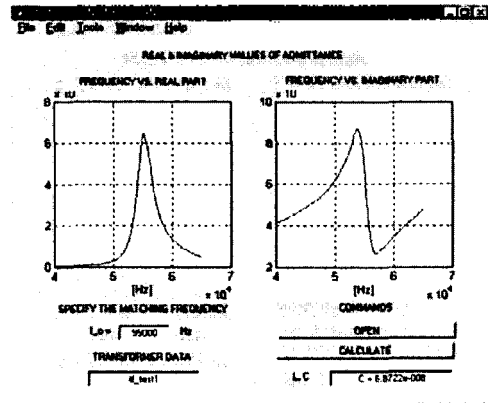


그림 3.2-1 측정된 임피던스를 불러들임

그리고 원하는 타입의 정합회로 모델을 선택하고 사용하고자 하는 주파수와 소자값의 범위를 선택하면 정합회로의 소자값을 얻을 수 있다.

### 4. 가중회로 구성실험

#### 4.1 실험환경

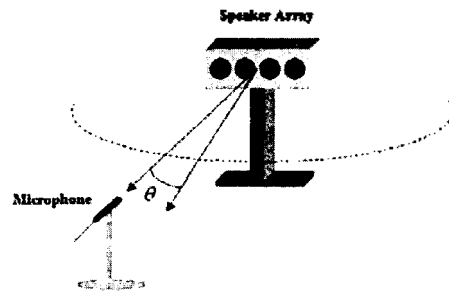


그림 4.1-1 빔패턴 측정 개념도

본 논문에서는 그림 4.1-1과 같이 빔패턴을 측정하였다. 마이크와 스피커의 거리는  $1.6\text{m}$ 이며, 스피커의 정면을 기준으로  $\pm 70^\circ, \pm 60^\circ, \pm 50^\circ, \pm 40^\circ, \pm 30^\circ, \pm 25^\circ, \pm 20^\circ, \pm 15^\circ, \pm 10^\circ, \pm 5^\circ, 0^\circ$ 에서의 빔패턴을 측정하였다.

Scale model로 에서 구한  $f_c=3.728\text{Hz}$  정현파로 스피커 어레이를 구동하였으며, 스피커 간의 간격은 반파장으로 하였다. 실험은 무향실이 아닌 일반 시청실에서 수행하였다. 반사음의 효과를 배제하기 위해서 빔패턴을 구할 때, 수신된 신호의 앞부분만을 고려하였다.

#### 4.2 실험결과 및 분석

정합회로를 구성하기 위해 주파수  $f_c=3,728\text{Hz}$ 에서 스피커의 임피던스를 측정하고 최대 파워를 얻기 위해 임피던스의 허수부를 0으로 만들기 위한 정합회로의 커패

시터 값을 구한다. 스피커의 임피던스는 그림 4.1과 같이 측정할 수 있고, 커패시터의 값을 구한 후 구성한 회로는 아래의 그림 4.2와 같다.

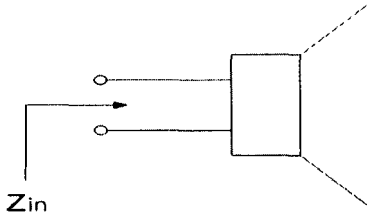


그림 4.1 스피커의 임피던스

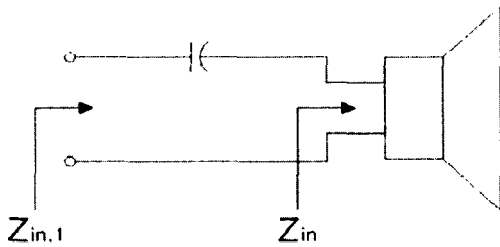


그림 4.2 정합회로 구성도

위의 그림과 같이 구성된 정합회로에서 필요한 커패시터는 각 스피커마다 그 값이 조금씩 틀리는데, 이는 각 스피커의 특성이 작으나마 조금씩 차이가 나기 때문이다. 이 때 필요한 각 스피커마다 정합회로에 필요한 커패시터의 값은 다음 표 4.1과 같다.

일반적으로 널리 사용되는 커패시터를 병렬로 조합하여 표 4.1의 이상적인 커패시터 용량과 흡사하도록 하였다. 이것이 표 4.2와 같다. 표 4.2에서 구한 오차는 아래의 식(1)과 같이 계산할 수 있다. 식(1)에서  $C_{ideal}$ 은 표 4.1에 표시된 커패시터의 값을,  $C_{nominal}$ 은 표 4.2에 표시된 커패시터의 값을 나타낸다.

$$\text{오차}(\%) = \left| \frac{C_{ideal} - C_{nominal}}{C_{ideal}} \right| \times 100 \quad (1)$$

스피커	임피던스	C의 용량( $\mu\text{F}$ )
1	$7.5410 + 1.9603i$	21.795
2	$7.5410 + 1.9603i$	24.926
3	$7.3279 + 1.8736i$	22.804
4	$7.5973 + 1.9261i$	22.182

표 4.1 각 스피커 임피던스와 임피던스의 허수부를 없애기 위한 커패시터의 용량

스피커	1	2	3	4
C의 Nominal 용량( $\mu\text{F}$ )	22.2	24.2	22.2	22
오차(%)	1.86	2.91	2.65	0.82

표 4.2 정합회로에 필요한 커패시터의 이상적인 용량과 nominal 값과의 오차

기본적인 정합회로를 구성하고 난 후 다시 한번 전체의 임피던스를 측정하고 추가적으로 연결할 커패시터의 값을 계산하고, 이 값에 따라 새로운 정합회로를 구성하게 된다. 계산한 커패시터의 값이 (-)값이 나온 경우는 처음 정합회로에 비해 커패시터의 용량이 작아져야 되므로 몇 개의 커패시터를 조합해서 전체적인 값과 가장 비슷한 값을 갖도록 조정하고, (+)값이 나온 경우는 적당한 값의 소자를 병렬 연결하여 커패시터의 용량을 맞춰주는 방식으로 추가 구성을 하였다. 표 4.3은 최종 정합회로와 스피커 전체의 임피던스를 나타내고, 표 4.4는 최종 정합회로의 임피던스와 최종적으로 결정된 커패시터의 값과 초기의 이상적인 값과의 오차, 그리고 그에 따른 임피던스의 오차를 나타낸다.

스피커+정합회로 순서	임피던스
1	$8.0735 - 0.0423i$
2	$8.3739 - 0.0339i$
3	$8.0423 - 0.0634i$
4	$8.5247 - 0.0693i$

표 4.3 정합회로를 스피커에 연결했을 때의 전체 임피던스

스피커	1	2	3	4
소자( $\mu\text{F}$ )	21.32	24.42	22.04	21.40
소자오차(%)	2.18	2.03	3.35	3.53
임피던스(%)	0.52	0.04	0.79	0.81

표 4.4 정합회로에 필요한 커패시터 용량과 최종 사용한 커패시터의 용량 오차

표 4.4에서 계산한 소자의 오차는 식(1)과 같이 계산할 수 있으며 임피던스의 오차는 임피던스의 크기에 대한 허수부의 크기로 정의하여 계산하였다. 그 계산식은 아래의 식(2)와 같다.

$Z(n) = A + jB$  일 때,

$$\text{임피던스 오차(\%)} = \frac{|B|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \times 100 \quad (2)$$

이러한 정합회로 구성을 통해 우리가 얻고자 하는 빔패턴에 근접해 가는 것을 알 수 있다. 그림 4.3은 정합회로를 고려하지 않고 빔패턴을 측정했을 때의 그래프이고, 그림 4.4는 정합회로를 구성한 후의 빔패턴의 그림이다. 그림에서도 쉽게 알 수 있지만, 정합회로를 구성한 후에는 이상적인 빔패턴과 측정된 빔패턴이 1dB 이내의 오차 정도만을 가짐을 확인할 수 있다.

위의 방법과 동일하게 트랜스포머와 커패시터 두 소자를 사용해서 정합회로를 구성할 수 있는데, 그 구성은 그림 4.5와 같다. 그림 4.5와 같은 경우에도 커패시터만 사용해서 정합회로를 구성한 경우와 같이 커패시터 값의 보정이 필요한데, 보정하는 방법은 위에서 설명한 것과 같은 방식으로 이루어진다.

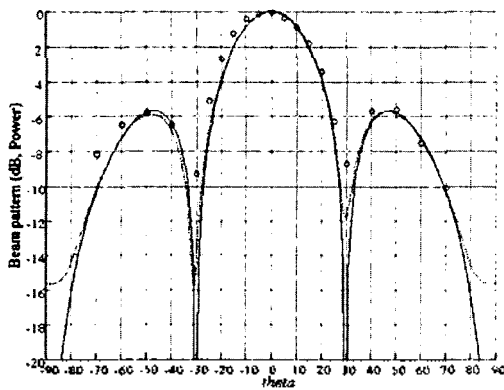


그림 4.3 정합회로를 고려하지 않았을 때의 빔패턴 (실선 - 이상치, 점선 - 예측치, ° - 측정치)

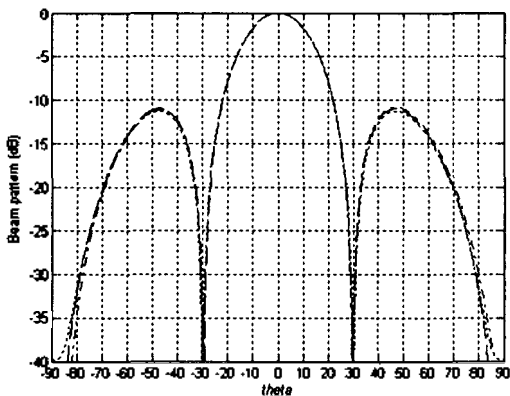


그림 4.4 정합회로를 고려했을 때의 빔패턴 (—: 이상치, - - : 예측치, ···: 측정치)

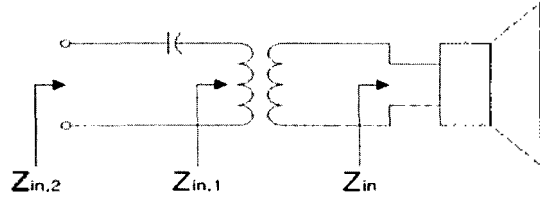


그림 4.5 트랜스포머와 커패시터를 이용한 정합회로 구성도

## 5. 결론

본 논문에서는 센서 등가회로 모델링 Tool과 정합회로 디자인 Tool 모두를 이용하여 센서 등가회로 및 정합회로를 모델링하였고, 이를 바탕으로 실제 가중회로를 구현하였다. 또한 실험을 위해 물-공기의 상사효과를 가정하였으며, 공기 중에서 스피커 어레이를 이용하여 빔 형성을 하였다. 또한 커패시터와 트랜스포머를 이용한 정합회로를 구성함으로써 원하고자 하는 빔패턴을 좀 더 정확히 발생시킬 수 있었다. 이 정합회로 구성에 있어서 반복적인 커패시터 값의 보정은 간단하지만 성능이 좋은 정합회로를 설계하는데 중요한 역할을 하고 있다.

## 6. 참고문헌

1. 최낙진, 김현석, 임준석, 성광모, "스피커 어레이 값 이용한 빔형성 가중회로 구성실험에 관한 연구", 한국음향학회 춘계 학술대회 논문집, Vol. 23, No.1(s), pp.141-144, 2004.
2. Byung-Doo Jun and Koeng-Mo Sung, Estimation of Equivalent Circuit Parameters for Piezoelectric Transducer Using Least Square Method, ICA/ASA98, Seattle.
3. 최낙진, 송준일, 성광모, 전병두, 임준석, "정합회로 설계툴 위한 초음파 진동자 Modeling S/W Tool 구현," 한국음향학회 학술대회 논문집, 제19권, 제2(s)호, pp.341~ 44, 2000.
4. 송준일, 최낙진, 전병두, 임준석, 성광모, "수중 음향 센서 시스템에 관한 임피던스 정합회로의 구현," 한국음향학회 하계 학술대회 논문집, Vol. 20, No.1(s), pp. 8339~ 36, 2001.
5. 최낙진, 송준일, 임준석, 성광모, "임피던스 정합회로의 설계툴 위한 Design S/W Tool 구현," 한국음향학회 하계 학술대회 논문집, Vol. 20, No.1(s), pp. 84 1~ 44, 2001.
6. Heinrich Kuttruff, *Room Acoustics*, 4th ed., Spon Press, 2000