

# 소나 시스템 설계를 위한 FFR 트랜스듀서 어레이의 등가회로 모델링

## Equivalent Circuit Modelling of FFR Transducer Array for Sonar System Design

김인동<sup>†</sup> · 최승수<sup>\*</sup> · 이학수<sup>\*\*</sup> · 이승우<sup>\*\*</sup> · 문원규<sup>\*\*\*</sup>  
 (In-Dong Kim · Seung-Soo Choi · Haksue Lee · Seung Woo Lee · Wonkyu Moon)

**Abstract** - Free-Flooded Ring (FFR) transducer array for use in Sonar system can be driven with large amplitude in a wide frequency band due to its structural characteristics, in which two resonances of a ring mode (1st radial mode) and an inner cavity vibration mode occur in a low frequency band. Since its sound wave generation characteristics are not influenced by the water pressure, the FFR transducer array is widely used in the deep sea. So FFR has been recognized as a low-frequency active sound source and has received much attention ever since. In order to utilize the FFR transducer array for SONAR systems in military and industrial applications, its equivalent electric circuit model is necessary especially to design the matching circuit between the driving power amplifier and the FFR transducer array. Thus this paper proposes the equivalent electric circuit model of FFR transducer array by using measured values of parameter, and suggest the improved method of parameter identification. Finally it verifies the effectiveness of the proposed circuit model of FFR transducer array by experimental measurements.

**Key Words** : FFR transducer array, Equivalent electric circuit model, Matching circuit, Sonar system, System design

### 1. 서 론

소나 시스템에서 저주파 능동 음원으로 사용되는 Free-Flooded Ring(FFR) 트랜스듀서 유닛은 PZT(Lead Zirconate Titanate)와 같은 압전소자 재료로 만들어진 세라믹 링 형태로 그림 1(a)와 같이 구성되어 있다. 구동전압을 인가하는 전극은 FFR 링을 구성하는 압전소자들 사이에 교대로 +전극과 -전극을 삽입하며, 이들 전극사이에 인가된 전압에 의해 FFR 링 내의 압전소자는 그림 1(b)와 같이 원주 방향으로 분극 된다. 그림 1(c)와 같이 구동 전원인 전력증폭기 출력 전압으로 전극에 교류전압을 인가하면 FFR 링은 교류전압의 주파수와 같은 주파수로 반지름의 증가 및 감소를 반복하며, 이 진동으로 인해 수중으로 음파를 방출한다.

FFR은 크기가 작고 무게가 적으며 높은 힘을 가지고 있으며 또한 좋은 방사상 지향성을 가지며 바다 아주 깊은 곳에서 사용할 수 있다. FFR은 구조적 특성 상 링 구조의 진동모드(1st radial mode)와 내부 공동(cavity)의 진동모드(Cavity mode)의 두 가지 공진이 저주파 대역에서 나타나 넓은 주파수 대역에서

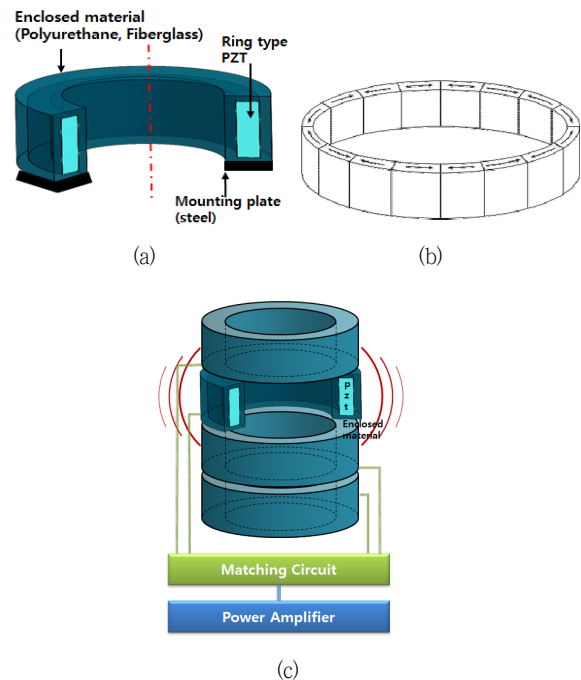


그림 1 (a) FFR 트랜스듀서 유닛의 내부 구조  
 (b) 분극된 FFR 트랜스듀서 유닛의 압전소자  
 (c) 전력증폭기에 의해 공급된 FFR 트랜스듀서 어레이

Fig. 1 (a) Internal structure of FFR transducer unit,  
 (b) Polarized piezoelectric device of FFR transducer unit,  
 (C) FFR transducer array fed by power amplifier

<sup>†</sup> Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong Nat. University, Korea.

E-mail : idkim@pknu.ac.kr

<sup>\*</sup> Dept. of Electrical Eng., Pukyong Nat. University, Korea.

<sup>\*\*</sup> The 6th R&D Institute-1, Agency for Defense Development

<sup>\*\*\*</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Pohang Univ. of Science and Technology, Korea.

Received : January 7, 2017; Accepted : March 28, 2017

큰 진폭으로 구동이 가능하다. 또한 음파 발생 특성이 수압의 영향을 받지 않으므로 심해에서의 활용성이 높아 저주파 능동음원으로 그 중요성을 인정받아 지금까지 꾸준히 많은 관심을 받아왔다[1].

실제 수중에서 장거리 송수신과 장거리 물체확인을 위해 고출력의 음파 발생이 가능한 그림 1(c)과 같은 적층형태의 FFR 트랜스듀서 어레이를 사용하게 되며, 전력증폭기에 의해 고압 대전력으로 구동된다. 하지만 FFR 트랜스듀서 유닛 및 트랜스듀서 어레이를 소나 시스템에 효과적으로 응용하기 위해서는 전체시스템 설계와 매칭회로 설계를 위해 FFR 트랜스듀서 어레이를 전기적 등가회로로 모델링 하는 것이 필요하다. 따라서 몇 가지 참고 문헌을 통해 기존의 FFR 트랜스듀서 어레이 모델링의 발전 과정 및 경향을 확인할 수 있다.

참고문헌 [2]는 원통형 트랜스듀서 어레이의 등가회로를 제시하였으며, 트랜스듀서 유닛 개수가 2개일 때의 트랜스듀서 어레이를 모델링하였다. 그러나 트랜스듀서 어레이에서 트랜스듀서 유닛의 개수가 여러 개일 때는 문헌 [2]의 식 (5)와 같이 복잡하며, 더욱더 문제가 되는 것은 문헌 [2]의 그림 4와 식 (5)에서 트랜스듀서 어레이 모델의 파라미터 값을 추정하거나 유도해내는 것은 매우 어려운 것으로 남아있다.

참고문헌 [3]은 FFR 트랜스듀서 어레이(FFR Transducer Array)에서의 FFR 트랜스듀서 유닛사이의 간섭현상을 잘 기술하였으며, 4개의 적층 FFR 어레이에서 가운데의 FFR 트랜스듀서 유닛은 등가 입력저항이 음이 되는 것을 실험을 통해 확인하였다. 그러나 FFR 트랜스듀서 어레이 모델을 구체적으로 제시하지 못했다.

참고문헌 [4]는 트랜스듀서 어레이의 입력단자 연결을 직렬 혹은 병렬로 연결하였을 때의 전력증폭기의 출력 임피던스를 통한 트랜스듀서 유닛 사이의 간섭현상을 해석적으로 기술하였으나 참고문헌 [3]과 마찬가지로 구체적인 모델을 제시하지 못했다. 참고문헌 [5]부터 [8]까지는 유한요소법 및 경계요소법을 사용하여 FFR 어레이를 모델링하였으나, 모델이 복잡하며 많은 계산시간을 필요로 하므로, 매칭회로 설계에 직접 사용하기에는 많은 어려움이 있다. 또한, 위에서 언급한 여러 문헌들은 트랜스듀서 어레이 모델을 제시한 논문도 있으나, 회로 파라미터의 추정이 실질적으로 곤란하거나, 시스템 설계 관점에서 실용적인 모델을 제시하지 못했다.

따라서 본 논문에서는 매칭회로 설계와 같은 시스템 설계 관점에서 중요한 입출력 변수인 FFR 트랜스듀서 어레이의 입력 전압과 출력 음압, 즉 TVR(Transmitting Voltage Response) 관점에서 FFR 트랜스듀서 어레이를 모델링하였으며, 파라미터 추정 혹은 측정이 용이한 실용적인 모델을 제시한다. 이 모델을 사용하여 유전 알고리즘(Genetic algorithm)과 같은 최적화 기법을 통해 최적 매칭회로 설계가 실질적으로 가능하다.

## 2. 본 론

본 논문에서 모델링 대상인 FFR 트랜스듀서 어레이는 그림 1(c)와 그림 2(a) 같이 4개의 링 형태의 FFR 트랜스듀서 유닛이

여러 개 적층되어 있는 구조이다. 본 연구에서 제안하는 모델링 방법은 그림 2(a)와 같은 트랜스듀서 어레이뿐만 아니라 다양한 결합과 형태의 트랜스듀서 어레이에도 적용이 가능하다. 본 논문의 모델링 대상인 FFR 트랜스듀서 어레이는 기본적으로 다음과 같은 특성을 갖고 있으며, 이와 같은 가정 하에서 모델링하였다.

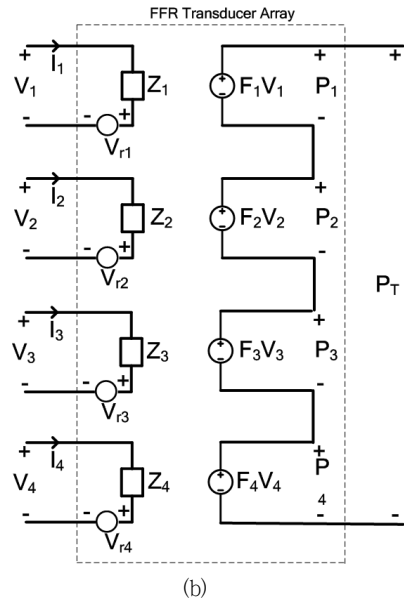
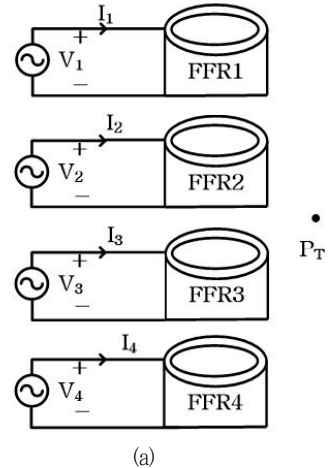


그림 2 (a) 4개의 링으로 된 FFR 트랜스듀서 어레이  
(b) 제안한 FFR 트랜스듀서 어레이의 등가회로 모델

Fig. 2 (a) FFR transducer array composed of four free-flooded ring units, (b) Its proposed equivalent circuit model

첫째로 모델링하고자 하는 FFR 트랜스듀서 어레이는 수중에서 동작하는 Multi-input, Single-output system으로 입력신호는 각 FFR 유닛을 구동하는 인가전압들이고, 출력은 수중의 적정지점에서 측정되는 음압(Sound pressure)이다. 즉 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 입력신호는 각 FFR 유닛의 입력단자전압  $V_1, V_2, V_3, V_4$ 이며, 출력신호는 음압  $P_T$ 이다.

둘째로 모델링하고자 하는 수중에서의 FFR 트랜스듀서 어레이의 동작과 음파 전달과정은 기본적으로 선형시스템이다. 따라서 선형시스템에서 성립하는 중첩의 정리(Superposition theorem)와 테브난 등가회로 정리(Thevenin equivalent circuit theorem)를 모델링 과정에서 적용할 수 있다.

위에서 언급한 2개의 가정 하에서 유도된 4개 링으로 구성된 FFR 트랜스듀서 어레이의 등가회로 모델은 그림 2(b)와 같고 그림 3과 같이 신호흐름 블록 다이어그램으로도 표현할 수 있다.

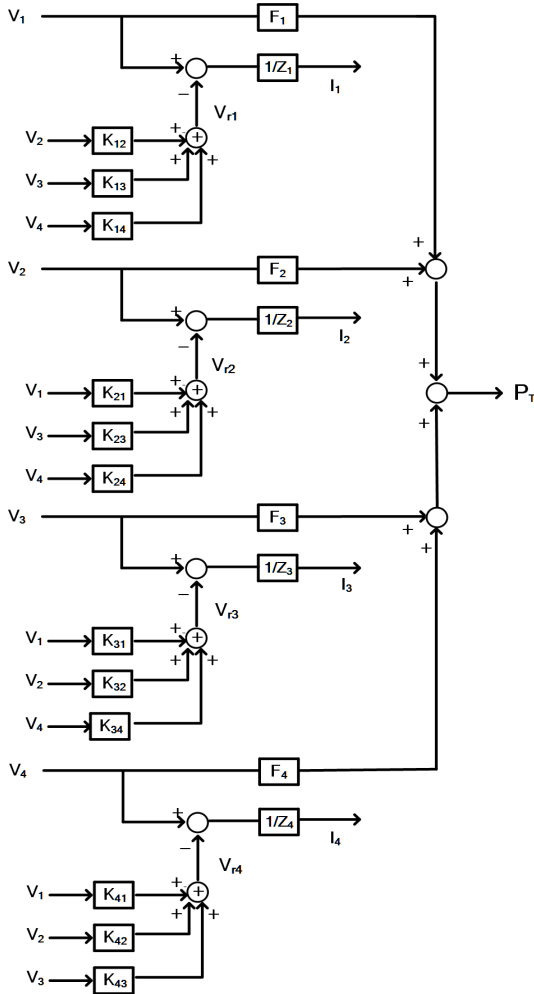


그림 3 제안한 모델의 신호흐름 블록 다이어그램  
**Fig. 3** Signal flow block diagram of proposed equivalent circuit model

**2.1 테브난 임피던스와 전달함수의 유도 및 측정**

그림 4는 각 FFR 트랜스듀서 유닛의 전압인가 입력단자에서 본 테브난 등가 임피던스  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ 와 전달함수  $F_1, F_2, F_3, F_4$ 를 유도하기 위한 FFR 유닛의 결선상태를 보이고 있다. FFR Transducer Array의 출력은 수중에서 원하는 특정 지점에서 음

압  $P_T$ 이다. 본 논문에서의 FFR Transducer Array는 선형시스템이므로 원하는 지점에서의 음압  $P_T$ 는 중첩의 정리를 적용하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

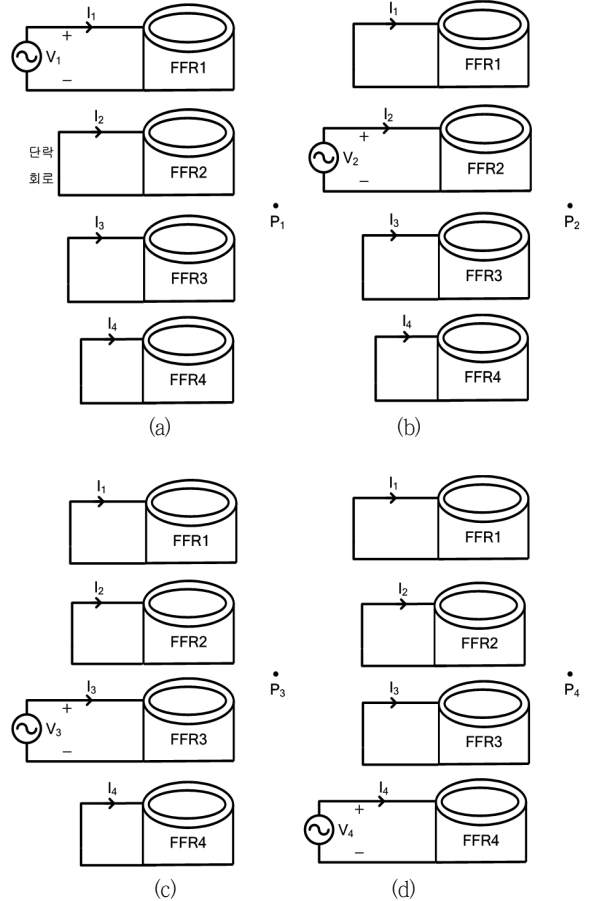


그림 4 테브난 등가임피던스  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ 와 전달함수 값  $F_1, F_2, F_3, F_4$ 의 유도를 위한 회로 결선 조건

**Fig. 4** Terminal connection conditions for the derivation of Thevenin equivalent impedance  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  and transfer function  $F_1, F_2, F_3, F_4$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = F_1 V_1 + F_2 V_2 + F_3 V_3 + F_4 V_4 \quad (1)$$

여기서 음압  $P_1, P_2, P_3, P_4$ 는 각각 그림 4(a), (b), (c), (d)에서 같이 입력전압  $V_1, V_2, V_3, V_4$ 만 인가되었을 때의 특정지점의 음압이다.  $F_1, F_2, F_3, F_4$ 는 각각 입력전압  $V_1, V_2, V_3, V_4$ 에 대한 출력 음압  $P_1, P_2, P_3, P_4$ 의 전달함수이다. 이들 전달함수를 구하기 위해 입력전압 페이저  $V_n$ 에 대한 음압 페이저  $P_n$ 의 크기와 위상측정 후 전달함수  $F_n(TVR)$ 을 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$F_n = \frac{P_n}{V_n}, \quad n=1,2,3,4 \quad (2)$$

또한 각 FFR 유닛의 입력단에서 본 테브난 등가 임피던스  $Z_1,$

$Z_2, Z_3, Z_4$ 는 입력전압 페이저  $V_n$ 에 대한 입력전류  $I_n$ 의 크기와 위상측정 후 테브난 등가 임피던스  $Z_n$ 을 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$Z_n = \frac{V_n}{I_n}, \quad n=1,2,3,4 \quad (3)$$

### 2.2 테브난 등가전압 유도 및 측정

그림 2(b)와 같이 제안한 FFR 트랜스듀서 어레이의 모델에서  $V_{r1}, V_{r2}, V_{r3}, V_{r4}$ 는 테브난 등가회로에서의 테브난 등가전압으로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{r1} &= K_{12} V_2 + K_{13} V_3 + K_{14} V_4 \\ V_{r2} &= K_{21} V_1 + K_{23} V_3 + K_{24} V_4 \\ V_{r3} &= K_{32} V_2 + K_{34} V_4 \\ V_{r4} &= K_{41} V_1 + K_{42} V_2 + K_{43} V_3 \end{aligned} \quad (4)$$

위 식과 같이 각 FFR 트랜스듀서 유닛의 테브난 등가전압은 이웃하고 있는 다른 FFR 트랜스듀서 유닛의 인가전압의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 커플링 계수  $K_{nm}$ 은 그림 5와 같은 조건에서 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

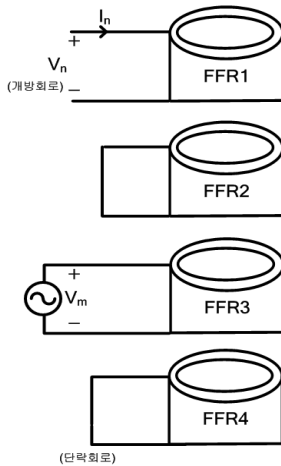


그림 5 커플링 계수  $K_{nm}$  측정을 위한 회로의 결선조건

Fig. 5 Terminal connection conditions for the measurement of the coupling coefficients  $K_{nm}$

$$K_{nm} = \frac{V_n}{V_m}, \quad n=1,2,3,4 \quad m=1,2,3,4 \quad (5)$$

식 (5)에서  $V_n$ 은  $n$ 번의 FFR 트랜스듀서 유닛의 입력단자의 개방 시 측정되는 단자 전압의 페이저이며,  $V_m$ 은 이웃하는  $m$ 번의 FFR 트랜스듀서 유닛의 입력단자에 인가된 단자전압의 페이저이다.

커플링 계수  $K_{nm}$ 은 이웃하고 있는 FFR 유닛 간의 결합정도를

나타내는 값으로서 식 (4)에서의 테브난 등가전압  $V_{r1}, V_{r2}, V_{r3}, V_{r4}$ 를 계산할 때 사용된다. 이와 같이 커플링 상태를 나타내는 테브난 등가전압은 입력임피던스 측정이 음의 저항 값으로 나타나는 현상을 설명할 수 있다.

### 2.3 전달함수 $F_1, F_2, F_3, F_4$ 의 개선된 측정방법

그림 4와 같이 정의에 의한 전달함수 측정은 측정되는 음압신호의 크기가 상대적으로 작아서 많은 측정오차를 가질 수 있으므로 정확한 측정이 어려울 수 있다. 본 과제에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 FFR 트랜스듀서 어레이가 선형시스템이라는 것을 이용하여 중첩의 원리를 사용하여 전달함수 값을 측정 및 계산하는 새로운 방법을 제안한다.

식 (1)에서처럼  $V_1, V_2, V_3, V_4$ 의 값에 대한 음압  $P_T$ 의 측정 시 그림 6의 표와 같이 4개의 서로 다른 인가전압 조합에서 해당 음압을 측정한다. 다시 말해 각각의 인가전압 조합에 대해 정해진 위치에서의 음압  $P_T(P_{1T}, P_{2T}, P_{3T}, P_{4T})$ 의 페이저 즉 크기와 위상을 측정한다. 이와 같은 측정을 통해 식 (6)을 얻을 수 있다.

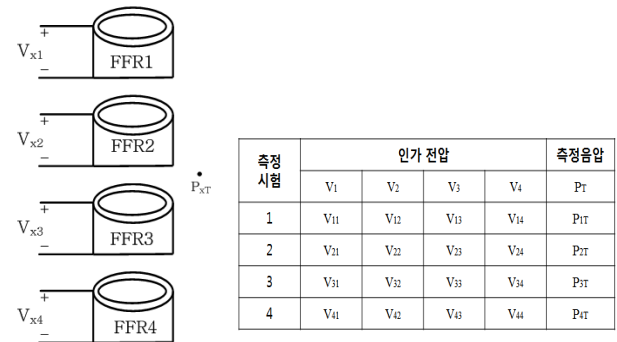


그림 6 서로 다른 4개의 측정점에서 인가전압에 따른 음압 측정 실험조건

Fig. 6 Terminal connection conditions and combinations of applied input voltages for the measurement of the sound pressure according to the applied input voltages at 4 different measurement points

$$\begin{bmatrix} P_{1T} \\ P_{2T} \\ P_{3T} \\ P_{4T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} & V_{24} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} & V_{34} \\ V_{41} & V_{42} & V_{43} & V_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$P = VF \Rightarrow F = V^{-1}P \quad (7)$$

식 (6)에서 음압벡터를  $P$ 로 표현하고, 인가전압 행렬을  $V$ 로 표현하고, 전달함수값 벡터를  $F$ 로 표현하면, 식 (6)은 식 (7)로 나타낼 수 있다. 식 (6)에서 사전에 측정점 설정 시 행렬  $V$ 를 Nonsingular matrix가 되게 설정하면, 행렬  $V$ 는 역행렬을 가지므로 식 (7)과 같이 벡터  $F$ 를 계산할 수 있다. 이와 같은 측정법

을 통해 F를 측정/계산 할 때 인가전압 조합에 따라 F의 측정오차를 감소시킬 수 있다. Nonsingular matrix로서 역행렬을 갖는 V는 그림 7처럼 다양한 인가전압 조합을 상징할 수 있으며, 그중에서 인가전압조합  $V_5$ 가 F의 측정오차를 최소화할 것으로 예상된다.

$$\begin{aligned}
 V_A &= \begin{bmatrix} V_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_i \end{bmatrix} & V_B &= \begin{bmatrix} V_i & V_i & 0 & 0 \\ 0 & V_i & V_i & 0 \\ 0 & 0 & V_i & V_i \\ V_i & 0 & 0 & V_i \end{bmatrix} \\
 V_C &= \begin{bmatrix} V_i & V_i & V_i & 0 \\ 0 & V_i & V_i & V_i \\ V_i & V_i & V_i & 0 \\ V_i & V_i & 0 & V_i \end{bmatrix} & V_D &= \begin{bmatrix} V_i & 0 & V_i & V_i \\ 0 & V_i & V_i & V_i \\ V_i & V_i & V_i & 0 \\ V_i & V_i & 0 & V_i \end{bmatrix} \\
 V_E &= \begin{bmatrix} 0 & V_i & V_i & V_i \\ V_i & 0 & V_i & V_i \\ V_i & V_i & 0 & V_i \\ V_i & V_i & V_i & 0 \end{bmatrix} & V_F &= \begin{bmatrix} V_i & 0 & V_i & V_i \\ 0 & V_i & V_i & V_i \\ V_i & V_i & V_i & 0 \\ V_i & V_i & 0 & V_i \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

그림 7 전달함수값을 측정하기 위한 다양한 인가전압 조합들  
**Fig. 7** Various combinations of applied input voltages for the measurement of the transfer functions

2.4 결합계수  $K_{nm}$ 의 개선된 측정 방법

식 (4)처럼  $V_1, V_2, V_3, V_4$ 의 값에 대한 테브난 등가전압  $V_{r1}, V_{r2}, V_{r3}, V_{r4}$ 를 구하기 위해 결합계수  $K_{nm}$ 의 측정이 필요하다. 이를 위해 그림 5와 같은 정의에 의한 결합계수  $K_{nm}$ 을 측정할 경우 시스템의 결선 상태를 자주 변경하면서 측정하는 번거로움이 있을 뿐만 아니라 측정값이 작아서 많은 측정오차를 가져올 수 있다. 본 과제에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 FFR 트랜스듀서 어레이가 선형시스템이라는 것을 이용하여 중첩의 원리를 사용하여 전달함수값을 측정 및 계산하는 방법을 제안한다.

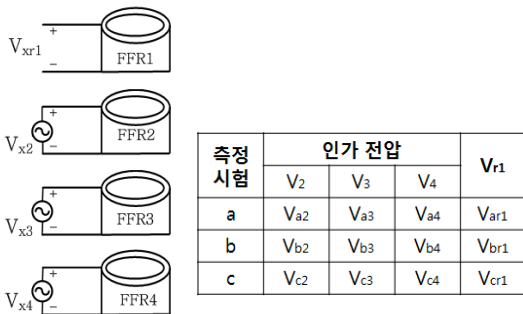


그림 8 서로 다른 3개의 측정점에서 인가전압에 따른 테브난 등가전압 측정 실험조건  
**Fig. 8** Terminal connection conditions and combinations of applied input voltages for the measurement of the Thevenin equivalent voltages at 3 different measurement points

그림 8은 테브난 등가전압  $V_{r1}$ 을 구하기 위해 필요한 결합계수  $K_{12}, K_{13}, K_{14}$ 를 측정할 때의 회로 연결 조건과 3개의 서로 다른 인가전압 조합을 보이고 있다. 그림 8의 표와 같이 3개의 서로 다른 인가전압 조합에서 해당 테브난 등가전압  $V_{r1}(V_{ar1}, V_{br1}, V_{cr1})$ 을 측정한다. 다시 말해 각각의 인가전압 조합에 대해 1번 FFR 트랜스듀서 유닛 입력단자에서의 테브난 전압의 페이저, 즉 크기와 위상을 측정한다. 이와 같은 측정에 의해 다음 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{ar1} \\ V_{br1} \\ V_{cr1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a2} & V_{a3} & V_{a4} \\ V_{b2} & V_{b3} & V_{b4} \\ V_{c2} & V_{c3} & V_{c4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{12} \\ K_{13} \\ K_{14} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$V_{r1} = VK_1 \Rightarrow K_1 = V^{-1}V_{r1} \tag{9}$$

식 (8)에서 테브난 등가전압 벡터를  $V_{r1}$ 로 표현하고, 인가전압 행렬을  $V$ 로 표현하고, 결합계수 벡터를  $K_1$ 로 표현하면, 식 (8)은 식 (9)로 나타낼 수 있다. 식 (8)에서 사전에 측정점 설정 시 행렬  $V$ 를 Nonsingular matrix가 되게 설정하면, 행렬  $V$ 는 역행렬을 가지므로 식 (9)과 같이 결합계수 벡터  $K_1$ 를 계산할 수 있다.

이와 같은 측정법에 의해 결합계수 벡터  $K_1$ 를 측정/계산 할 때 인가전압 조합에 따라  $K_1$ 의 측정오차를 감소시킬 수 있다. Nonsingular matrix로서 역행렬을 갖는  $V$ 는 그림 9처럼 다양한 인가전압 조합을 상징할 수 있으며, 그중에서 인가전압 조합  $V_2$ 가  $K_1$ 의 측정오차를 최소화할 것으로 예상된다.

$$V_A = \begin{bmatrix} V_i & 0 & 0 \\ 0 & V_i & 0 \\ 0 & 0 & V_i \end{bmatrix} \quad V_B = \begin{bmatrix} V_i & V_i & 0 \\ 0 & V_i & V_i \\ V_i & 0 & V_i \end{bmatrix} \quad V_C = \begin{bmatrix} 0 & V_i & V_i \\ V_i & 0 & V_i \\ V_i & V_i & 0 \end{bmatrix}$$

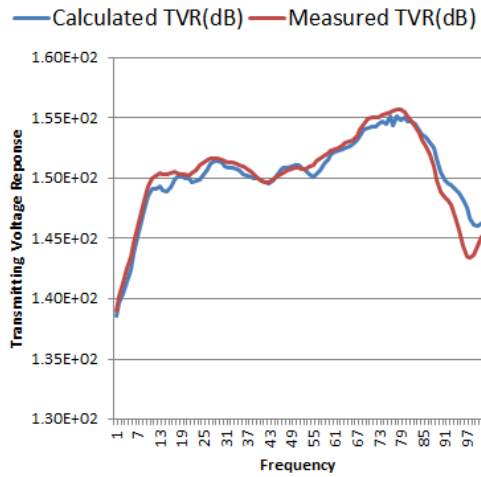
그림 9 결합계수 벡터  $K_1$ 를 측정하기 위한 다양한 인가전압 조합들  
**Fig. 9** Various combinations of applied input voltages for the measurement of the coupling coefficients  $K_1$

식 (3)에 있는 다른 결합계수, 즉 테브난 등가전압  $V_{r2}, V_{r3}, V_{r4}$ 와 관련된 결합 계수들도 같은 방법으로 구할 수 있다.

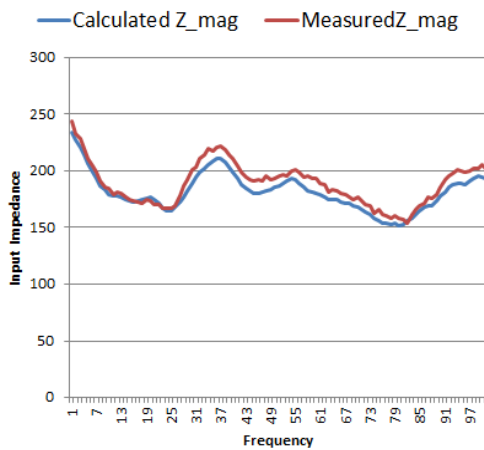
2.5 제안한 회로모델링의 측정 실험결과

그림 10은 FFR 트랜스듀서 어레이의 TVR과 입력임피던스 그래프를 나타낸다. 그림 10(a)는 등가모델로부터 계산된 TVR(빨간색)과 실제 측정된 TVR(파란색)이다. 그림 10(b)는 마찬가지로 등가모델로부터 계산된 입력 임피던스 크기(빨간색)과 실제 측정된 입력 임피던스 크기(파란색)이다. 더 상세히 설명하면 그림 10 (a)와 (b)의 파란색 그래프는 제안한 정의에 의한 방법을 사용하여 측정된 파라미터들을 사용하여 제안된 모델에서 계산한 TVR과 입력 임피던스 그래프이다. 또한 그림 10(a)와 (b)의 빨간색 그래프는 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 실제 수중에서 4개의 FFR 모두에 전압을 인가하여 실제 측정된 TVR과 임피던스 그래프이다. 그림 10에 나타나듯이 모델의 의한 계산치와

실제 측정치가 상당히 일치하는 것을 알 수 있다. 약간의 오차의 원인으로는 수심이 얇아 대칭성 불만족 및 반사파의 영향으로 보이나 측정 환경을 개선하면 더욱 일치한 그래프가 나올 것으로 예상된다.



(a)



(b)

그림 10 등가모델로부터 계산된 값과 측정된 값

(a) TVR, (b) 입력 임피던스

Fig. 10 The calculated values and the measured ones

(a) TVR, (b) Input impedance

### 3. 결 론

본 논문에서는 매칭회로 설계와 같은 소나 시스템의 시스템 설계 관점에서 필요한 FFR 트랜스듀서 어레이의 등가회로 모델을 제시한다. 즉 시스템 설계에서 중요한 입출력 변수인 FFR 트랜스듀서 어레이의 입력 전압과 출력 음압(TVR) 관점에서 FFR 트랜스듀서 어레이를 모델링하였으며, 파라미터 추정 혹은

측정이 용이한 실용적인 등가회로 모델을 제안한다. 또한 파라미터의 측정오차를 줄이기 위한 개선된 추정방법을 제시하였다. 실험을 통해 제안한 FFR 트랜스듀서 어레이 회로모델과 파라미터 측정방법에 대한 유효성을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 등가회로 모델을 사용하여 유전 알고리즘과 같은 최적화 기법을 통한 최적 매칭회로 설계가 실질적으로 가능하며, 제안한 등가회로 모델링 방법은 실제 시스템 설계에 유용하게 응용 될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다(계약번호 UD130017DD).

### References

- [1] T. F. Hueter, "Twenty Years in Underwater Acoustics: Generation and Reception," J. Acoust. Soc. Am. 51(3B), 1025-1040, 1972.
- [2] Charles H. Sherman, "Analysis of Acoustic Interaction in Transducer Array," IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, Vol. 13, pp. 9-15, Mar 1966.
- [3] David T. Porter, "Method for Computing the electrical and Acoustical Behavior of Free-Flooding Cylindrical Transducer Array," J. Acoust. Soc. Am, Vol. 44, No. 2, pp. 514-522, Feb 1968
- [4] I. V. Vovk and V. T. Grinchenko, "Interaction of Electroacoustic Transducers in an Array," Acoustical Physics, Vol. 42, No. 2, pp. 159-165, Mar 1996.
- [5] S. Morgan and D. J. W. Hardie and P. C. Macey, "Quantifying Mutual Interactions between Transducers within Active Sonar Array," OCEANS '98 Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 399-402, Oct 1998.
- [6] Zhengyao He and Xiuchun Li, "Modeling and Calculation of Acoustic Radiation for a Free-flooded Ring Transducer Array," Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress on, Vol. 8, pp. 3865-3868, Oct 2010.
- [7] Xin-ran XU, "Theoretical And Experimental Study On A New Structure Free-Flooded Ring Transducer," Piezo-electricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2012 Symposium on, pp. 81-84, Nov 2012.
- [8] Rithul Mohan. T. R. and R. Ramesh, "Frequency Spectra of Free-flooded Ring Transducers," Underwater Technology (UT), 2015 IEEE, pp. 1-3, Feb 2015.



저 자 소 개



김 인 동 (In-Dong Kim)

1960년 8월 27일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학). 1991년~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임연구원. 1997년~1998년 미국

Univ. of Tennessee Post Doc. 2004년~2005년 미국 Virginia Tech 방문교수. 1996년~현재 부경대 전기공학과 교수.  
E-mail: idkim@pknu.ac.kr



문 원 규 (Wonkyu Moon)

1984년 서울대학교 기계공학과 학사, 1986년 한국과학기술원 석사, 1995년 오스틴 주재 텍사스 주립대 박사, 1996~1998 삼성종합기술원, 1998년부터 포항공과대학교 기계공학과 교수로 재직중. 관심분야는 전기~기계 결합 현상을 이용한 트랜스듀서로 압전 응용 디바이스 개발 및 연구에 집중. 미세가공기술을 이용한 다양한 트랜스듀서 연구에 참여중임.

Tel : 054-279-2184  
Fax : 054-279-2887  
E-mail : wkmoo@postech.ac.kr



최 승 수 (Seung-Soo Choi)

1982년 3월 26일생. 2013년 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2015년 부경대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2017년 부경대 공대 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 2017년~현재 부경대 대학원 수료 후 연구생.



이 학 수 (Haksue Lee)

1976년 6월 19일생. 2000년 포항공과대학교 기계공학과 졸업. 2003년 포항공과대학원 기계공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 졸업(공학). 2009년~2010년 포항공과대학교 미래형기계기술사업단 연구원. 2011년~현재 국방과학연구소 제6기술연구본부 선임연구원.

E-mail: swallowtail@add.re.kr



이 승 우 (Seung Woo Lee)

1977년 7월 13일생. 2003년 경북대 공대 전자전기공학부 졸업. 2005년 경북대대학원 전자공학과 졸업(석사). 2006년~현재 국방과학연구소 연구원.

E-mail: swlee@add.re.kr