

소나 송신기의 정합회로 설계를 위한 수중 음향 압전 트랜스듀서의 등가회로 파라미터 추정

Estimation of Equivalent Circuit Parameters of Underwater Acoustic Piezoelectric Transducer for Matching Network Design of Sonar Transmitter

이 정 민* 이 병 화* 백 광 렬**
Jeong-Min Lee Byung-Hwa Lee Kwang-Ryul Baek

Abstract

This paper presents an estimation technique of the equivalent circuit parameters for an underwater acoustic piezoelectric transducer from the measured impedance. Estimated equivalent circuit can be used for the design of the impedance matching network of the sonar transmitter. A fitness function is proposed to minimize the error between the calculated impedance of the equivalent circuit and the measured impedance of the transducer. The equivalent circuit parameters are estimated by using the fitness function and the PSO(Particle Swarm Optimization) algorithm. The effectiveness of the proposed method is verified by the applications to a sandwich-type transducer and a dummy load. In addition, the impedance matching network is also designed by using the estimated equivalent circuit model.

Keywords : Transducer, Equivalent Circuit, PSO(Particle Swarm Optimization), Fitness Function, Dummy Load, Matching Network

1. 서론

일반적으로 능동 소나용 수중 음향 압전 트랜스듀서는 매우 큰 복소 임피던스를 갖고, 진동과 무관한 커패시턴스 성분이 존재하므로 고출력, 고효율로 구동하기 위해서는 무손실 소자인 트랜스포머나 인덕터를

이용한 송신기와의 임피던스 정합이 필요하다^[1]. 이때, 정합용 회로는 관심 주파수 대역에서 트랜스듀서의 전기적 등가회로를 이용하여 시스템 목적에 부합하도록 설계된다. 따라서, 보다 효과적인 정합회로 설계를 위해서는 트랜스듀서에 대한 정확한 전기적 등가회로 모델이 요구된다^[2].

비교적 간단한 형상으로 구현된 트랜스듀서에 대한 등가회로는 일차원 파동 방정식(Wave Equation)의 음향적인 특성에서 유도된 Mason 모델^[3]이나, 이를 기반으로 한 Redwood 및 KLM 모델^[4,5]과 물성치 정보를 이용하여 예측 가능하다^[6]. 그러나 이러한 방법은 압전

† 2009년 3월 17일 접수~2009년 5월 15일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 부산대학교(Pusan National University)

책임저자 : 이정민(leemin@add.re.kr)

상수 및 각종 재료의 부정확한 물성치로 인하여 등가회로 파라미터의 추정 과정에서 오차가 발생하므로 반복적인 보정이 필수적이다^{7,8)}. 그리고 트랜스듀서의 음향적인 특성에 영향을 미치는 부가적인 구성품(배킹 재료, 음향 윈도우, 지지구조 및 방사 임피던스 등)에 의한 효과까지 모델링하는 데는 한계가 있다⁹⁾. 따라서, 트랜스듀서의 전기적 특성은 물론, 음향적, 기계적 특성까지 간소화된 전기적 등가회로로 모델링할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 등가회로 파라미터의 초기값이나 물성치에 대한 사전 정보없이, 관심 주파수 대역에서 부가적인 영향을 포함한 트랜스듀서의 측정된 임피던스로부터 등가회로의 미지상수를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 실측 임피던스와 이론적으로 계산된 임피던스를 비교하고 그 오차가 최소가 되도록 미립자 집단 최적화(PSO : Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 이용하여 비선형 최적화 문제의 해를 구함으로써, 등가회로에 관련된 미지상수를 추정하는 것이다. 군집기반 진화 연산 알고리즘의 하나인 PSO 알고리즘은 미지상수에 대한 초기값을 자동적으로 랜덤하게 설정할 수 있고, 짧은 연산시간 내에 비선형 함수의 최적해를 도출할 수 있으며, 다른 확률적 방법보다 안정적으로 수렴한다는 장점이 있다^{10,11)}.

제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 샌드위치형 압전 트랜스듀서에 제안된 방법을 적용하였으며, 추정된 등가모델의 임피던스 특성과 실측치를 비교, 분석하였다. 그리고 수동소자를 이용하여 트랜스듀서의 가상부하(Dummy Load)를 제작하고 등가회로 파라미터를 추정한 다음, 실제 가상부하를 구성하는 소자값과 오차를 비교하였다. 마지막으로 추정된 트랜스듀서의 등가회로를 이용하여 정합회로를 설계하고, 정합회로가 포함된 트랜스듀서의 전기적 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 보임으로써, 추정된 등가회로가 송신 효율을 고려한 소나 송신기의 정합회로 설계에 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

2. 트랜스듀서 등가회로 해석

능동 소나 시스템에서 주로 사용되는 샌드위치형 압전 트랜스듀서의 일반적인 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 길이 방향으로 분극된 압전 세라믹을 가운데 적층하고, 금속 재료의 전, 후면추를 장력 볼트로 결합한

형태이다. 그리고 전면추와 방사 매질인 물 사이에는 음향 윈도우가 부착된다. 이러한 형상은 장력 볼트를 이용하여 세라믹에 전응력(Prestress)을 가함으로써 구동 출력을 크게 증대시킬 수 있고, 각 재료 사이의 기계적 접촉력이 향상되어 접촉영역에서의 기계적 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다.

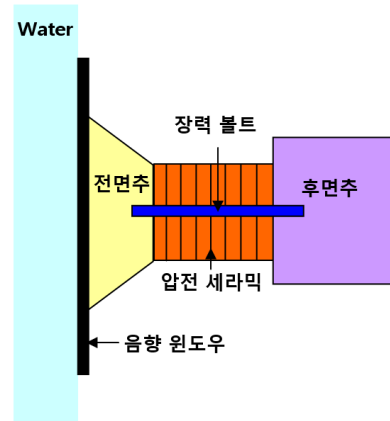


Fig. 1. Sandwich-type piezoelectric transducer

트랜스듀서의 전기적 등가모델을 표현하는 방법은 여러 가지가 있지만 해석이 용이하도록 공진점 부근을 근사화하여 집중형 회로 소자로 나타내고자 할 때, Fig. 2와 같이 BVD(Butterworth Van-Dyke) 모델이 주로 사용된다.

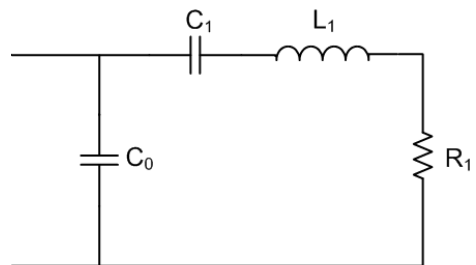


Fig. 2. BVD equivalent circuit of transducer

이 모델은 인접된 다른 공진모드와의 간섭이 없는 단일모드 공진점 근처에서 트랜스듀서의 정전용량 C_0 와 직렬 공진회로 $C_1-L_1-R_1$ 의 병렬 연결 형태로 구성된다.

등가회로로부터 트랜스듀서의 입력 임피던스는 식 (1)과 같이 실수와 허수성분으로 나타내어진다.

$$Z_{fit} = \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\gamma - \beta)^2} - j \frac{\gamma - \beta}{\alpha^2 + (\gamma - \beta)^2} \quad (1)$$

여기서, $\alpha = \frac{R_1}{R_1^2 + X_1^2}$, $\beta = \frac{X_1}{R_1^2 + X_1^2}$, $\gamma = w C_0$

$$X_1 = w L_1 - \frac{1}{w C_1}$$

식 (1)에서 등가회로와 관련된 미지상수는 R_1 , L_1 , C_1 , C_0 로 4개이다. 이들 미지상수를 추정하기 위한 방법의 하나로 N 개 주파수에 대한 트랜스듀서의 수중 임피던스(Z_{exp})를 실험적으로 측정하고, 이 결과를 식 (1)에서 계산되는 이론적인 임피던스(Z_{fit})와 비교하여 그 오차가 최소화 되도록 미지상수를 결정할 수 있다. 이때, 각 주파수에서의 임피던스 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta Z_E(w_k) = Z_{fit}(w_k) - Z_{exp}(w_k) \quad (2)$$

$k = 1, 2, \dots, N$

따라서, 등가회로의 미지상수 추정은 N 개 주파수에서의 임피던스 오차에 대한 크기 합을 최소화하는 비선형 최소화 문제로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$\text{Minimize } E(x) = \sum_{k=1}^N |\Delta Z_E(w_k, x)| \quad (3)$$

$x = \{R_1, L_1, C_1, C_0\}$

식 (3)의 미지상수에 대한 최적해를 구하기 위하여, 본 논문에서는 PSO 알고리즘을 적용하였다.

3. PSO 알고리즘을 이용한 등가회로 모델링

가. PSO 알고리즘

PSO 알고리즘은 Kennedy와 Eberhart에 의해 소개된 군집기반의 진화 연산 최적화 기법이다. 이미 널리 알려진 GA(Genetic Algorithm)와는 달리 PSO는 자연선택의 진화 메커니즘을 통한 방식이 아니라, 생체 군집내의 집단 행동 양식을 반영하여 최적화를 수행한다. 이 알고리즘은 집단 전체를 나타내는 군집(Swarm)과 군집을 구성하는 각 개체(Particle)들간에 과거 경험했던

정보를 공유하고 이를 기반으로 이동해 가는 개념이 최적화 과정에 도입된 것이다. PSO의 주요 알고리즘은 식 (4)와 같이 크게 세부분으로 구성된다^{10,11)}. 즉, 개체들의 다음 단계 이동 위치를 결정하기 위한 속도벡터는 각 개체들의 개인적인 움직임 성향과 과거 개체가 경험했던 최적 위치에 대한 움직임, 그리고 군집내에서 경험했던 최적 위치로의 움직임에 의해 이동 성향이 결정된다. 그리고 최적화 문제에 대한 잠재적인 해(Solution)인 각 개체들의 위치벡터는 식 (5)와 같이 t 단계에서의 위치벡터에 다음($t+1$) 단계의 속도벡터를 추가하면서 갱신된다.

$$v_{i,d}^{t+1} = \alpha \cdot v_{i,d}^t + \beta_1 \cdot (p_{i,d} - x_{i,d}^t) + \beta_2 \cdot (g_d - x_{i,d}^t) \quad (4)$$

$$x_{i,d}^{t+1} = x_{i,d}^t + v_{i,d}^{t+1} \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, n$ $d = 1, 2, \dots, D$

여기서,

- $v_{i,d}^t$: 각 개체별 t 단계에서의 속도벡터
- $v_{i,d}^{t+1}$: 각 개체별 $t+1$ 단계에서의 속도벡터
- $x_{i,d}^t$: 각 개체별 t 단계에서의 위치벡터
- $x_{i,d}^{t+1}$: 각 개체별 $t+1$ 단계에서의 위치벡터
- $p_{i,d}$: 각 개체들이 경험한 최적의 위치벡터
- g_d : 각 그룹이 경험한 최적의 위치벡터
- i : 개체수, n : 전체 개체수, t : 수행 단계
- d : 군집수, D : 전체 군집수
- α : 가중치, β_1, β_2 : 0과 2사이의 랜덤 상수

따라서, 최적화가 진행됨에 따라 각 개체들은 과거 경험했던 위치 정보를 공유하며, 점차적으로 더 나은 곳으로 이동하게 되고, 적합도 함수가 주어진 조건을 만족하도록 수렴하게 되어 전역적인 최적의 해를 도출하게 된다.

나. 등가회로 모델링

등가회로 모델링을 위하여 내경 12mm, 외경 34mm 그리고 길이가 4.4mm인 8개 원환형 압전 세라믹(PZT4)이 병렬로 결합된 샌드위치형 압전 트랜스듀서를 예제 모델로 선정하였다. 그리고 수중에서 음향 윈도우와 수밀을 위한 금속 하우징이 부착된 상태에서 트랜스듀서의 임피던스 크기와 위상을 측정하였다.

등가회로 모델링을 위한 적합도 함수(Fitness Function)는 앞에서 제시한 식 (3)과 같이 최적화 알고리즘 수행 과정에서 추정되는 결과와 실제 데이터와의 오차를 비교하고 그 값이 최소화 되도록 식 (6)과 같이 구성하였다. 즉, 실측된 임피던스 크기($|Z_{exp}|$)와 위상(θ_{exp}) 데이터로부터 실수와 허수 성분으로 구성된 트랜스듀서 복소 임피던스 Z_{exp} 을 구한 다음, 추정된 등가회로로부터 계산된 임피던스 Z_{fit} 와의 오차를 최소화할 수 있도록 하였다.

$$F_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |Z_{fit}(w_k) - Z_{exp}(w_k)|^2} \quad (6)$$

여기서,

$$Z_{exp}(w_k) = |Z_{exp}(w_k)| \cdot (\cos(\theta_{exp}(w_k)) + j \cdot \sin(\theta_{exp}(w_k)))$$

제안된 적합도 함수로부터 예제 모델의 등가회로 추정을 위해 적용된 PSO 알고리즘의 수행 흐름도는 Fig. 3과 같다. 먼저, 트랜스듀서로부터 실측된 임피던스 크기와 위상 정보를 이용하여 복소 임피던스를 구한 다음, 초기값 도출을 위한 별도의 연산과정 없이, 등가회로 파라미터를 구성하는 PSO의 위치벡터(x_{id}^t)와 속도벡터(v_{id}^t)에 대한 초기값을 랜덤하게 설정한다. 제안된 적합도 함수를 연산하여 PSO 내의 위치벡

터와 속도벡터를 갱신하면서 도출된 적합도 함수값이 설정 조건을 만족하면 실행을 종료하고, 그렇지 않으면 규정된 최종 횟수까지 수행을 반복(Iteration)한다. 실행이 종료되면 도출된 개체들의 위치벡터로부터 등가회로의 최종 파라미터를 도출한다.

최적화 과정 동안, 해가 내재된 공간상에서 등가회로를 구성하는 각 파라미터들의 움직임 성향은 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. 초기에 랜덤하게 흩어진 등가회로 추정 파라미터들이 최적화 수행 횟수가 증가함에 따라 점차적으로 한 점에 수렴해가는 모습을 보여주고 있다.

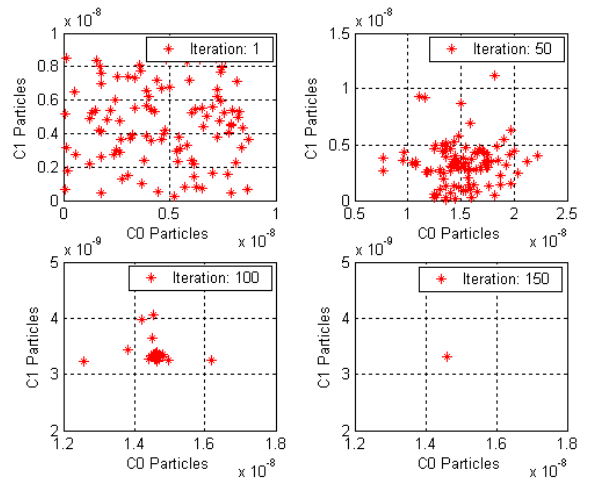


Fig. 4. Movement of C_0 , C_1 particles for the fitness function

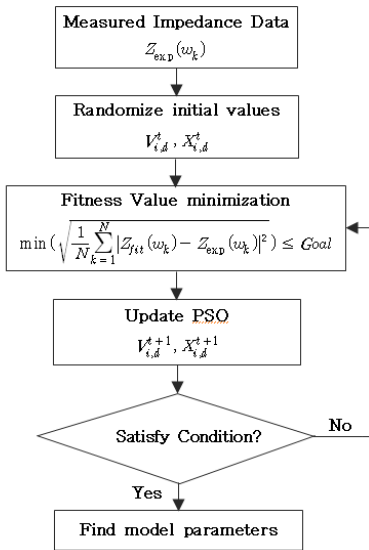


Fig. 3. Execution flowchart

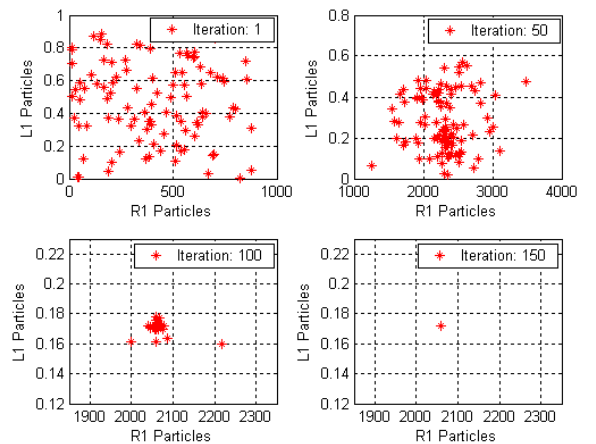


Fig. 5. Movement of R_1 , L_1 particles for the fitness function

또한, 수렴해가는 적합도 함수의 출력으로부터 등가 회로의 추정오차를 확인하기 위하여, 임피던스 크기 ($|Z|$)와 위상(θ) 오차를 식 (7), 식 (8)과 같이 정의하고, 그 결과를 각각 점선과 실선으로 Fig. 6에 나타내었다.

$$\Delta Z_{En} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|Z_{fit}(w_k)| - |Z_{exp}(w_k)|}{|Z_{exp}(w_k)|} \times 100\% \quad (7)$$

$$\Delta Z_{Ep} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{\theta_{fit}(w_k) - \theta_{exp}(w_k)}{\theta_{exp}(w_k)} \right| \times 100\% \quad (8)$$

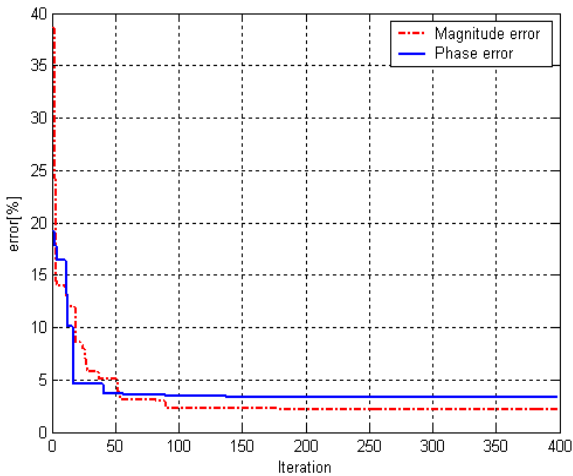


Fig. 6. Convergence velocity of PSO

Fig. 6에서, PSO의 최적화 과정은 임피던스 크기 및 위상오차에 대하여 비교적 빠른 시간인 약 150번의 반복수행 이내에 최종값으로 수렴하는 특징을 나타내었으며, 관심 주파수 대역 전체에 대하여 각각 약 2.22%, 3.36%이하의 오차특성을 보였다. 이는 집중형 회로 소자로 트랜스듀서를 근사화하여 나타낼 때, 발생할 수 있는 최소한의 오차라고 판단된다.

최적화 과정을 통하여 추정된 트랜스듀서의 등가회로 파라미터는 Table 1에 나타내었다. 그리고 추정된 파라미터로부터 계산된 등가모델의 임피던스특성은 실측된 임피던스 특성과 비교하여 Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다. 트랜스듀서의 임피던스 크기와 위상, 컨덕턴스와 서셉턴스 특성에 대하여 실측된 특성은 점선으로, 추정된 등가회로의 임피던스 특성은 실선으로 표시하였다. 제안된 기법에 의해 추정된 등가회로의 임

피던스 특성이 Fig. 6에 제시된 오차범위에서 실측된 임피던스 특성과 잘 일치하였다.

Table 1. Transducer parameters

Lumped elements	Values
C_0	14.6 [nF]
R_1	2060 [Ohm]
L_1	0.172 [H]
C_1	3.31 [nF]

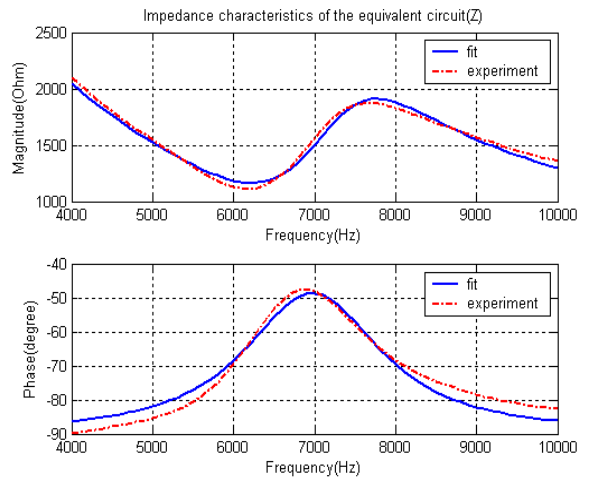


Fig. 7. Impedance magnitude and phase of transducer

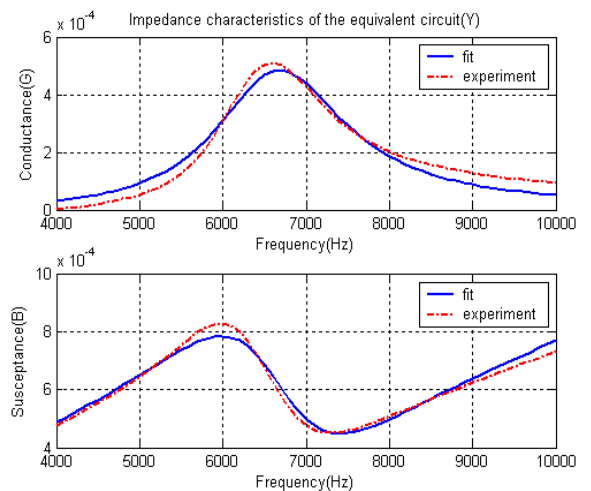


Fig. 8. Conductance and susceptance of transducer

4. 합성된 가상부하를 통한 기법 검증

실제 압전 트랜스듀서로부터 등가모델에 해당하는 내부 파라미터들을 정확하게 측정해내는 것은 어려운 일이다. 따라서, 추정된 기법에 대한 검증은 실제 측정된 트랜스듀서의 임피던스 특성과 추정된 등가회로의 계산된 임피던스 특성간 비교를 통한 결과만을 제시하였다. 본 논문에서는 제안된 기법에 대하여 좀 더 정확한 검증을 위한 방안으로 실제 트랜스듀서의 특성을 모의할 수 있는 가상부하를 시뮬레이션을 통하여 설계하고 수동소자를 이용하여 Fig. 9와 같이 제작하였다.

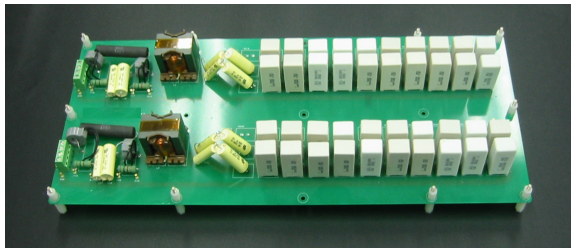


Fig. 9. Dummy load

합성된 가상부하를 실제 트랜스듀서라고 간주하고 앞에서 제안한 방법과 마찬가지로 제작된 가상부하의 복소 입력 임피던스를 측정한다. 다음, 제안한 적합도 함수와 PSO 알고리즘을 이용하여 등가회로 파라미터를 추정하였다. 추정된 가상부하의 등가회로 파라미터는 제작된 가상부하의 실제 RLC 소자값과 작은 오차로 잘 일치하였으며, 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Dummy load parameters

Lumped Elements	Measured Values	Estimated Values
C_0	18.6 [nF]	18.8 [nF]
R_1	1500 [Ohm]	1500 [Ohm]
L_1	0.111 [H]	0.112 [H]
C_1	5.1 [nF]	5.3 [nF]

그리고 추정된 등가모델의 파라미터로부터 계산된 임피던스 특성은 실측된 가상부하의 특성과 비교하여 Fig. 10, Fig. 11에 각각 나타내었다. 가상부하의 임피

던스 크기와 위상, 컨덕턴스와 서셉턴스에 대하여 실측치는 점선으로, 추정된 등가회로의 임피던스 특성은 실선으로 각각 표시하였다. 합성된 가상부하에 대하여 추정된 결과와 실측치가 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

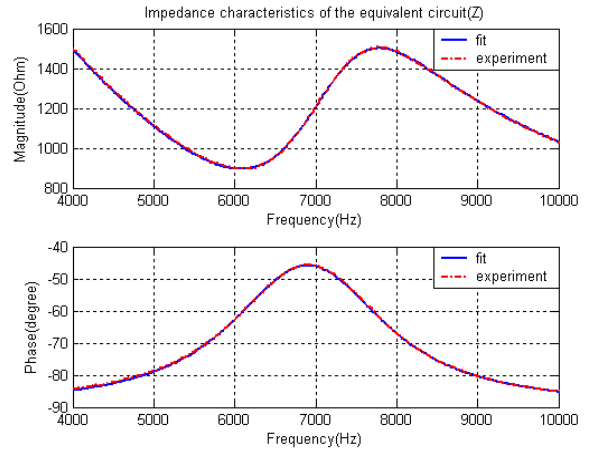


Fig. 10. Impedance magnitude and phase of dummy load

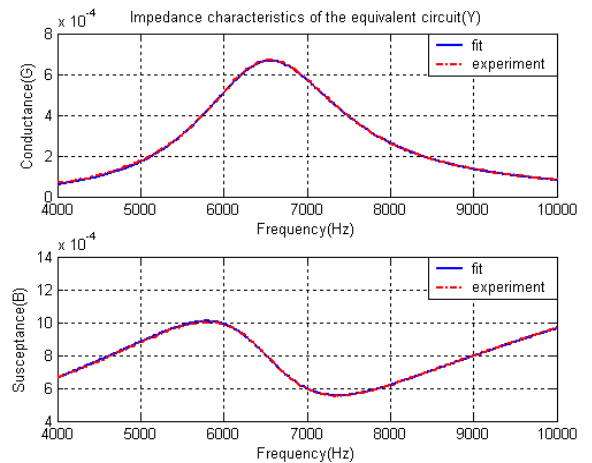


Fig. 11. Conductance and susceptance of dummy load

5. 정합회로 설계 응용

트랜스듀서의 추정된 등가모델과 기존의 필터합성 기법을 이용하여 소나 송신기용 정합회로를 설계하였다. 설계된 정합회로는 소나 송신기의 출력 임피던

스가 매우 작다는 가정하에 단중단 제자형 회로망 (Singly-terminated Ladder Network)을 이용한 필터 회로로 Fig. 12와 같이 구성하였다^[12].

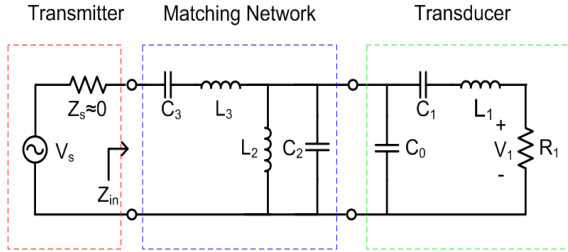


Fig. 12. Transducer & matching network

그리고 회로의 복잡성이나 구현의 편의성을 고려하여 통과대역내에서 약 1dB 리플(Ripple) 특성을 갖는 3차 체비셰프(Chebyshev) 저역필터 함수를 표준 원함수(Prototype Function)로 사용하였고 주파수 변환을 통하여 대역통과 필터로 변환하였다. 여기서, 트랜스듀서 등가회로의 직렬공진 회로는 저항 R_1 으로 종단된 L_1, C_1 제자형(Ladder) 필터의 직렬 LC 지로(Branch)로 간주하였으며, 커패시턴스 C_0 는 병렬 LC 지로의 커패시턴스로 활용하였다. 최종적으로 도출된 정합회로의 소자값은 Table 3에 나타내었다. 또한, 정합회로가 포함된 트랜스듀서의 전압 전달 특성 (V_1/V_s)과 입력 임피던스 특성 (Z_{in})을 시뮬레이션하고 그 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 각각 나타내었다.

Table 3. Matching network parameters

Lumped elements	Values
C_2	39.4 [nF]
L_2	0.0106 [H]
C_3	2.2 [nF]
L_3	0.259 [H]

추정된 등가모델의 트랜스듀서는 정합회로 설계로 전압 전달 특성의 주파수 대역폭과 고조파 차단 특성이 크게 향상됨을 알 수 있다. 특히, 통과대역내에서 트랜스듀서의 리액턴스 성분이 $\pm 30^\circ$ 이하의 위상 특성으로 개선됨으로써, 소나 송신기의 무효전력 공급 성분을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

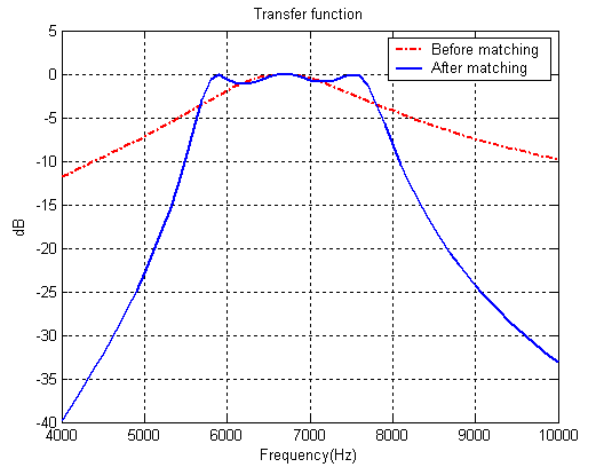


Fig. 13. Transfer function before & after matching

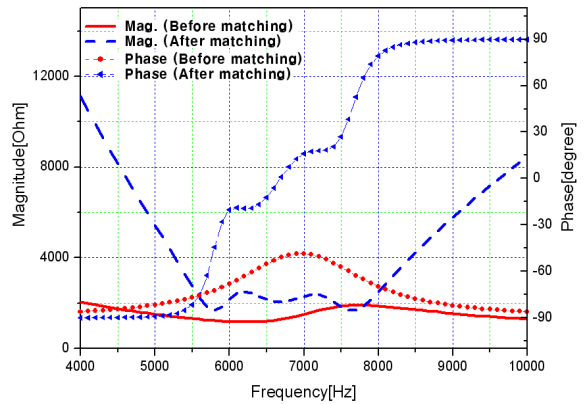


Fig. 14. Impedance of matching network & transducer

6. 결론

본 논문에서는 수중 음향 센서로 사용되는 압전 트랜스듀서의 임피던스 측정 데이터로부터 등가회로 모델을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 실제 임피던스와 이론적으로 계산된 임피던스를 비교하고 그 오차가 최소가 되도록 PSO 알고리즘을 이용하여 비선형 최적화 문제의 해를 구함으로써, 등가회로에 관련된 미지상수를 추정하는 것이다. 제안된 기법의 검증을 위하여 능동 소나 시스템에서 주로 사용되는 샌드위치형 압전 트랜스듀서의 전기적 등가회로를 추정하였다. 그 결과, 추정된 등가회로의 임피던스 특성이 측정치와 비교적 작은 오차범위에서 잘 일치하

였다. 또한, 트랜스듀서의 임피던스 특성을 수동소자로 합성한 가상부하에 대한 추정 결과에서도 가상부하를 구성하는 수동소자의 실제값과 추정치가 잘 일치함을 보였다.

그리고 추정된 등가모델로부터 정합회로를 설계하고, 정합회로가 포함된 트랜스듀서의 전기적 특성을 보임으로써, 트랜스듀서의 등가회로 모델링이 송신효율을 고려한 소나 송신기의 정합회로 설계에 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다. 결론적으로 제안된 기법으로부터 추정된 트랜스듀서의 전기적 등가모델은 트랜스듀서의 특성 해석 및 성능 예측 뿐만 아니라 트랜스듀서의 효율적인 구동을 위한 전자부 설계에도 사용 가능함을 보였다.

Reference

- [1] 이정민, 서희선, “동조화 기법을 이용한 Tonpilz형 저주파 트랜스듀서의 임피던스 정합회로 설계”, 국방과학연구소, NSDC-517-061577, 2006.
- [2] D. Church and D. Pincock, “Predicting the Electrical Equivalent of Piezoceramic Transducers for Small Acoustic Transmitters”, IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-32, No. 1, pp. 61~64, 1985.
- [3] W. P. Mason, Electromechanical Transducers and Wave Filters, New York : Van Nostrand, 1948.
- [4] M. Redwood, “Transient Performance of a Piezoelectric Transducer”, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 33, No. 4, pp. 527~536, 1961.
- [5] R. Krimholtz, D. A. Leedom and G. L. Mathaei, “New Equivalent Circuits for Elementary Piezoelectric Transducers”, Electron Lett., Vol. 6, pp. 398~399, 1970.
- [6] 조치영, 서희선, 이정민, “수중 음향 압전 트랜스듀서의 등가 회로 모델링”, 한국음향학회지, 15(4), 77~82, 1996.
- [7] R. Coates and P. T. Magurie, “Multiple-Mode Acoustic Transducer Calculations”, IEEE Trans. Ultrason, Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 36, No. 4, pp. 471~473, 1989.
- [8] R. Ramesh and D. D. Ebenezer, “Equivalent Circuit for Broadband Underwater Transducers”, IEEE Trans. U.F.F.C. Vol. 55, No. 9, pp. 2079~2083, 2008.
- [9] 전병두, 임준석, 송준일, 성평모, “주파수 영역 측정에 의한 초음파 변환기 등가회로 추정”, 한국음향학회 학술대회 논문집, pp. 325~328, 2000.
- [10] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle Swarm Optimization”, IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942~1948, 1995.
- [11] S. Mostaghim and J. Teich, “Strategies for Finding Good Local Guides in Multi-Objective Particle Swarm Optimization(MOSPSPSO)”, Proc. IEEE 2003 Swarm Intelligence Symp., pp. 26-3, 2003.
- [12] R. Coates and R. F. Mathams, “Design of Matching Network for Acoustic Transducers”, Ultrasonics, Vol. 26, pp. 59~64, 1988.