

Sequential Quadratic Programming 방법을 이용한 인공중이용 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 모델 파라미터 추정

Lumped Model Parameter Estimation of Floating Mass Transducers based on Sequential Quadratic Programming Method for IMEHDs

박일용*

I. Y. Park

요 약

인공 중이 (IMEHD, implantable middle ear hearing device)용 플로팅 매스 트랜스듀서는 제작 과정상에서 발생하는 구조적 오차 및 제작 결합시의 문제점으로 인해 설계 시 의도와 다른 진동 특성을 가질 수 있게 되고, 이렇게 제작된 진동 트랜스듀서는 향후 실제 환자에게 이식되었을 때의 진동체 진동 성능을 예측하기 어려운 문제점이 있다. 본 연구에서는 제작된 플로팅 매스형 트랜스듀서에 대해 설계값과의 비교 평가 및 향후 컴퓨터 모델화된 청각 중이 집중 소자 모델에 적용이 가능하도록 기 제작된 진동체의 집중 소자 모델 파라미터들을 추정할 수 있는 방법을 제안하였으며, 제안된 방법을 LabVIEW 기반의 그래픽 유저 인터페이스 소프트웨어로 구현하였다. 제안된 방법은 실제 제작된 플로팅 매스형 진동체의 진동 변위 및 위상 데이터를 이용하여 해당 진동체의 집중 모델 파라미터들을 순차적 이차 프로그래밍 (SQP, sequential quadratic programming) 방법으로 추정하는 방식이다. 구현된 방법을 이용하여 측정 데이터에 가해지는 잡음의 양에 따른 플로팅 매스형 진동 트랜스듀서의 집중 모델 파라미터 추정 시의 발생 오차 변화를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 조사하여 본 방법의 파라미터 추정 정확도를 확인하였다. 또한, 실제로 제작한 인공중이용 진동 트랜스듀서에 대해 측정된 진동 변위 및 위상 데이터를 이용하여 진동체의 집중 모델 파라미터들을 추정하였으며, 기존 설계값들과 비교를 통해 제안된 방법의 유용성을 평가하였다.

ABSTRACT

In this paper, the lumped element model parameter estimation method and its implemented estimation software for fabricated floating mass transducers of IMEHDs have been presented so that the estimated parameter values could be compared with the designed ones and applied to predict the output performance when the transducers were implanted into human ears. The presented method is based on the sequential quadratic programming (SQP) for estimating parameters in the transducer's lumped model and has been implemented by the use of LabVIEW graphical language. Using the implemented estimation software, the accuracy of parameter estimation has been verified and our implemented estimation method has been evaluated by the comparison of the estimated transducer parameter values with the designed ones for a practically fabricated floating mass transducer for IMEHDs.

Keyword : Lumped model parameter estimation, floating mass transducer, sequential quadratic programming (SQP), implantable middle ear hearing device (IMEHD)

접 수 일 : 2011.11.25

심사완료일 : 2011.12.22

게재확정일 : 2011.12.26

* 박일용 : 단국대학교 의공학교실 조교수

piyong@dankook.ac.kr (주저자, 교신저자)

※ 이 논문은 2008년 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2008-331-D00758).

1. 서론

최근 기존 공기 전도형 보청기의 문제점들을 해결한 이식형 보청기의 하나인 이식형 인공중이(IMEHD, implantable middle ear hearing device)가 많은 의료인 및 연구자들에게 관심을 받고 있다. 이러한 인공중이에서 이소골에 직접적인 기계적 진동을 전달하기 위한 대표적 핵심 부품인 전자기 방식의 플로팅 매스형 진동 트랜스듀서는 자석, 코일, 및 진동 멤브레인 등으로 구성되어 있는데, 이들의 기계적 구조 및 재료 물성에 따라 트랜스듀서의 진동 특성이 달라진다. 김 등은 유한 요소 해석 (finite element method) 등의 컴퓨터 모의 해석을 통한 진동 트랜스듀서 설계를 수행하여 인공 중이에 적합한 진동 특성을 가질 수 있도록 해주었다^[1-2]. 하지만, 플로팅 매스 트랜스듀서는 제작 과정상에서 발생하는 구조적 오차 및 제작 결함시의 문제점들로 인해 설계 시 의도와 다른 진동 특성을 가질 수 있고, 이렇게 제작된 진동 트랜스듀서는 향후 실제 환자에게 이식되었을 때의 진동체 진동 성능을 예측하기 어려운 문제점이 있다.

본 연구에서는 집중 요소 모델을 이용한 인공중이용 플로팅 매스형 진동 트랜스듀서의 출력 특성을 예측 및 평가 시 필요한 진동 트랜스듀서의 집중 요소 모델 파라미터 추정 방법을 제안하였고, LabVIEW 기반의 그래픽 유저 인터페이스 소프트웨어로 구현하였다. 제안된 방법은 실제 제작된 플로팅 매스형 진동체의 진동 변위 및 위상 데이터를 이용하여 해당 진동체의 집중 모델 파라미터들을 순차적 이차 프로그래밍 (SQP, sequential quadratic programming) 방법으로 추정하는 방식이다^[3]. 구현된 방법을 이용하여 측정 데이터에 가해지는 노이즈의 양에 따른 플로팅 매스형 진동 트랜스듀서의 집중 모델 파라미터 추정 시의 발생 오차 변화를 컴퓨터 모의 실험을 통해 조사하여 본 방법의 각 모델 파라미터별 추정 정확도를 확인하였다. 또한, 실제로 제작된 인공중이용 전자기 방식의 진동 트랜스듀서에 대해 LDV로 측정된 진동 변위 및 위상 데이터를 이용하여 진동체에 발생하는 힘과 진동 멤브레인의 강성 파라미터를 포함하는 집중 모델 파라미터들을 추정했고, 설계된 값들과의 비교를 통해 제안된 방법의 유용성을 평가하였다.

2. 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 소자 모델 파라미터 추정

2.1 플로팅 매스 트랜스듀서 집중 소자 기계 모델

인공중이용 플로팅 매스 트랜스듀서는 전통적으로 그림 1에서와 같이 인체의 측두골 중이강 내의 이소골의 특정 위치에 이식 설치되어 난청을 보상하게 된다. 플로팅 매스 트랜스듀서의 개발 과정에 있어서 이식 후 출력 성능을 미리 예측하는 것은 최적의 설계 및 제작에 유용하게 쓰일 수 있다. 신속한 출력 성능 예측에는 외이, 고막, 및 이소골과 진동 트랜스듀서를 다수의 운동 방정식으로 지배되는 간략화된 집중 소자 기계 모델을 적용할 수 있으며, 이때 실제 사용하고자 하는 플로팅 매스 트랜스듀서에 대한 집중 소자 모델의 파라미터값 추정이 필요하게 된다. 그림 2의 (a)는 실제로 제작되어진 전자기 방식의 플로팅 매스 트랜스듀서의 일례와 일반적인 구성 요소 부품들을 보여주며, 이러한 진동 트랜스듀서의 간략화된 집중 소자 기계 모델은 질량-스프링-제진기 (mass-spring-damper) 구조인 그림 2의 (b)로 표현할 수 있다.

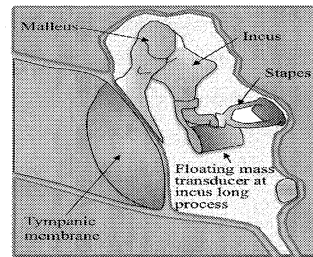


그림 1. 인공중이용 플로팅 매스 트랜스듀서의 전통적 이식 위치 및 방법

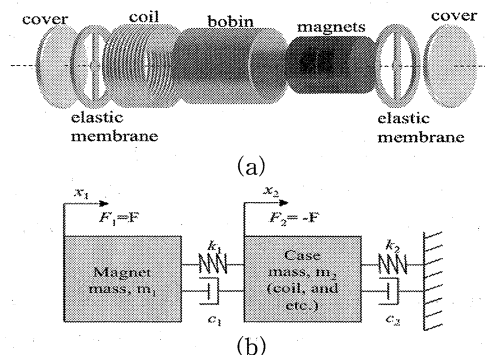


그림 2. 플로팅 매스 트랜스듀서의 (a) 주요 구성 요소 및 (b) 집중 요소 기계 모델

그림 2의 (b)와 같은 인공중이용 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 소자 모델은 뉴턴의 제 2 법칙인 운동 방정식으로 다음과 같이

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 (\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) + k_1 (x_1(t) - x_2(t)) = F \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) + c_2 \dot{x}_2(t) + c_1 (\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) + k_2 x_2(t) + k_1 (x_2(t) - x_1(t)) = -F \quad (2)$$

where m_1, m_2 : 자석, 외부 케이스 무게

c_1, c_2 : 진동 멤브레인, 코일 인출 케이블의 댐핑 계수

k_1, k_2 : 진동 멤브레인, 코일 인출 케이블의 강성 계수

으로 표현될 수 있다. 여기서, x_1, x_2 는 플로팅 매스형 트랜스듀서의 내부 자석 m_1 과 탄성 멤브레인 소자로 연결되는 코일 및 외부 케이스 m_2 의 발생 변위를 나타내며, m_1 과 m_2 에 각각 가해지는 힘은 코일에 흐르는 전류와 자석에서 나오는 자기장과의 상호 작용에 의한 로렌츠 힘 F 로서 작용-반작용 법칙에 의해 서로 반대 방향으로 발생된다. 식 (1)과 (2)는 행렬 형태로 나타낼 수 있으며, 특히, m_1 과 m_2 에 가해지는 힘이 임의의 주파수를 가지는 정형파 형태인 harmonic excitation이라고 가정하면 식 (1)과 (2)의 미분방정식을 간단히 표현할 수 있다. 즉, 식 (1)과 (2)는 다음과 같이 행렬식으로 나타내면

$$(-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])[X] = [F_e] \quad (3)$$

where

$$[X] = \begin{pmatrix} x_1 e^{j\theta_1} \\ x_2 e^{j\theta_2} \end{pmatrix}, [F_e] = \begin{pmatrix} F \\ -F \end{pmatrix}, [M] = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix},$$

$$[C] = \begin{pmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 + c_2 \end{pmatrix}, [K] = \begin{pmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{pmatrix}$$

로 정리되어,

$$[X] = [Y]^{-1}[F_e] \quad (4)$$

where

$$[Y] = -\omega^2[M] + j\omega[C] + [K]$$

와 같이 m_1 과 m_2 의 발생하는 변위 크기 $|x_1|, |x_2|$ 및 위상 θ_1, θ_2 정보를 바로 구할 수 있게 된다.

2.1 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 모델 파라미터 추정 방법

SQP 방법을 이용해서 플로팅 매스형 진동체의 집중 모델 파라미터들을 추정하기 위해서는 해당

목적 함수 (OF, object function) 및 제약 함수 (CF, constraint function)에 대한 설정이 필요하게 된다^[3]. 제작된 플로팅 매스형 트랜스듀서에 대해 미소 변위를 측정하는 레이저 도플러 진동계 (LDV)를 이용하여 크기 및 위상 데이터가 측정된 변위 행렬 $[\hat{X}]$ 를

$$[\hat{X}] = \begin{pmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_1 e^{j\hat{\theta}_1} \\ \hat{x}_2 e^{j\hat{\theta}_2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

로 정의하고, 해당 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 소자 모델 파라미터 추정을 위한 목적 함수 OF를

$$OF = \sum_{i=1}^N \{ |Re(X_2 - \hat{X}_2)| + |Im(X_2 - \hat{X}_2)| \} \quad (6)$$

where N : 변위 측정 주파수의 총 개수

로 설정하였다. 여기서 Re 와 Im 은 각각 실수 및 허수부를 뜻한다. 즉, 이 목적 함수는 측정에 사용된 모든 주파수에서의 플로팅 매스 트랜스듀서 진동 변위 데이터 \hat{X}_2 와 집중 소자 모델에 의한 이론적 계산값 X_2 과의 오차가 최소화 되도록 SQP 수행 과정에서 반복 수행된다. 한편, SQP 적용을 위해서 구하고자 하는 모델 파라미터들에 대한 제약 함수 (constraint function) CF를

$$CF(a_i) = (a_i - A_i)(a_i - B_i), \quad (7)$$

where $A_i < a_i < B_i$ and

a_i 는 $\{c_1, c_2, k_1, k_2, F\}$ 의 i 번째 원소

와 같이 설정하였다. 즉, 알고자하는 플로팅 매스형 트랜스듀서 모델의 대상 파라미터들의 값들이 어떤 범위 내에서 존재하는지 상한치 B_i 및 하한치 A_i 를 트랜스듀서 설계 시의 예상값을 기준으로 하여 설정한 후 5개의 파라미터들에 대한 제약 함수를 정하였다. 식 (6)과 (7)와 같은 목적 함수 및 제약 함수를 이용한 SQP 과정을 수행하게 되면, 식 (6)의 목적 함수를 최소화하고 동시에 식 (7)의 제약 함수를 만족하는 최적의 플로팅 매스 트랜스듀서 모델 파라미터 a_i 를 추정할 수 있게 된다.

2.3 집중 모델 파라미터 추정 방법의 구현

본 연구에서는 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 소자 모델 파라미터 추정을 위한 SQP 기반의 제안된 방법을 National Instruments 사의 LabVIEW 2009를 이용하여 인공중이용 연구 개발자들이 진동체의 진동 특성을 쉽게 이해할 수 있는 그래픽 유저

인터페이스 소프트웨어 형태로 그림 3과 같이 구현하였다. 구현된 플로팅 매스 트랜스듀서 집중 소자 모델 파라미터 추정 프로그램은 크게 모의 실험을 통한 모델 파라미터 추정 정확도 확인 및 진동 특성 예측하는 기능과 실제 제작된 트랜스듀서에 대한 집중 소자 모델 파라미터를 추정하는 기능으로 구성되어 있다. 이 때, 자석의 질량 m_1 및 코일 및 외부 케이스 질량 m_2 는 실제 트랜스듀서 제작 사진에 거의 명확하게 알고 있는 요소이므로 추정 대상에서 제외되며, 사용자가 프로그램에 값을 직접 입력하도록 하였다. SQP 방법을 이용한 FMT 파라미터 추정에 있어 필요한 각 추정 대상 파라미터의 제약 범위는 최대치와 최소치를 임의로 조절할 수 있게 하였고, 초기값은 제약 범위의 중간값 혹은 임의의 값을 선택하도록 하였다.

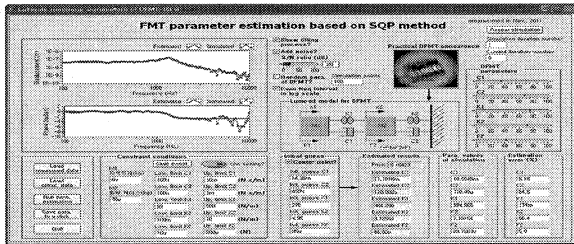
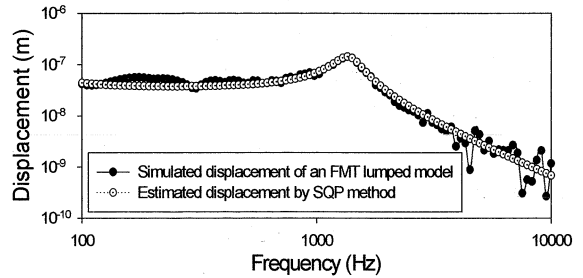


그림 3. 구현된 인공중이용 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 소자 모델 파라미터 추정 프로그램 GUI의 모습

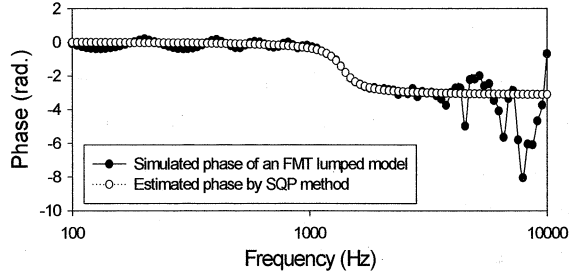
3. 실험 및 고찰

제안한 SQP 기반의 FMT 모델 파라미터 추정 방법과 구현된 소프트웨어 프로그램의 성능을 확인하기 위해 플로팅 매스 트랜스듀서의 컴퓨터 시뮬레이션된 진동 변위 데이터를 이용한 모의 실험과 실제 측정된 변위 데이터를 이용하여 집중 모델 파라미터를 추정하는 실험을 수행하였다. 특히, 모의 실험 시에는 구현된 프로그램을 통해 1/f 잡음을 가상으로 추가하여 잡음의 양에 따른 집중 모델 파라미터 추정 오차의 변화를 조사하여 본 방법의 추정 정확도를 확인하였다. 또한, 실제로 제작한 인공중이용 플로팅 매스 트랜스듀서에 대해 측정된 진동 변위 및 위상 데이터를 이용하여 총 5개의 집중 모델 파라미터들을 추정하여 기존 설계값과의 비교를 통해 그 추정 성능과 유용성을 확인하고자 하였다.

3.1 모의 실험을 통한 집중 모델 파라미터 추정 정확도 평가



(a)



(b)

그림 4. 구현된 프로그램을 통해 임의로 생성된 플로팅 매스 트랜스듀서의 진동 특성 (검정 원)과 제안한 SQP 방법으로 추정된 진동 특성 (백색 원)의 비교 결과; (a) 변위 특성 비교 및 (b) 위상 특성 비교.

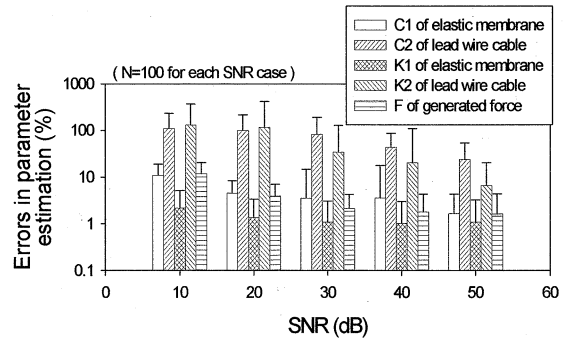


그림 5. 변위 및 위상 데이터의 SNR에 따른 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 모델 파라미터 추정값들의 평균 오차 비교

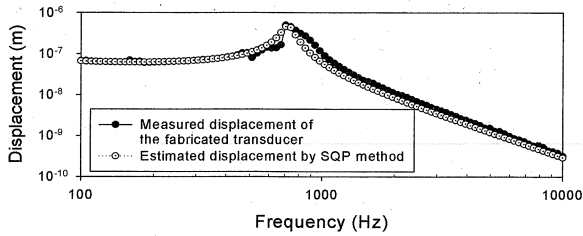
표 1. 그림 4의 모의 실험에 사용된 집중 소자 모델의 추정 대상 파라미터 및 조건들

파라미터	단위	추정 목표값	제약범위	초기값
c_1	$\text{mN}\cdot\text{s}/\text{m}$	10.55	0.1-100	50.05
c_2	$\mu\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	710.49	100-10000	5050
k_1	N/m	384.97	10-1000	505
k_2	N/m	7.16	0.1-10	5.05
F	μN	89.72	10-1000	505

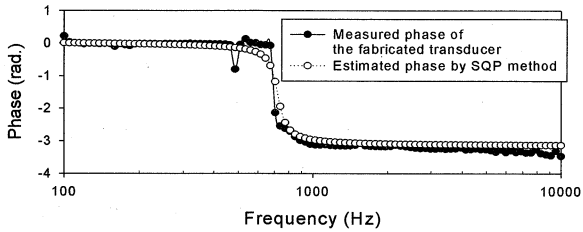
그림 4의 (a) 및 (b)는 구현된 프로그램을 통해 임의로 생성된 플로팅 매스 트랜스듀서의 진동 변위 및 위상 데이터와 이에 대해 SQP 기반의 집중 모델 파라미터 추정을 한 데이터를 비교한 결과 그래프를 보여준다. 이 때 사용된 추정 대상 파라미터 및 추정 조건들은 표 1에 나타내었다. 실제 진동체를 고려하여 m_1 과 m_2 는 각각 6 mg과 36 mg으로 가정하였다. 실험 결과에서 알 수 있듯이, 추정된 파라미터로 재구성된 트랜스듀서의 변위 및 위상 데이터는 SNR이 20 dB가 되도록 $1/f$ 잡음이 추가된 상황에서도 원래 생성된 진동 변위 및 위상 데이터에 근접함을 알 수 있다. 본 연구에서 구현된 프로그램에서 생성된 트랜스듀서 변위 및 위상 데이터에 가해지는 잡음의 세기에 따른 집중 모델 파라미터 추정 오차 변화를 컴퓨터 모의 실험을 통해 확인하였고, 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 변위 및 위상 데이터의 SNR을 10 dB씩 10 ~ 50 dB 범위로 변화시켜 가면서 각각의 SNR 경우에 대해 총 100번씩의 서로 다른 추정 목표 파라미터값이 제약 범위 (constraint condition) 내에서 임의로 선정되도록 하였으며, 각 경우에 대해 제안한 방법으로 집중 소자 모델 파라미터들을 추정하여 그 평균 오차를 산출하였다. 이 때 각 파라미터의 초기값은 제약 범위의 중간 값으로 정하였다. 그림 5의 결과에서 보듯이 파라미터 추정을 위한 입력 데이터의 SNR이 높을수록 추정 오차가 줄어들어 정확도는 높아짐을 알 수 있다. 탄성 멤브레인의 c_1 , k_1 및 발생 힘 F 는 입력 데이터의 SNR이 10 dB 이상일 경우 평균 약 10% 이하의 추정 오차로 비교적 정확히 추정 가능하였지만, 연결 케이블의 c_2 , k_2 는 모든 경우에서 오차가 상대적으로 컸다. 이 결과의 양상은 통상 인공중이용 플로팅 매스 트랜스듀서의 진동 변위 추정 시 사용되는 주파수 범위가 100 Hz - 20 kHz인 것으로 볼 때, 트랜스듀서의 진동 특성을 결정짓는 중요한 요소가 진동 멤브레인의 특성이라는 사실과 그 특성이 주로 약 1 k - 1.5 kHz 부근에서 공진 형태로 입력 데이터에 잘 반영되지만, 트랜스듀서 연결 케이블의 주요 공진 특성은 측정 주파수 범위를 벗어나 있기 때문인 것으로 사료된다. 본 결과를 통해, 제안한 SQP 방법을 이용한 플로팅 매스 트랜스듀서 집중 소자 모델 파라미터 추정은 20 dB 이상의 SNR을 가진 입력 데이터에 대해 트랜스듀서의 주요한 진동 특성 결정 요소인 c_1 , k_1 , F 파라미터들을 약 10% 이하의 오차로 추정할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

3.2 실제 제작된 트랜스듀서에 대한 집중 모델 파라미터 추정

제안한 SQP 기반의 파라미터 추정 방법과 구현된 소프트웨어 프로그램을 실제 제작된 인공중이용 플로팅 매스 트랜스듀서에 적용하여 집중 소자 모델 파라미터를 추정하여 보았다. 제작된 트랜스듀서의 구동을 위해 약 0.47 mA_{rms}의 정현파 전류를 100 - 10 kHz의 주파수 범위 내에서 인가하였으며, 이 때의 자체 진동 변위를 LDV (laser doppler vibrometer) 장비인 OFV-551 및 OFV-2000 (Polytec, Germany)을 이용하여 측정하였다. 이렇게 측정된 진동 변위 및 위상 데이터를 제안된 SQP 기반의 집중 소자 모델 파라미터 추정 프로그램에 입력하여 트랜스듀서의 집중 모델 파라미터들을 추정하였다. 단, 이 때 사용된 m_1 , m_2 는 각각 6 mg, 36 mg이었다. 구현된 프로그램을 통한 파라미터 추정 결과 및 추정 조건을 표 2에 나타내었고, 그림 6.(a)와 (b)에는 측정된 변위 및 위상 특성과 제안한 방법으로 추정된 모델 파라미터들을 가진 트랜스듀서의 변위 및 위상 특성을 각각 비교한 그래프를 도시하였다. 그림 7의 결과에서 보듯이 추정된 파라미터 값을 이용해 재구성된 트랜스듀서 변위의 크기 및 위상 그래프는 실제 측정 결과를 잘 반영해 주고 있음을 알 수 있다. 실험에 사용된 트랜스듀서는 설계 과정에서 128 N/m의 강성 계수 k_1 과 약 0.47 mA_{rms} 전류에 약 58×10^{-6} N의 로렌츠 힘 F 를 가지는 것으로 설정되었으나, 표 2의 추정 결과에서 보듯이 각각 104.38 N/m와 40.8×10^{-6} N의 값을 가지는 것으로 추정되었다. k_1 및 F 에 대한 설계값과 추정값 간의 차이는 트랜스듀서 제작 및 부품 조립과정 상에서의 구성 요소간의 부정합 및 불완전한 연결 접합의 문제로 인해 내부 자석과 코일의 위치 정렬의 변화를 일으키거나, 내부 자석과 외부 코일 등의 케이스를 연결하는 등가적인 스프링의 강성 계수 변화에 따른 것으로 판단된다. 이는 제안한 방법이 실제 제작된 플로팅 매스 트랜스듀서의 집중 소자 모델 파라미터 값이 제작 오류로 인해 변동되었음을 알아낼 수 있게 해주고, 설계값과 다른 변동된 파라미터 정보를 트랜스듀서 집중 소자 모델에 반영할 수 있음을 보여준다. 연결 케이블 파라미터인 c_2 , k_2 의 추정 오차는 상기 언급된 바와 같이 클 것으로 예상되기 때문에 본 방법으로 추정된 값들을 신뢰할 수 없지만, 그로 인한 진동 변위 및 위상 특성 변화는 그림 6에서와 같이 크지 않음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 측정된 변위 및 위상 특성 (검정 원)과 제안한 방법으로 추정된 모델 파라미터들을 가진 트랜스듀서의 변위 및 위상 특성 (백색 원)을 각각 비교한 그래프; (a) 변위 특성 비교과 (b) 위상 특성 비교

표 2. 실제 제작된 트랜스듀서에 대한 집중 소자 모델 추정 결과 및 조건들

파라미터	단위	제약범위	초기값	추정값
c_1	$mN \cdot s/m$	0.1-100	14.95	2.72
c_2	$\mu N \cdot s/m$	100-10000	450.00	6260
k_1	N/m	10-1000	235	104.38
k_2	N/m	0.1-10	4.95	3.33
F	μN	10-1000	95.00	40.80

4. 결론

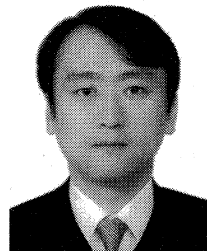
본 연구에서는 제작된 인공중이용 플로팅 메스형 진동 트랜스듀서의 집중 요소 모델 파라미터를 신속히 알아내기 위해 순차적 이차 프로그래밍 (SQP, sequential quadratic programming) 기반의 추정 방법을 제안하였고 그래픽 유저 인터페이스 소프트웨어 형태로 구현하였다. 컴퓨터 모의 실험을 통해 제안한 SQP 기반의 트랜스듀서 집중 소자 모델 파라미터 추정은 20 dB 이상의 SNR을 가진 입력 데이터에 대해 트랜스듀서의 주요한 진동 특성 결정 요소인 탄성 멤브레인과 발생하는 로렌츠 힘에 관한 파라미터들을 약 10% 이하의 오차로 추정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 제안한 방법이 실제 제작된

플로팅 메스 트랜스듀서의 집중 소자 모델 파라미터 값이 제작 오류로 인해 변동되었음을 알아낼 수 있고, 설계치와 다르게 변동된 파라미터 정보를 트랜스듀서 집중 소자 모델에 반영할 수 있음을 확인하였다. 향후 이렇게 추정된 트랜스듀서 집중 소자 모델을 컴퓨터 모델화된 청각 중이 전달계 전체에 대한 집중 소자 모델에 적용하여 제작된 트랜스듀서의 이식 후 출력 성능을 사체 측두골 없이 예측할 수 있는지에 관한 연구가 기대된다.

참고 문헌

- [1] M.K. Kim, Y.H. Yoon, I.Y. Park, and J.H. Cho, "Design of differential electromagnetic transducer for implantable middle ear hearing device using finite element method", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.130-131, no.0, pp.234-240, Aug. 2006.
- [2] M.K. Kim, I.Y. Park, B.S. Song, and J.H. Cho, "Fabrication and optimal design of differential electromagnetic transducer for implantable middle ear hearing device", *Biosensors and Bioelectronics*, vol.21, no.11, pp.2170-2175, May 2006.
- [3] R. Fletcher, *Practical methods fo optimization. Vol. 1, unconstrained optimization and constrained optimization Vol. 2*, Wiley, New York, 1980.

박 일 용



1998년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업 (학사)

2000년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업 (석사)

2004년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업 (박사)

2004년 3월 - 2008년 2월 경북대학교 의과대학 연구교수

2008년 3월 - 2010년 2월 단국대학교 의과대학 의공학교실 전임강사

2010년 3월 - 현재 단국대학교 의과대학 의공학교실 조교수

관심분야 : 의용전자공학, 생체 신호 처리 및 시스템, 센서 시스템, 이식형 보청기