

완전 이식형 인공중이의 하이브리드 음향센서 특성 평가를 위한 귀 물리모델

신동호[†], 문하준^{**}, 김명남^{***}, 조진호^{****}

A Physical Ear Model for Evaluating Hybrid-acoustic Sensor Characteristics of Fully Implantable Middle-ear Hearing Aid

Dong Ho Shin[†], Ha Jun Moon^{**}, Myoung Nam Kim^{***}, Jin-Ho Cho^{****}

ABSTRACT

In this paper, biomimetic based physical ear model proposed for measuring the characteristics of a hybrid-acoustic sensor for fully implantable middle-ear hearing aid. The proposed physical ear model consists of the external ear, middle-ear, and cochlea. The physical ear model was implemented based on the anatomical structure and CT images of the human ear. To confirm the characteristics of the ear model, the vibrational characteristics of the stapes was measured after applying sound pressure to the tympanic membrane. The measured results were compared with the vibrational characteristics of the human temporal bone specified by ASTM F2504-05. Through the comparison results, the feasibility of the proposed ear model was confirmed. Then, after attaching the hybrid-acoustic sensor to the ear model, the output characteristics of the ECM and acceleration sensor were measured according to the sound pressure. The measured results were compared with previous studies using human temporal bone, and the usefulness of the proposed physical ear model was verified through the analysis results.

Key words: Physical Ear Model, Hybrid-acoustic Sensor, Fully Implantable Middle-ear Hearing Aid, Temporal Bone

1. 서 론

지금까지 난청을 해소하기 위한 다양한 음향 전달 메커니즘을 가진 청각 보조기가 개발되고 있다 [1-3]. 그 중에서도 난청자에게 자연음에 가까운 음질 (sound quality)과 우수한 어음명료도 (speech discrimination score)를 제공하는 이식형 인공중이

(middle-ear implant)에 대한 개발이 활발히 진행되어 왔다[4-6]. 그러나 지금까지 개발된 인공중이는 체외기가 외부에 존재하는 부분 이식형 구조로서, 체외기의 탈부착으로 인해 발생하는 불편함과 미용상의 문제로 사용자의 만족도를 충족시키지 못하고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 완전 이식형 인공중이 (fully implantable middle-ear im-

※ Corresponding Author : Jin-Ho Cho, Address: (41944) Gukchaebosang-ro 680, Jung-gu, Daegu, Korea, TEL : +82-53-427-5538, FAX : +82-53-427-5539, E-mail : jhcho@ee.knu.ac.kr

Receipt date : July 10, 2019, Approval date : July 15, 2019

[†] Institute of Biomedical Engineering Research, Kyungpook National University

(E-mail : swap9552@naver.com)

^{**} Sigma Delta Technologies

(E-mail : mhj1990@naver.com)

^{***} Dept. of Biomedical Engineering School of Medicine, Kyungpook National University
(E-mail : kimmn@knu.ac.kr)

^{****} Institute of Biomedical Engineering Research, Kyungpook National University

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2016R1A6A3A11931621 and 2019R1C1C1006176)

plant)에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

대표적인 완전 이식형 인공중이에는 Envoy 사의 Esteem, Implex 사의 TICA 그리고 Cochlear 사의 Carina가 있다[7-9]. Envoy 사의 Esteem은 음향센서를 이소골에 이식하여 소리에 의한 진동을 포집하는 방식이며, 이는 부착 환경에 따라 음향 포집 특성이 달라질 수 있는 단점이 있다[7]. Implex 사의 TICA는 외이도 피하에 음향센서를 이식하는 방식이며, 외이도의 얇은 피부 두께로 인하여 이식 후 음향센서가 돌출 될 수 있는 문제가 있다[8]. Cochlear 사의 Carina는 음향센서를 측두골 피하에 이식하는 방식이며, 피부에 의해 감도 저하가 두드러지게 나타나는 문제가 있다[9]. 이러한 문제점으로 인하여 완전 이식형 인공중이는 상용화에 성공하지 못하였다. 즉, 완전 이식형 인공중이에서는 음향센서가 가장 중요한 요소이며, 음향센서가 가지는 문제점을 필수적으로 해결해야만 완전 이식형 인공중이를 구현할 수 있다.

최근 기존의 완전 이식형 인공중이용 음향센서가 가지는 문제점을 근본적으로 해결하기 위해 조 등 [10]이 하이브리드 음향센서 (hybrid-acoustic sensor)를 제안하였다. 제안한 하이브리드 음향센서는 진동 기반의 가속도센서와 음압 기반의 ECM을 접목한 구조로서, 고막제 (umbo)에 거치하여 외이도로 통해 들어오는 음압 신호는 ECM이 포집하고 음압에 의해 진동하는 고막의 움직임은 가속도 센서가 포집하게 된다. 개발된 하이브리드 마이크로폰의 특성 확인을 위해 사체 실험을 수행하였으며, 사체 실험 결과를 통해 제안한 하이브리드 음향센서는 기존 음향센서를 대체하여 사용할 수 있는 가능성을 확인하였다[10]. 일반적으로 개발단계의 이식형 인공중이용 음향센서는 사체 실험을 통해 성능 평가가 이루어지기 때문에 사체 실험은 필수적으로 요구된다. 그러나 국내 여건상 사체 수급이 용이하지 않으며, 사체마다 특성이 다르고 온도, 습도 등과 같은 환경적인 요인에 민감하기 때문에 재현성 있는 실험 결과 도출에 어려움이 있다. 그러므로 개발단계의 이식형 인공중이용 음향센서를 평가하기 위해서는 외부 환경 요인에 영향을 받지 않으면서도 재현성 있는 실험이 가능한 인체 측두골을 대체할 수 있는 귀 물리모델 제작이 필요하다.

본 논문에서는 완전 이식형 인공중이용 하이브리드 음향센서 특성 평가를 위한 귀 물리모델을 제안 및 구현하였다. 제안한 귀 물리모델은 외이 (external ear), 중이 (middle-ear), 그리고 달팽이관 (cochlea)으로 구성되며, 인간 귀의 해부학적 구조를 바탕으로 제작하였다. 제작된 귀 물리모델의 주파수 응답 특성을 확인하기 위해 외이도에 94 dB SPL에 해당하는 음압을 인가한 후, 등자뼈 (stapes)의 진동 특성을 레이저 도플러 바이브로미터 (laser Doppler vibrometer, LDV)로 측정하였다. 그리고 측정된 결과를 ASTM F2504-05와 비교함으로써 제안한 귀 물리모델의 유효성을 검증하였다[11]. 그런 다음, 고막제에 하이브리드 음향센서를 부착하여 외이도에 94 dB SPL에 해당하는 음압을 인가한 후, 하이브리드 음향센서의 출력을 측정하였다. 측정된 결과를 조 등의 사체 실험 결과 [10]와 비교하여 귀 물리모델의 활용 가능성을 확인하였다.

2. 제안한 귀 물리모델

해부학적으로 인간 귀는 Fig. 1과 같이 크게 외이, 중이 그리고 내이로 구분된다. 인간 귀의 음향 전달 경로는 Fig. 1과 같이 외이도를 통해 들어온 음압은 고막 (tympanic membrane)을 진동시키고, 고막과 연결된 이소골 (ossicular chain)은 고막의 진동을 받아 달팽이관의 난원창 (oval window)으로 진동을 전달하게 된다. 난원창에 전달된 진동에 의해 달팽이관의 유모세포 (hair cell)는 자극되어 전기적 신호를

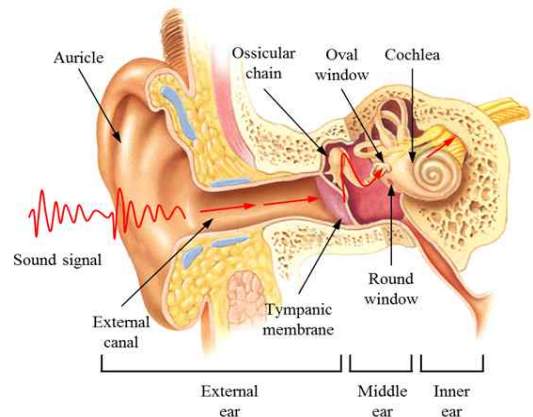


Fig. 1. Anatomical structures and sound transmission pathways of the human ear [12].

발생시키고, 이 전기적 신호는 청신경을 통해 대뇌로 전달됨으로써 소리를 인지하게 된다[13].

외이는 고막, 귓바퀴, 그리고 외이도로 구성되어 있다. 외이도의 직경은 평균 7 mm, 길이는 25 mm이고, 고막의 직경은 평균 8 mm, 두께는 0.1 mm이다. 중이는 망치뼈 (malleus), 모루뼈 (incus), 등자뼈로 이루어진 이소골과 이를 지탱해주는 여러 개의 인대 (ligament)와 힘줄 (tendon)로 구성되어 있다. 그리고 내이는 전정기관 (vestibular organ), 반고리관 (semicircular canal), 달팽이관으로 구성되며, 달팽이관은 2.5 바퀴 정도 감겨져 있으며 펼치면 약 35 mm 정도의 끝이 막힌 원추형 모양이다. 그리고 달팽이관에는 림프액 (lymph)이 가득 채워진 전정계 (scala vestibule), 중간계 (scala media), 고실계 (scala tympani)가 존재하며 각각은 라이스너막 (reissner's membrane)과 기저막 (basilar membrane)으로 구분되어진다. 전정계와 고실계에는 각각 난원창과 정원창 (round window)이 존재하며, 와우공 (helicotrema)을 통해 서로 연결되어 있다[14].

제안한 귀 물리모델은 인간 귀의 해부학적 정보를 바탕으로 제작 용이성을 고려하여 달팽이관은 상하가 대칭적으로 길게 펼쳐진 모양으로 전정계, 고실계, 난원창, 정원창, 기저막 그리고 와우공만 표현하

였다. 그리고 외이와 중이는 각각 귓바퀴, 외이도, 고막, 이소골 그리고 추골 인대 (superior malleolar ligament)와 등골근(stapedial muscle tendon)을 각각 1 개씩 표현하였다. 외이와 달팽이관은 SUS304 (stainless steel 304)와 아크릴 (acrylic)에 CNC (computer numerical control) 공정을 이용하여 제작하였다. 이소골은 실제 인간의 이소골 CT (computed tomography) 영상 이미지 (image)를 기반으로 RP (rapid prototyping) 공정을 이용하여 제작하였다. Fig. 2는 외이, 중이, 달팽이관을 각각 구현한 사진이며, Table 1에서는 제작된 귀 물리모델의 상세 사항을 표기하였다.

3. 귀 물리모델 특성 측정 실험 결과 및 고찰

제안한 귀 물리모델은 실제 사람 귀의 청각 전달 메커니즘과 유사한 특성을 가져야 한다. 정상인의 사체 측두골 특성은 ASTM F2504-05에서 측정 방법을 제시하고 있으며, 측정 방법은 외이도를 통해 94 dB SPL에 해당하는 음압을 인가한 후 등자뼈의 진동 특성을 LDV로 측정한다. 이와 같이 제작된 귀 물리모델의 주파수 응답 특성을 확인하기 위해 ASTM F2504-05에서 제시한 측정 방법을 이용하여 평가하

Table 1. Specifications of the fabricated physical ear model

Component	Dimension	Material & method
Auricle	-	Silicone rubber
Ear canal	Length: 25 mm Diameter: 7 mm	Stainless steel 304
Tympanic membrane	Diameter: 8 mm Thickness: 0.1 mm	Latex
Ossicular chain	-	Rapid Prototyping
Superior malleolar ligament, stapedial muscle tendon	-	Silicone rubber
Cochlea	Length: 35 mm Volume: about 85 mm ³	Acrylic
Round window	Diameter: 2 mm Thickness: 0.02 mm	Latex
Oval window	Diameter: 2 mm Thickness: 0.02 mm	Latex
Basilar membrane	Length: 32 mm Thickness: 0.02 mm	Latex
Helicotrema	Hole: 0.5 mm	-
Lymph	Volume: about 85 mm ³	Water

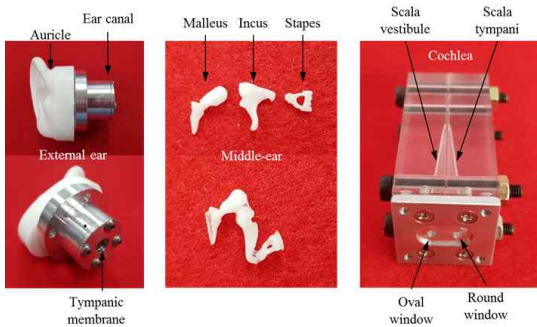


Fig. 2. Implemented the physical ear model.

였다.

Fig. 3과 같이 스피커 (ER-2; Etymotic Inc., USA)를 이용하여 외이도에 음압 (100 Hz~10 kHz)을 인가한 후, 레퍼런스 마이크로폰 (ER-7C; Etymotic Inc., USA)을 이용하여 일정하게 94 dB SPL에 해당하는 음압이 되도록 보정하였다. 그런 다음, 등자뼈의 진동 특성을 측정하기 위해 반사판 (reflective beads)을 등자뼈에 부착하고, LDV (OFV-551 and OFV-5000; Polytec GmbH, Germany)를 이용하여 등자뼈의 주파수 응답 특성을 측정하였다. LDV를 이용하여 측정된 신호는 FFT 기반의 데이터 수집 장치 (DAQ; NI PXI-4461 board in an NI PXI-1042; National Instruments Co., USA)를 통해 자동 저장되도록 하였다. Fig. 4는 측정 결과를 나타낸 것으로 붉은색 실선은 귀 물리모델의 주파수 응답 특성이고, 검은색 점선은 ASTM F2504-05에서 규정한 정상인의 사체 측두골이 가져야하는 최대 및 최소 진동 주파수 특성을 의미한다. 측정된 결과 (붉은색 실선)를 살펴보면 전반적으로 ASTM F2504-05의 규정에 만

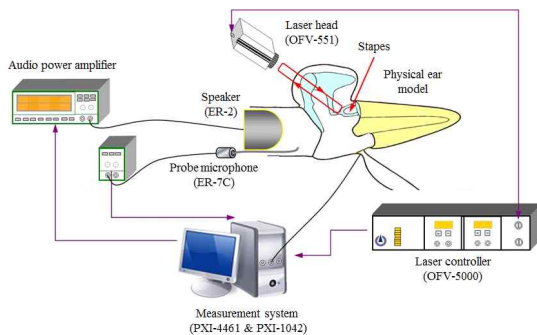


Fig. 3. Experimental setup for measurement of frequency response characteristics using physical ear model.

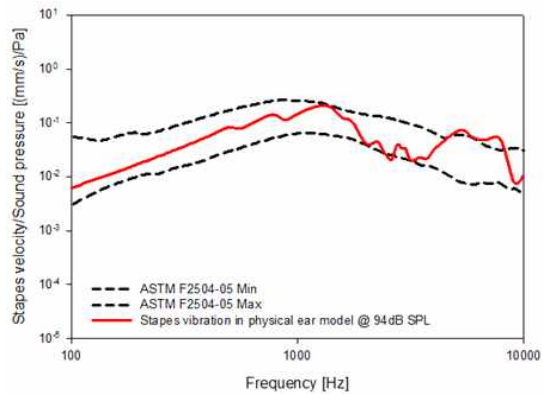


Fig. 4. Physical ear model frequency response characteristics according to 94 dB SPL.

족하는 특성을 보였다. 측정 결과를 바탕으로 제작된 귀 물리모델은 사체실험에서 사용하고자 하는 인체 측두골을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

앞서 수행된 실험 결과를 통해 제안한 귀 물리모델의 활용 가능성을 확인하였다. 더욱 명확하게 귀 물리모델의 유용성을 확인하기 위해 인체 측두골을 이용한 선행연구 결과와 비교 분석을 수행하였다. 비교 분석을 위해 조 등이 개발한 하이브리드 음향센서를 사용하여 선행연구와 동일한 방법으로 실험을 수행하였다[10]. Fig. 5와 같이 하이브리드 음향센서를 고막제와 연결된 망치뼈에 부착한 뒤 외이도를 통해 94 dB SPL에 해당하는 음압을 인가하였다. 그런 다음, 하이브리드 음향센서의 가속도 센서와 ECM의 출력 전압을 각각 측정하였다. 측정된 결과는 Fig. 6(a)와 같으며, 검은색 실선과 붉은색 실선은 각각 물리모델의 고막에 94 dB SPL이 인가하였을 때, ECM의 출력 전압과 가속도센서의 출력 전압을 의미한다. 측정 결과를 살펴보면 ECM의 출력 신호는 2 kHz까지 전반적으로 평탄한 특성을 나타내고 있고, 가속도센서의 출력은 3 kHz 이후 대역부터 ECM 출력보다 높은 감도를 가졌다. 귀 물리모델을 통해 측정된 실험 결과를 검증하기 위해 조 등에 의한 선행연구 결과와 비교하였다. Fig. 6(b)는 인체 측두골을 이용한 하이브리드 음향센서 출력 특성을 나타낸 것으로, 검은 점선과 붉은 점선은 각각 ECM과 가속도센서의 출력 특성을 의미한다 [10]. 두 그래프를 비교해보면 3 kHz 이하 대역에서는 ECM의 출력이 높고, 3 kHz 이상 대역에서는 가속도센서의 출력이 높다. ECM의 출력 특성은 귀 물리모델과 인체 측두골을

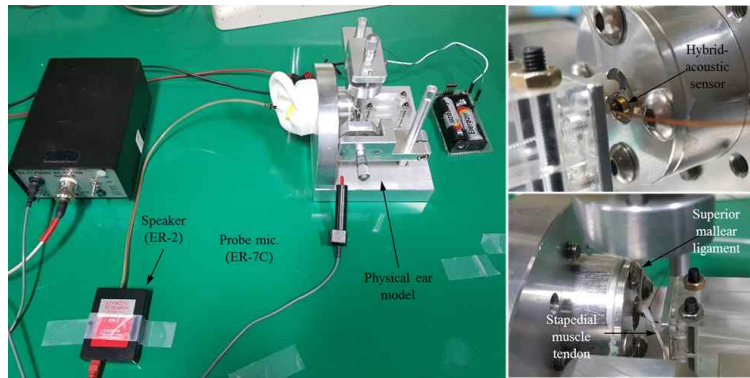


Fig. 5. Physical ear model with hybrid-acoustic sensor.

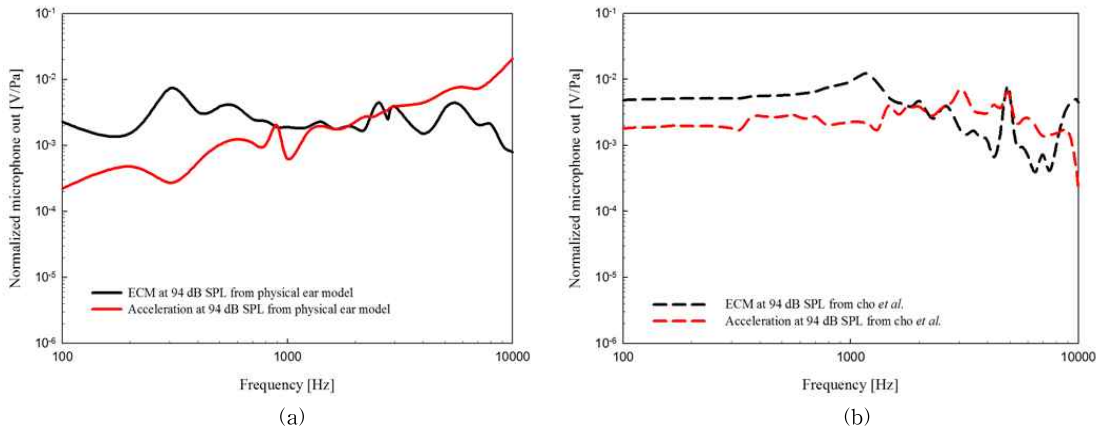


Fig. 6. (a) Hybrid-acoustic sensor measurement results using physical ear model and (b) Hybrid-acoustic sensor measurement results using temporal bone (from Cho et al.)[10].

이용한 실험 결과가 유사한 경향을 보였으나, 가속도 센서의 출력이 상이함을 보였다. 이러한 결과는 두 실험의 실험 모델 차이로 인해 발생한 것으로 예측된다. 즉, 귀 물리모델은 고막, 이소골 그리고 달팽이관의 난원창이 모두 존재하는 상태로 이소골 전체와 림프액의 질량이 부하로 작용하였지만, 인체 측두골 실험에서는 실험의 편의성을 위해 이소골 일부 (모루뼈)를 제거하였기 때문에 상대적으로 부하가 적었다. 따라서 귀 물리모델을 이용한 실험에서는 높은 부하로 인해 가속도 센서의 저주파 영역 출력이 인체 측두골 실험보다 상대적으로 낮은 출력을 보였고, 고주파에서는 부하의 관성에 의해 높은 출력을 보인 것으로 유추된다. 그러나 두 실험 모두 조 등이 개발한 하이브리드형 음향센서의 특성이 잘 반영되어 도출된 결과로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 완전 이식형 인공중이용 하이브리드 음향센서 특성 평가를 위한 외이, 중이 그리고 달팽이관이 결합된 귀 물리모델을 제안하였다. 제안한 귀 물리모델은 인간 귀의 CT 이미지를 바탕으로 CNC 공정과 RP 공정을 이용하여 실제 사이즈와 유사하게 제작하였다. 제작된 귀 물리모델은 ASTM F2504-05에서 규정하는 측정 방법을 사용하여 효용성을 검증하였다. 귀 물리모델의 활용 가능성을 확인하기 위해, 고막제와 연결된 망치뼈에 하이브리드 음향센서를 부착한 후 외이도를 통해 94 dB SPL에 해당하는 음압을 인가하였다. 그리고 주파수에 따른 하이브리드 음향센서의 ECM과 가속도센서의 출력 특성을 측정하였으며, 측정된 결과를 인체 측두골을 이용한 선행연구 결과와 비교 분석하였다. 그 결과, 인체 측두

골을 이용한 선행 연구 결과와 유사한 출력 특성을 보였다. 따라서 제안한 귀 물리모델은 개발 단계의 하이브리드 음향센서 특성을 평가하기에 적합하며 인체 측두골을 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCE

- [1] R.L. Goode, M.L. Rosenbaum, and A.J. Maniglia, "The History and Development of the Implantable Hearing Aid," *The Otolaryngologic Clinics of North America*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-16, 1995.
- [2] M.J. Osberger, R.T. Miyamoto, S. Zimmerman Phillips, J.L. Kemink, B.S. Stroer, J.S. Firszt, et al., "Independent Evaluation of the Speech Perception Abilities of Children with the Nucleus 22-channel Cochlear Implant System," *Ear and Hearing*, Vol. 12, No. 4, pp. 66-80, 1991.
- [3] D.S. Haynes, J.A. Young, G.B. Wanna, and M.E. Glasscock, "Middle Ear of Implantable Hearing Devices: An Overview," *Trends in Amplification*, Vol. 13, No. 3, pp. 206-214, 2009.
- [4] I. Mosnier, O. Sterkers, D. Bouccara, S. Labassi, J.P. Bebear, P. Bordure, et al., "Benefit of the Vibrant Soundbridge Device in Patients Implanted for 5 to 8 years," *Ear and Hearing*, Vol. 29, No. 2, pp. 281-284, 2008.
- [5] V. Colletti, M. Carner, and L. Colletti, "TORP vs Round Window Implant for Hearing Restoration of Patients with Extensive Ossicular Chain Defect," *Acta Otolaryngol*, Vol. 129, No. 4, pp. 449-452, 2009.
- [6] K.W. Seong, K.Y. Lee, M.N. Kim, and J.H. Cho, "A Proposal of Output Method of Round Window Stimulation Type Middle Ear Implants using Acoustic Transmission," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 21, No. 6, pp. 678-684, 2018.
- [7] E.M. Kraus, J.A. Shohet, and P.J. Catalano, "Envoy Esteem Totally Implantable Hearing System: Phase 2 Trial, 1-year Hearing Results," *American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, Vol. 145, No. 1, pp. 100-109, 2011.
- [8] H. Leysieffer, J.W. Baumann, R. Mayer, D. Muler, G. Muler, T. Schon, et al., "A Totally Implantable Hearing Aid for Inner Ear Deafness: TICA LZ 3001," *Hals Nasen Ohrenheilkund*, Vol. 46, No. 10, pp. 853-863, 1998.
- [9] J. Pulcherio, A. Bittencourt, and R. Bento, "Carina® and Esteem®: A Systematic Review of Fully Implantable Hearing Devices," *Public Library of Science One*, Vol. 9, No. 10, e110636, 2014.
- [10] K.W. Seong, H.J. Mun, D.H. Shin, J.H. Kim, H.H. Nakajima, S. Puria, et al., "A Vibro-Acoustic Hybrid Implantable Microphone for Middle Ear Hearing Aids and Cochlear Implants," *Sensors*, Vol. 19, No. 5, E1117, 2019.
- [11] Standard Practice for Describing System Output of Implantable Middle Ear Hearing Devices, <http://www.astm.org/Standards/F2504.htm> (accessed January 22, 2018).
- [12] D.H. Shin, *Tri-Coil Bellows Transducer for Round Window Driving Implantable Middle-Ear Hearing Aids*, Doctor of Engineering Thesis, Kyungpook National University Press, Korea, 2016.
- [13] R.L. Drake, W. Vogl, and A.W.M. Mitchell, *Gray's Anatomy for Students*, Elsevier Health Sciences Publishers, Philadelphia, USA, 2009.
- [14] V.D. Graaff and K. Marshall, *Human Anatomy*, McGraw-Hill Publishers, New York, USA, 2002.



신 동 호

2009년 2월 동서대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 2011년 8월 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(공학석사)
 2016년 2월 경북대학교 대학원 전자공학부 졸업(공학박사)

2016년~현재 경북대학교 의공학연구소 리서치펠로우
 관심분야: 이식형 보청기용 액츄에이터 설계, 유한요소 해석, 미세 전자 기계시스템



김 명 남

1988년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1990년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1995년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1996년~현재 경북대학교 의학전문대학원 의공학교실
 주임교수
 관심분야: 생체신호처리시스템, 의학영상처리



문 하 준

2015년 8월 경북대학교 IT전자공학부 졸업(공학사)
 2018년 2월 경북대학교 대학원 IT전자공학부 졸업(공학석사)
 2018년~현재 시그마텔타테크놀로지 책임연구원

관심분야: 이식형 인공중이, 이식형 마이크로폰



조 진 호

1977년 2월 경북대학교 공업교육학과(전기공학전공) 졸업(공학사)
 1979년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1988년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1984년~2018년 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수
 2018년~현재 경북대학교 의공학연구소 연구교수
 관심분야: 의용전자, 생체신호처리, 이식형 인공중이