

정원창 구동형 인공중이의 출력 전달 방식에 따른 주파수 특성 연구

성기웅¹ · 신동호² · 나승대¹ · 이정현³ · 김명남³ · 조진호⁴

¹경북대학교병원 의공학과, ²경북대학교 IT대학 전자공학과,
³경북대학교 의과대학 의공학교실, ⁴경북대학교 의공학연구소

A Study on Frequency Characteristics According to the Output Transmission Method of Round Window Driving Middle Ear Implants

KiWoong Seong¹, DongHo Shin², SungDae Na¹, JyungHyun Lee³, MyoungNam Kim³ and Jin-Ho Cho⁴

¹Department of Biomedical Engineering, Kyungpook National University Hospital

²Department of Electrical Engineering, College of IT, Kyungpook National University

³Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Kyungpook National University

⁴Biomedical Engineering Institute, Kyungpook National University Hospital

(Manuscript received 17 April 2018 ; revised 2 October 2018 ; accepted 10 October 2018)

Abstract: In this paper, we investigated the efficiency according to the output transmission method of the round window driving type AMEIs (active middle ear implants) through the cadaveric experiment. For the experiment, we fabricated DRT (direct rod transducer) and FMT (floating mass transducer) type vibrational transducers based on our previous studies and conducted their output characteristics were measured. TCBT (tri-coil bellows transducer) and DFMT (differential floating mass transducer) were implemented with the same driving force and electrical characteristics as one of DRT and FMT, respectively. In the experiment using three human temporal bone, normal stapes vibration was measured with 1 Pa in front of tympanic membrane, and then was compared with each output of transducers. From the comparison, the DRT type vibration transducer was superior in overall energy transfer efficiency, especially in the low frequency range. There was no difference in implantation difficulty between the two transducers. The results of this study suggest that the DRT type vibrational transducer is more efficient and needs further study to overcome the low frequency degradation in round window approaching with FMT.

Key words: FMT, DRT, Differential floating mass transducer, Tri-coil bellows transducer, Cadaveric experiment

1. 서 론

인공중이(active middle ear implants, AMEIs)는 기존

기도형 보청기의 대안으로서 매우 우수한 음질을 전달하는 감각 신경성 및 혼합성 난청에 매우 효과적 청각재활기기이다[1-3]. 인공중이는 청각 전달 경로 상에 음향 신호에 해당하는 증폭된 진동 신호를 전달함으로써 난청자의 청력 손실을 보상한다. 진동을 발생시키는 인공중이의 출력 장치는 VSB®(Med-El GmbH, Austria)와 같은 전자기형 또는 Esteem®(Envoy Medical Co., USA)과 같은 압전형의 진동 트랜스듀서를 사용하며, 압전형은 전자기형에 비해 높은 구동 전압을 요구하기 때문에 상업적으로 대부분 전자기형의 진동 트랜스듀서가 활용되고 있다[4-5].

상기의 구동력 발생방법에 따른 분류 이외에도 구동력의 전달 방식과 구동점에 따라 인공중이를 여타의 분류로 나누

Corresponding Author : Jin-Ho Cho
Biomedical Engineering Institute, Kyungpook National University Hospital
TEL: 053-427-5538, 010-4520-6167
E-mail: jhcho@knu.ac.kr

이 논문은 정부(교육부, 과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (No. NRF-2016R1A2A1A05005413, 2017R1D1A1B03031388, 2017M3A9E2065284). 또한, 본 실험에 사용된 인체 측두골과 기자재는 Anatomy Gift Foundation과 스탠포드 대학의 MEL(mechanical engineering laboratory)과의 공동연구를 통해 수급되었음을 밝힘.

기도 한다. 인공중이의 출력장치는 구동력의 전달 방식에 따라 DRT(direct rod transducer)방식과 FMT(floating mass transducer)방식으로 구분된다. DRT는 중이강 외벽과 같이 단단한 물체를 지지대로 하여 진동 트랜스듀서에서 발생된 구동력을 이소골을 통해 내이로 전달하는 방식이고 FMT는 진동 트랜스듀서가 두 개의 질량체가 스프링으로 연결된 구조를 띄고 있어 이들의 관성력(inertia)을 이용하여 지지체 없이 구동력을 전달할 수가 있다[6].

최근에는 정원창(round window)을 구동점으로 하는 새로운 음향 전달 매커니즘에 관한 아이디어가 제안되었다[7]. 고식적 인공중이는 고막제(umbo)나 망치뼈(incus) 등에 진동을 인가하고 이를 난원창(oval window)으로 전달하는 방식을 취하고 있으나 이는 청각전달경로 상의 문제가 없는 난청자에게만 적용이 가능하다. 반면, 정원창 구동 방식은 중이염 등으로 인해 이소골이 소실된 전도성 난청에게도 적용이 가능한 장점을 가짐으로써 인공중이의 적용증을 확대할 수 있는 기회를 제공하고 있다. 따라서, 최근의 연구 동향은 FMT™ (Med-El GmbH, Austria) 나 MET™ (Cochlear Ltd., Australia)와 같은 난원창 구동 방식의 진동 트랜스듀서를 정원창 구동에 활용한 임상보고가 주류를 이루고 있다[8-11].

기존의 인공중이는 청각재활기기 본연의 기능인 우수한 출력 음질을 갖추고 있으나 적용증의 한계로 인해 관련 분야에서 큰 파급을 갖지 못하고 있다. 정원창 구동 방식은 이러한 적용증의 한계를 넓히는 수단임이 명백하나 관련 연구는 여전히 난원창 구동형의 진동 트랜스듀서를 이용한 임상적 보고에 그치고 있다. 관련 연구의 보고들은 새로운 음향 전달 매커니즘에 대한 임상적 검증 수준에 있을 뿐 실험에 사용된 진동 트랜스듀서와 구동력 전달 방식을 달리 하여 인공중이의 핵심기술인 진동 트랜스듀서의 설계를 위한 핵심적인 정보를 제공하지 못하고 있다.

본 논문에서는 정원창 구동형 인공중이 출력장치의 구동력 전달방식에 따른 효율을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 DRT 및 FMT의 구동력 전달 방식을 갖는 진동 트랜스듀서를 제작하고 이들의 출력 특성을 측정하기 위한 사체 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 진동 트랜스듀서의 구동력 전달 방식에 따른 이식 술기의 차이점과 구동력 전달 효율의 차이를 기술하고 추후 정원창 구동형의 진동 트랜스듀서 설계에 기반 기술이 되고자 하였다.

II. 실험 방법

1. 진동 트랜스듀서와 측두골

선행 연구를 통해 DRT와 FMT 구동력 전달 방식을 갖는 DFMT(differential floating mass transducer)와 TCBT(tri-coil bellows transducer)를 제작하였다[12-15]. 제작된 진동 트랜스듀서들의 구조 및 사진은 그림 1에서와 같으며, 같은 극끼리 맞닿은 두 개의 영구자석에서 생성되는 자장과 권선된 코일에 흐르는 전류의 쇄교를 힘의 근원으로 하고 각기 사용된 자석의 세기와 권선의 비가 동일하기 때문에 일정한 구동 전류에서 발생하는 구동력과 트랜스듀서의 전기적 특성은 동일하다. 제작된 DFMT의 직경과 길이는 각각 2.00 mm였고, TCBT는 직경 1.75 mm 및 길이 2.30 mm였다. 또, DFMT와 TCBT의 질량과 전기저항은 각각 25 mg과 360 ohm의 동일한 값을 가지도록 제작되었다.

본 실험은 TB1, TB2 및 TB3로 명명된 3 개의 인체 측두골이 사용되었으며, TB1과 TB2는 65 세 백인 남성(Caucasian male)의 좌우측 측두골이며 TB3는 59 세 아시아 남성(Asian male)의 좌측 측두골이었다. 실험체별 편차를 최소화 하기 위하여 각 측두골의 외이도 연조직(soft tissue)을 제거하고 직경 10 mm, 길이 30 mm의 인공 외

184

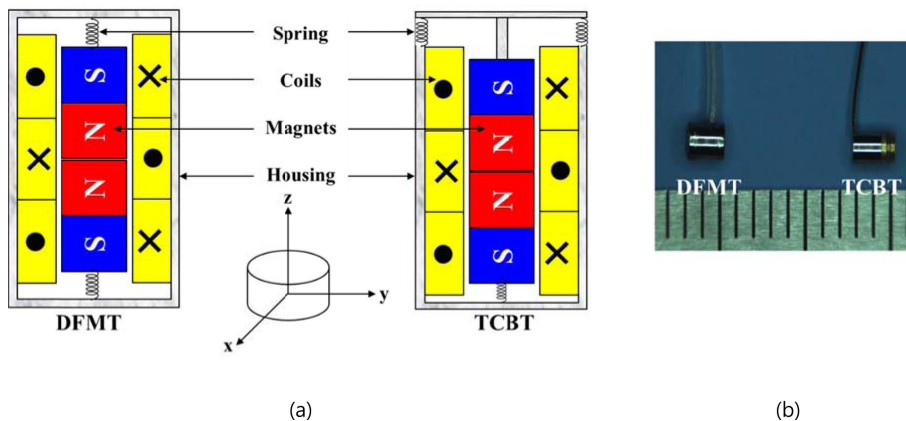


그림 1. 정원창 구동 실험을 위해 제작된 진동 트랜스듀서의 (a) 구조 및 (b) 사진.

Fig. 1. (a) Structure and (b) picture of fabricated vibrational transducer for round window stimulation experiments.

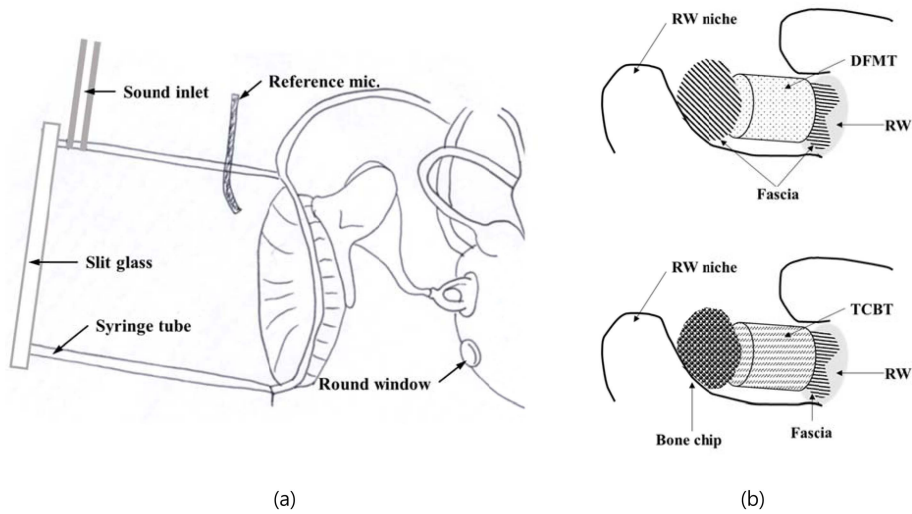


그림 2. 실험 개념도; (a) 인체 측두골 및 (b) 진동 트랜스듀서의 이식.
 Fig. 2. Experimental Conceptual Diagram; (a) human temporal bone and (b) implantation of vibrational transducers.

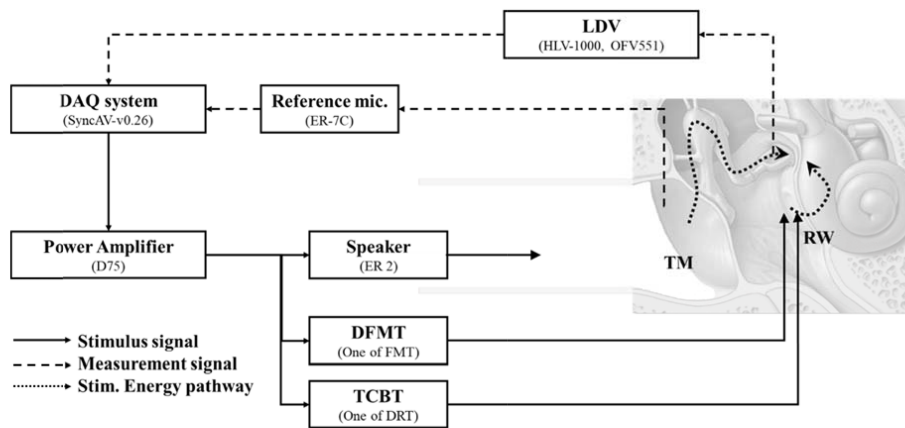


그림 3. 사체 측두골 실험을 위한 측정 셋업.
 Fig. 3. Measurement setup of the cadaveric experiments.

이도를 부착하였다. 인공 외이도의 한 쪽 끝은 음향 신호 인가를 위한 2 mm 직경의 튜브가 설치 되었고, 고막을 향하는 반대 쪽 끝은 인가된 음압을 교정하기 위한 레퍼런스 마이크로폰의 프로브를 설치하였다. 진동 트랜스듀서 삽입을 위한 정원창 소와의 가공은 등자근(stapedius muscle)의 손상으로 인한 이소골(ossicle chain)의 전달특성이 변화하지 않도록 세심한 주의를 기울였다. 등자근 족판의 중앙에 직경 1 mm의 반사체를 부착하고 LDV(laser Doppler vibrometer)를 이용해 진동 트랜스듀서의 구동에 의한 진동 특성을 측정하였으며 전체 실험은 인공중이 출력 특성 평가 지침(ASTM F2504)에 따라 수행되었다[16].

DFMT와 TCBT를 정원창의 소와 내에 이식함에 있어서는 측두골에서 채취한 근막(fascia)를 정원창 표면에 얇게 깔아 정원창의 손상을 최소화하였다. FMT 방식의 DFMT는 이식된 진동 트랜스듀서가 소와에서 이탈되지 않도록 소

와의 돌출된 뼈와 트랜스듀서 사이에 근막을 끼워 넣어 고정하였으며, DRT 방식의 TCBT는 근막 대신에 뼈조각을 넣어 각 진동 트랜스듀서가 효율적으로 구동력을 전달할 수 있도록 하였다. 상기에 실험을 위해 구성된 측두골과 각 진동 트랜스듀서의 이식 개념도는 그림 2에서와 같다.

2. 실험 구성

본 실험에서 자극의 발생과 이에 대한 응답신호의 포집은 구축된 DAQ 시스템(SyncAV-v0.26, Stanford University, USA)을 이용해 수행 되었으며 실험의 상세 구성을 그림 3에 나타내었다[12]. 그림 3에서의 실선(solid line)은 음향 및 진동 자극의 전달경로, 점선(dot line)은 전달된 자극 에너지의 전파경로 그리고 부분실선(dash line)은 포집되는 응답신호의 경로를 나타낸다. DAQ 시스템은 사체의 정상 응답 특성을 측정하기 위한 자극장치인 스피커(ER2, Etymotic

Inc., USA)와 DFMT 및 TCBT를 구동 하기 위한 신호를 생성한다. 생성된 자극 신호는 파워 앰프(D75, Crown HARMAN Inc, USA)를 통해 각 구동장치로 인가되며 스피커를 통해 외이도로 인가된 음향 신호는 94 dB의 음압을 일정하게 생성할 수 있도록 인공 외이도에 설치된 레퍼런스 마이크로폰(ER-7C, Etymotic Inc., USA)로부터 측정된 음압에 의해 DAQ 시스템에서 출력이 보정된다. 스피커에 의해 고막에 인가된 음향 신호 혹은 진동 트랜스듀서에 의해 정원창에 인가된 신호는 등자뼈 족판의 반사체로 전달되고 LDV 시스템(OFV-551 & OFV-5000, Polytec GmbH, Germany)에 의해 측정되어 진동에 해당하는 전기신호를 생성하여 DAQ 시스템으로 전달한다. DAQ에 의해 생성되는 자극 신호는 100~10,000 Hz의 범위에서 67 개의 등로그 간격으로 구성되며, LVD의 출력은 주파수 별로 10회의 자극에 대하여 반복 측정되어 평균을 취한 뒤 4096 포인트의 고속 푸리에 연산을 통해 첨두치를 기록하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 진동출력을 갖는 이식형 인공중이의 정원창 구동방식에 따른 주파수 특성을 살펴보고자 같은 구동력을 갖은 DRT 및 FMT 방식의 트랜스듀서(TCBT 및 DFMT)를 제작하고 이에 같은 크기의 전력을 인가하여 출력 특성을 측정하였다. 실험에 사용된 인체 측두골과 DFMT 및 TCBT에 대하여 자체 특성 측정 실험을 수행하였으며, 그 결과는 그림 4에서와 같다. 먼저, 인공 외이도를 통해 고막으로 음향 자극을 인가하며 등자뼈 족판의 진동 속도를 측정하였다. 이때, 고막앞에 미리 위치시킨 레퍼런스 마이크로폰을 통해 인가된 음압을 측정 피드백하여 1 Pa의 일정한 음압을 유지하도록 하였다. 3 개의 측두골에 대한 최대, 최소 및 평균을 도출하였으며 기존의 연구 결과와 유사한 개형을 보여 주었다[16]. 제작된 DFMT와 TCBT를 0.78 V_p의 구동전압을 인가하여 무부하 상태에서 자체 진동 특성을 측정하였다. DFMT는 긴 막대 위에서 충분히 늘어뜨려 무구속 상태에서 측정되었으며, TCBT는 한 쪽 끝을 강체에 고정시켜 각 진동 트랜스듀서가 정원창 소와에 이식된 후와 유사한 상태에서 부하만 제거된 상태에서 측정되었다. 전체 주파수 범위에서 TCBT가 6 dB 가량 높은 진동 속도를 보였고 트랜스듀서의 공진 주파수는 각각 1.8, 2.0 kHz에 형성 되었다.

제작된 DFMT와 TCBT를 정원창에 이식 후 2 mW의 전력을 인가하고 출력 특성을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에는 고막에 인가된 1 Pa에 대한 등자뼈 진동 특성을 함께 도출하여 트랜스듀서의 출력에 해당하는 증가적인 음압 수준을 가늠할 수 있도록 하였다. DFMT는 1.5 kHz에

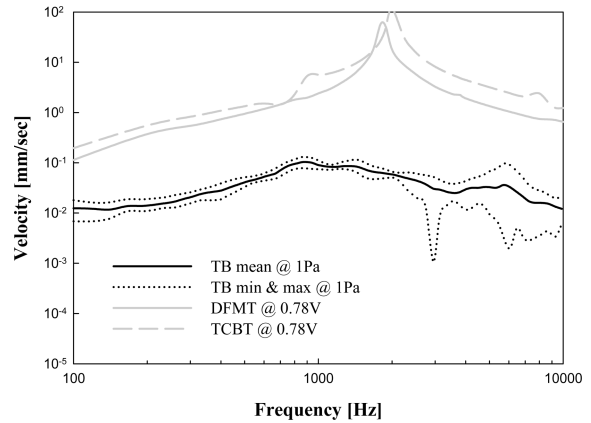


그림 4. 고막 앞 1 Pa의 음압에 대한 등자뼈 족판의 진동 특성 평균 (black solid), 최대 및 최소(black dot) 그리고 0.78 V의 구동 전압에 대한 DFMT(gray solid)와 TCBT(gray dash)의 무부하 진동 특성.

Fig. 4. Vibration characteristics of stapes footplate with 1 Pa sound in front of TM(mean: black solid, min&max: black dot), DFMT(gray solid) and TCBT(gray dash) free load vibration with 0.78 driving voltage.

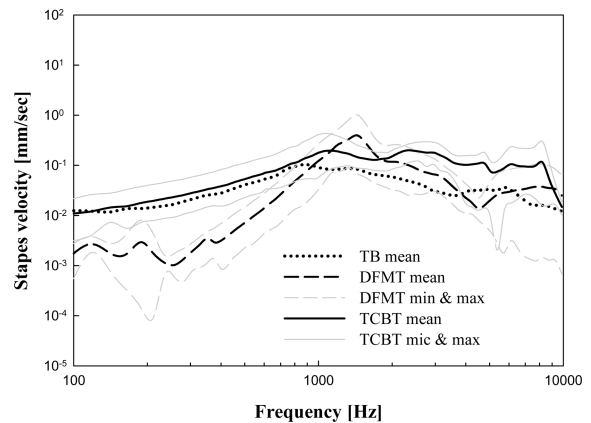


그림 5. DFMT와 TCBT의 정원창 자극에 대한 출력 비교; 사체의 자체 특성(black dot), DFMT의 평균(black dash), DFMT의 출력 최대/최소(gray dash), TCBT의 출력 평균(black solid) 및 TCBT의 출력 최대/최소(gray solid).

Fig. 5. Comparison of output of DFMT and TCBT with round window stimulation; normal stapes vibration(black dot), DFMT output mean(black dash), DFMT output min&max(gray dash), TCBT output mean(black solid) and TCBT output min&max(gray solid).

서 공진을 형성하며 공진에서 주파수가 낮아질수록 약 -60 dB/decade의 감쇄를 보였고 공진점 이후에서는 사체의 자체 특성인 1 Pa의 음압에 대한 출력 보다 다소 높은 값을 보였다. TCBT는 전반적으로 사체의 자체 특성보다 높은 진동속도를 보였고 공진점인 1 kHz 이전에는 1 Pa, 이후는 2 Pa 이상의 증가적인 음압 출력을 보였다. 두 트랜스듀서의 출력 비교에 있어서는 공진점 부근에서 DFMT의 출력

이 높은 주파수 범위가 존재하나 전반적으로 TCBT의 출력이 우월하였고, 특히 저주파 영역에서 DFMT가 0.1 Pa 이하까지 출력이 떨어지는 가파른 감쇄를 보인 것과는 반대로 TCBT는 1 Pa 이상의 음압을 유지함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 정원창 구동형 인공중이의 출력 전달 방식에 따른 효율을 사체 실험을 통해 고찰하였다. 실험을 위해 같은 구동력과 전기적 특성을 갖도록 DRT와 FMT 방식의 진동 트랜스듀서 TCBT 및 DFMT를 제작하고 가청 주파수 범위 내에서 음향 에너지 전달의 주파수 특성을 측정하였다. 3 개의 인체 측두골을 이용한 실험에서 DRT 방식의 진동 트랜스듀서가 전반적으로 에너지 전달 효율이 우월하였고, 특히 저주파 대역에서 효율의 차이가 두드러졌다. 이식 술기에 있어서는 트랜스듀서의 구동력 전달 방식보다는 외형 크기에 의존적이며 본 실험에서 두 트랜스듀서의 이식 난이도의 차이점은 발견하지 못했다. 본 연구의 결과는 기존 인공중이의 저주파 출력 저하를 극복하고 정원창 구동을 통해 적용증을 넓히기 위해서는 DRT 방식의 진동 트랜스듀서가 보다 효율적이며 이에 대한 추가 연구가 필요함을 시사하고 있다.

참고문헌

- [1] J.H. Cho, I.Y. Park, H.G. Lim, Y.H. Yoon, K.W. Seong, E.S. Jung, J.H. Han, M.K. Kim, and S.H. Lee, "Research of fully implantable middle ear hearing device in Korea : current status," *Journal of Rehabilitation Research*, vol. 10, no. 3, pp. 90-106, 2006.
- [2] A.G. Bittencourt, P.E. Bruke, I.S. Jardim, R. Brito, R.K. Tsuji, A.C.O. Fonseca, and R.F. Bento, "Implantable and Semi-Implantable Hearing Aids: A Review of History, Indications, and Surgery," *International Archives of Otorhinolaryngology*, vol. 18, pp. 303-310, 2004.
- [3] D.S. Haynes, J.A. Young, G.B. Wanna, and M.E. Glasscock III, "Middle Ear Implantable Hearing Devices: An Overview," *Trends in Amplification*, vol. 13, no. 3, pp. 206-214, 2009.
- [4] D. Arthur, "The Vibrant® Soundbridge™," *Trends in Amplification*, vol. 6, no. 2, pp. 67-72, 2002.
- [5] K. Kroll, I.L. Grant, and E. Javel, "The Envoy® Totally Implantable Hearing System, St. Crox Medical," *Trends in Amplification*, vol. 6, no. 2, pp. 73-80, 2002.
- [6] C. Stieger, H. Bernhard, D. Waeckerlin, M. Kompis, J. Burger, and R. Haeusler, "Human temporal bones versus mechanical model to evaluate three middle ear transducers," *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol. 44, no. 3, pp. 407-416, 2007.
- [7] V. Colletti, S.D. Soli, M. Carner, and L. Colletti, "Treatment of mixed hearing loss via implantation of a vibratory transducer on the round window," *International Journal of Audiology*, vol. 45, no. 10, pp. 600-608, 2006.
- [8] H.H. Nakajima, W. Dong, E.S. Olson, J.J. Rosowski, M.E. Ravicz, and S.N. Merchant, "Evaluation of Round Window Stimulation Using the Floating Mass Transducer by Intracochlear Sound Pressure Measurements in Human Temporal Bones," *Otology & Neurotology*, vol. 31, no. 3, pp. 506-511, 2010.
- [9] R. Salcher, B. Schwab, and T. Lenarz, H. Maier, "Round window stimulation with the floating mass transducer at constant pretension," *Hearing Research*, vol. 314, pp. 1-9, 2014.
- [10] T. Stephane, K. Kanthaiyah, D. Arnaud, N.H. Julian, A.J. Herman, and J.T. Daniel, "Round Window Membrane Implantation with an Active Middle Ear Implant: A Study of the Effects on the Performance of Round Window Exposure and Transducer Tip Diameter in Human Cadaveric Temporal Bones," *Audiology and Neurotology*, vol. 15, no. 5, pp. 291-302, 2010.
- [11] S. Tringali, N. Pergola, P. Berger, and C. Dubreuil, "Fully implantable hearing device with transducer on the round window as a treatment of mixed hearing loss," *Auris Nasus Larynx*, vol. 36, no. 3, pp. 353-358, 2009.
- [12] B.S. Song, J.H. Park, Y.H. Yoon, M.N. Kim, S.K. Park, S.H. Lee, and J.H. Cho, "Differential Floating Mass Type Vibration Transducer for MEI System," *Proceedings of the 22nd Annual EMBS International Conference*, pp. 2575-2578, 2000.
- [13] K.W. Seong, M.W. Kim, J.H. Lee, M.N. Kim, and J.H. Cho, "Design of A New Vibration Transducer for Implantable Middle Ear Hearing Devices," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, pp. 608-610, 2010.
- [14] B.S. Song, *Design of environmental magnetic field interference free differential electromagnetic transducer for implantable middle ear system*, Doctor's Thesis of Kyungpook National University, 2002.
- [15] D.H. Shin, K.W. Shin, S. Puria, K.Y. Lee, and J.H. Cho, "A tri-coil bellows-type round window transducer with improved frequency characteristics for middle-ear implants," *Hearing Research*, vol. 341, pp. 144-154, 2016.
- [16] ASTM International, 2005. Standard Practice for Describing System Output of Implantable Middle Ear Hearing Devices, Designation, pp. F 2504-2505.