달팽이관을 모사한 인공청각기구 기술

DOI: 10.3938/PhiT.19.042

김 완 두

Artificial Auditory System Mimicking Human Cochlea

Wan Doo KIM

The human ear consists of the outer ear, the middle ear, and the inner ear. The middle ear transmit the sound waves to the membranous oval window. The sound waves travel to the brain along the auditory nerve in the cochlea of the inner ear. The cochlea has two core mechano-sensory components: the basilar membrane and the hair cells having the stereocilia. The basilar membrane separates the incoming sound waves by their frequencies. The hair cells are on the basilar membrane and act as the sensory receptors generating bioelectric signals.

The artificial cochlear implementation is the most promising solution for the hearing loss caused by the cochlear damage. The conventional artificial cochlear implant has several major disadvantages. Bio-inspired artificial cochlea will be designed based on the artificial basilar membrane and the stereocilia. It has the potential to be used for the totally implantable artificial cochlea that requires minimized or no external power.

서 론

생체모방공학(biomimetics)이라는 용어는 바이오닉스(bionics), 바이오그노시스(biognosis), 바이오미미크라이(biomimicry), 바이오 창조공학(bionical creativity engineering) 등의 용어와 동일한 의미로 사용되고 있다. 그리스어로 바이오스($\beta\iota\omicron\varsigma$)는 생명이라는 뜻이며, 바이오닉스는 biomechanics의 축약형의

의미와 biology와 electronics의 합성어의 의미로 사용된다. 생체모방공학(biomimetics)이라는 합성어는 1950년대 생체 물리학 분야에 혁혁한 과학적 업적을 달성한 미국의 발명가이자 공학자인 Otto Schmitt에 의해 최초로 사용되었다. 자연모사기술(nature inspired technology)이란 자연의 생태계와 자연 현상 그리고 살아있는 생명체 등의 기본 구조, 원리 및 메커니즘을 모사(Mimetics)하여 공학적으로 응용하는 기술을 말한다. 자연모사기술이라는 용어는 흔히 생체모방공학(Biomimetics, Biomimicry)이라는 용어로 일반적으로 알려진 개념보다 한 단계 진보하여, 무생물까지도 포함한 자연으로부터 영감을 얻어 인간의 삶을 보다 편리하고 풍요롭게 만들어 주기 위한 융합기술이라고 할 수 있다.^[1]

미국의 생태학자인 재닌베니어스(Janine Benyus)는 생태학적 관점으로부터 자연을 설계모델(model), 판단기준(standards of measure), 조인자(mentor)로 분류하였으며,^[2] 유럽의 ESA(European Space Agency)의 Mark Ayre는 2004년도에 발표한 『Biomimicry-A Review』에서 큰 틀에서의 공학적인 이슈에 따라 5가지로 생체모방공학을 분류하였다.^[3]

인체에서 외부 자극을 최초로 받아들이는 것을 감각수용체(receptor)라 한다. 수용체는 소리, 빛, 압력, 움직임 등의 에너지양을 신경세포가 감지할 수 있는 생체전기신호로 변환시켜 주는 기능을 수행한다. 흔히 인간의 감각이라면 시각, 청각, 촉각, 후각, 미각 등의 오감을 말하지만, 이는 외부로부터 우리 몸에 입력되는 감각만을 말한다. 이 외에도 평형감각과 내장감각이 존재한다. 평형감각은 우리의 신체가 공간 어디에 위치해 있고 어떻게 움직이는지를 알려주는 고유감각(proprioception)과 우리가 눈을 감고서도 자신의 팔과 다리가 어디에 위치해 있는지와 또 머리의 움직임을 정확히 지각하는 전정감각(vestibular sense)으로 구성된다. 이러한 감각 능력 때문에 흔들리는 차 속에서도 책을 읽을 수 있는 것이

저자약력

김완두 박사는 서울대학교(기계설계학과)에서 박사학위를 취득하였으며, 1982년부터 한국기계연구원에 근무하고 있다. 미국 퍼듀대학교 방문연구원, 미래기술연구부장 및 선임연구본부장, 대한기계학회 바이오공학부문회장을 역임하였으며, 파이오니아융합연구단장, 국가과학기술위원회 운영위원으로 활동하고 있다. (wdkim@kimm.re.kr)

REFERENCES

- [1] KIM, Wan Doo, Journal of the KSME **26**(4), 34 (2006).
- [2] Janine Beynius, Biomimicry: Innovation Inspired by Nature (1997).
- [3] Mark Ayre, Biomimicry - A Review (2004).

Table 1. Classification of Biomimetics.^[3]

Categorization		Example
Structures & Materials	Structures	. Novel Structures . Dynamic/Adaptive Structures . Deployment, Folding, Packing
	Materials	. Composite . Bio-Incorporated Composite . Smart Materials
Mechanisms & Processes	Mechanisms	. Muscles and Actuators . Locomotion
	Processes	. Novel Process . Thermal Management . Fabrication . Power Generation and Storage
Behavior & Control	Behavior	. Classical Artificial Intelligence . Behavior Artificial Intelligence . Learning Mechanism . Swarm Intelligence (DAI)
	Control	. Reflexive Control . Rhythmic Control
Sensors & Communication	Sensors	. Vision . Hearing . Touch . Taste and Smell
	Communication	. Passive Group Communication
Generational Biomimicry	Generational Biomimicry	. Ecological Mechanism . Genetic Mechanism . Cultural Mechanism . Geneering/Human Alteration

다. 내장감각이란 소화기관과 심혈관계를 관장하는 감각으로서 우리의 생명 유지를 위해 중요한 역할을 한다.^[4]

지구 상에 존재하는 모든 종류의 동물들은 자연에 존재하는 다양한 소리를 들을 수 있는 청각기관을 가지고 있다. 호랑이, 코끼리, 곰, 개 등의 포유류들은 인간의 귀와 같은 형태의 청각기관을 가지고 있으며, 물속에 사는 물고기는 물의 흐름과 소리를 감지하는 감각기관을 옆줄에 가지고 있다. 귀뚜라미 모기, 파리 등의 곤충들도 미세한 소리와 외부 침입자들의 접근을 감지하는 고감도의 감각기관을 지니고 있다.

인간의 청각기구는 귓바퀴에서 소리를 모아 외이도를 통해 고막을 진동시키는 외이, 고막의 진동을 증폭시켜 달팽이관을 울려주는 이소골(중이), 그리고 소리를 적절히 구분하여 청신경에 전달해 주는 달팽이관(와우)의 내이로 구성되어 있다. 달팽이관 내에는 기저막(basilar membrane)이라는 얇은 막이 소리의 진동수에 따라 반응하는 위치가 바뀌게 되어 고음과 저음이 구분되며, 머리카락의 수천분의 일의 굵기를 가진 부동섬모(stereocilia)의 흔들림에 따라 청신경을 자극하는 신호가 발생되게 된다. 인간의 청각 능력은 현재 개발되어 있는

Fig. 2. Structure of Human Ear.

그림 2는 사람 귀의 구조를 보여준다. 사람의 귓바퀴와 외이도(귓구멍)는 소리를 모으는 역할을 하며, 전달된 소리에너지는 고막을 통해 진동운동으로 변환된다. 고막과 달팽이관 사이에는 세 개의 뼈, 즉 망치뼈(추골), 모루뼈(침골), 등자뼈(등골)로 이루어진 중이가 있으며, 이 중이는 공기 중의 진동 에너지를 체액으로 채워진 달팽이관 속의 기저막을 진동시키기 위해 음압을 증폭시켜주는 역할을 한다. 고막의 면적은 55 mm^2 , 등자뼈가 연결된 달팽이관 난원창(oval window)의 면적은 3.2 mm^2 으로서 17배의 차이가 난다. 등자뼈의 움직임은 망치뼈 움직임의 3/4로서 힘은 1.3배 정도 커지게 된다. 따라서 난원창에 전달되는 음압은 고막에 전달되는 음압의 약 22배가 된다. 고막과 이소골계는 공기 중의 음파와 달팽이관 내의 액체 사이의 임피던스 정합을 이루어지게 하여 에너지 전달을 극대화한다.

달팽이관 (내이)

달팽이관 외곽은 딱딱한 뼈 성분으로 되어 있으며, 3개의 튜브가 2/4바퀴 꼬여져 있는 형태로서 단면은 전정계(scala vestibuli), 중양계(scala media), 고실계(scala tympany)로 구성되어 있다. 그림 3은 달팽이관의 단면을 보여준다. 전정계와 중양계는 전정막(Reissner막, Vestibular membrane)으로 구분되어 있으며, 고실계와 중양계는 2~3만 개의 기저섬유로 이루어진 기저막(basilar membrane)으로 구분되어 있다. 전정계와 고실계는 달팽이관 끝에 있는 소공(helicotrema)으로 연결되어 있다. 기저섬유는 난원창에서 소공 쪽으로 갈수록 약 $0.04 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ 로 점점 길어지지만, 굵기는 감소하여, 전체적으로 강성이 100배 이상 감소한다. 난원창 근처의 기저섬유는 고주파에 잘 공명되며, 소공 쪽에서는 길고

Fig. 3. Cross Section of Cochlea.

Fig. 4. Frequency Selectivity Model of Cochlea.

Fig. 5. Organ of Corti.

유연한 기저섬유가 있어 저주파에 잘 공명된다. 그림 4는 달팽이관 내의 주파수 분리가 발생하는 위치를 보여준다.

그림 5에 보는 바와 같이 코르티(Corti) 기관은 기저막의 표면에 놓여있으며, 기저막의 진동에 반응하여 청각신호를 발생시키는 청각 수용기인 유모세포(hair cell)로 구성되어 있다. 내측(inner)유모세포는 한 줄로 약 3500개, 직경은 약

Fig. 6. Stereocilia on the Hair Cell.

Fig. 7. Principle and Components of Artificial Cochlea.

12 μm 이며, 외측(outer)유모세포는 3~4줄로 약 12000개, 직경은 약 8 μm 정도이다. 유모세포에서 발생된 청각 신호는 나선신경절(spiral ganglion)을 통해 뇌의 중추신경계로 전달되어 비로소 소리를 인지하게 된다. 유모세포 끝에는 그림 6에서 보는 바와 같은 부동섬모(stereocilia)가 있으며, 덮개막(tectorial membrane)에 닿아있다. 기저막이 진동하면 덮개막과의 사이에 있는 부동섬모가 움직이게 되며, 200~300개의 양이온 전달채널이 열리어 신경전달물질이 분비되어 청각세포를 자극하게 된다.^[5]

인공와우의 기술 현황

청각장애의 원인은 선천성, 소음성, 노인성 및 신경성 난청 등으로 구분되며, 대부분 외이보다는 중이나 내이 또는 청각 중추에 병인이 있는 경우가 많다. 중이에 이상이 있는 경우 치료와 보청기를 이용하여 청력을 회복하고 있으며, 내이에 이상이 있는 경우 인공와우 기술을 하게 된다.

그림 7은 인공와우의 원리와 구성 부품을 보여준다. 인공와

Fig. 8. Concept of Bio-mimicking Artificial Cochlea.

우는 소리를 전기적 신호로 바꿔주는 마이크와 이 신호를 코덱화해 주는 어음처리기, 변환된 코드를 귓속에 전달해 주기 위한 송신기와 수신기, 그리고 청신경을 자극하는 전극 등으로 구성되어 있다. 이러한 인공와우 장치는 어음처리, 신호의 송수신 및 청신경 자극을 위한 큰 전력이 소모되는 단점이 있다. 또한, 어음처리기와 배터리의 휴대, 그리고 측두골에 매식해야 하는 송수신기로 인한 장애 노출 등의 이유로 최근 완전이식형 인공와우의 개발이 적극 관심이 고조되고 있다.

기존 형식의 인공와우는 미국과 호주 제품이 전 세계 시장의 대부분을 점유하고 있으며, 최근에 국내에서도 국산화 개발에 성공하여 선진국과 동등한 기술수준에 도달하였다. 인공와우의 최신 기술개발 방향은 마이크 및 어음처리기의 체내 이식과 충전식 배터리 사용을 통한 완전이식형에 초점이 맞추어져 있으나 동 기술은 기존기술의 일부 개량기술에 불과하며, 생체모사를 통한 신개념의 인공와우기술에 비해 한 단계 뒤쳐진 기술로 알려져 있다.

생체모사 인공와우 개발

달팽이관 속의 얇은 기저막과 부동섬모를 모사한 신개념의 『생체모사 인공와우』는 장치가 간단하며 귀속에 완전이식이 가능한 기술로서 교육과학기술부의 미래유망융합기술 파이오니아사업으로 연구개발 중에 있다.

그림 8은 달팽이관을 모사한 인공 유모세포 및 인공기저막의 기본 개념을 보여준다. 달팽이관 내의 유모세포 및 기저막의 기능을 생체모사하기 위하여 MEMS 구조의 인공 기저막을 제작하고 유모세포의 기능을 수행하는 압전 나노필라 어레이를 그 위에 성장시킨다. 음파가 발생하면 인공기저막이

REFERENCES

- [5] E. P. Widmaier, Brief Edition Human Physiology (2004).

Fig. 9. Components of Totally Implantable Artificial Cochlea.

Fig. 10. Frequency selectivity of artificial basilar membrane(kHz).

진동하고 그에 따라 그 위에 있는 압전 나노필라를 변형시킴으로서 전류가 발생되게 된다. 여기에서 구현되는 인공유모세포 및 인공기저막의 구조물을 통칭하여 무전원 인공기저막(Self-powering ABM)이라고 정의하고 이는 신개념 생체모사 인공와우의 핵심기술이 된다.

생체모사 인공기저막은 기저막의 주파수 분리 특성이 공진(Resonance) 원리에 있음을 이용하여 가청주파수 대역을 모두 포함하면서 동시에 특정 주파수 대역에서 공진하도록 설계된 공진 기저막(Resonant Basilar Membrane) 또는 튜브형 기저막 등의 개념을 도입한다. 이러한 인공기저막은 기존의 마이크로폰의 역할과 음성처리기의 역할을 동시에 수행할 뿐만 아니라 완전 무전원으로 동작하는 특징을 갖는다. 기존 인공와우와의 차별성은 차세대 와우 임플란트의 최대 문제인 마이크로폰을 없애고 소비전력이 큰 전자 음성처리에 사용되는 주파수 분리소자 대신에 기계적인 주파수 분리기인 인공기저막을 사용하는데 있다. 신경자극 전류의 파형에 대한 컨트롤을 자극기를 통하여 저전력으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

생체모사 완전이식형 인공와우의 구성은 그림 9에서 보는

Fig. 11. FEA Simulation of ZnO Nano-wire.

Fig. 12. PVDF Artificial Basilar Membrane.

바와 같이 무전원 인공기저막, 신호 증폭기 및 신호처리장치, 외부에서 무선으로 파워 충전을 위한 유도코일 및 충전 배터리로 구성되어 있다. 특정한 주파수를 갖는 음파는 이소골과 연결된 인공기저막 음파입구부를 통해서 전파되고 유체챔버로 음파가 전파된다. 유체와 접한 인공기저막의 특정 부분이 공진주파수에 의해 공진되며 그 위에 배치된 나노필라 어레이가 전극과 접촉하여 변형되어 전기신호를 발생한다. 이 신호는 증폭되고 신호처리되어 달팽이관 삽입형 전극의 특정 채널을 통해서 흐르고 최종적으로 청신경을 자극하게 된다.

그림 10은 유한요소해석을 통한 인공기저막의 공진주파수 분리 특성을 보여준다. 그림 11은 부동섬모의 기능을 모사한 압전특성을 지닌 ZnO 나노와이어의 전극 접촉에 따른 전압 발생을 시뮬레이션한 결과이다.

그림 12는 압전 특성을 지닌 PVDF 박막으로 만든 MEMS 크기의 인공기저막의 모습이며, 그림 13은 저온성장 솔루션 방법으로 압전 특성을 지닌 배열된 ZnO 나노와이어의 모습을 보여준다. 그림 14는 인공기저막 특성시험을 위한 장치를 보여준다.

Fig. 13. Line Patterned ZnO Nanowire.

Fig. 14. Test Equipment of Artificial Basilar Membrane.

맺음말

장애인의 권익 향상을 위해 평생을 바친 헬렌켈러(1880~1968)는 청각과 시각 장애가 다 있었지만 볼 수 없다는 사실은 자신을 사물과 격리시키지만 들을 수 없는 것은 사람과의 관계를 떼어 놓는다는 이유로 들을 수 없다는 것이 볼 수 없다는 사실보다 더 좋지 않다고 말했었다. 국내의 출산 시 청각 고도장애 비율은 1000명당 1명으로 매년 4~500명의 신생아가 인공와우의 기술을 받아야 할 상황이며, 난청 환자는

Fig. 15. New Concept of Totally Implantable Artificial Cochlea.

인구 천명당 4.4명으로 알려져 있다.

생체모사 인공와우는 인공기저막과 압전 특성을 가지는 나노섬모를 사용하여 전원 소모를 극소화하며 체내에 완전 이식이 가능하도록 한 신개념의 인공와우로서 청각 장애인이나 난청 환자에게 삶의 질을 높여 줄 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그림 15는 생체모사 완전이식형 인공와우의 시술 모습을 모형화한 그림이다.

달팽이관 속의 기저막과 부동섬모를 모사하여 인공와우를 개발하려는 연구는 세계 최초의 시도로서 국내외에 특허가 등록되어 있으며 [등록번호 0941773, 자가전원 기능을 갖는 인공와우의 주파수 분석기], 2015년 경에 기술개발이 완료되어 이후 임상실험을 거쳐 2020년 경에 상용화가 가능할 것으로 기대되고 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Pioneer Research Center Program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2010-0018347/0002248).