



인간의 청각 메커니즘을 모사한 인공달팽이관 기술

김 완 두
(한국기계연구원)

1. 소리 감지 메커니즘

자연에 존재하는 모든 종류의 동물들은 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.

이들 감각기관의 공통점은 외부의 자극에 민감하게 반응하는 아주 작은 수백 나노 굵기의 섬모의 움직임으로서 소리를 감지하는데 있다. 동물들의 청각기관은 초소형, 고효율, 고감도의 최적화된 구조를 지닌 감각기관으로서, 이를 모사하여 구현할 경우 새로운 개념의 인공청각기구 및 각종 센서 등에 활용할 수 있다.

세상에 존재하는 파동의 종류에는 초저주파, 저주파, 고주파, 초고주파 등이 있다. 인간이 들을 수 있는 가청주파수는 저주파 대역인 20 Hz에서 20 kHz 이지만, 말이나 코끼리 등은 수 Hz의 초저주파수 대역을 들을 수 있어 쓰나미나 지진과 같은 저주파의 진동을 감지할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 박쥐나 돌고래 등은 고주파 대역인 초음파를 감지할 수 있는 능력을 가지고 있다.

인간의 청각 능력도 현재 개발되어 있는 어떠한 음향센서나 진동 센서들보다도 좋은 성능을 보이고 있다. 인간의 청각기구는 초소형이며 넓은 영역의 신호를 고감도로 감지할 수 있으며, 고효율의 최적화된 구조를 가지고 있다.

인간의 청각기구는 귓바퀴에서 소리를 모아 외이도를 통해 고막을 진동시키는 외이, 고막의 진동을 증폭시켜 달팽이관을 울려주는 중이, 그리고 소리를 적절히 구분하여 청신경에 전달해 주는 달팽이관(와우)의 내이로 구성되어 있다. 달팽이관 내에는 기저막이라는 얇은 막이 소리의 진동수에 따라 반응하는 위치가 바뀌게 되어 고음과 저음을 구분할 수 있으며, 머리카락의 수천분의 일의 굵기를 가진 부동섬모(stereocilia) 다발의 흔들림에 따라 청신경을 자극하는 신호가 발생하게 된다.

사람의 귓바퀴와 외이도(귓바멍)은 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 진동에너지를 체액으로 채워진 달팽이관 속의 기저막을 진동시키기 위해 음압을 증폭시켜주는 역할을 한다. 고막의 면적은 55 mm², 등자뼈가 연결된 달팽이관 난원창(oval window)의 면적은 3.2 mm²으로서, 17배의 차이가

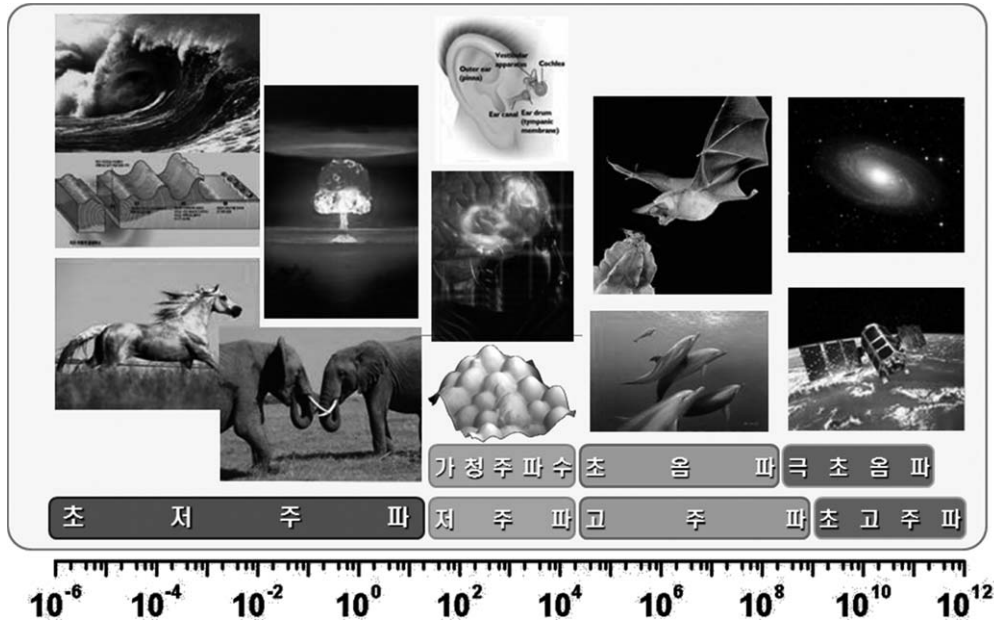


그림 1 주파수 대역의 특징

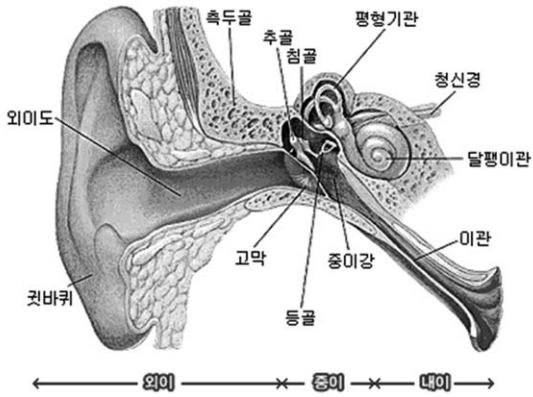


그림 2 사람 귀의 구조

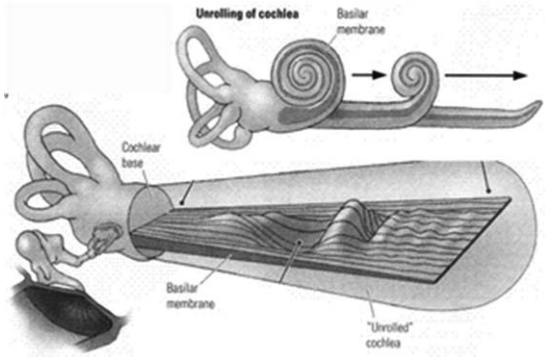


그림 3 달팽이관의 작동 원리

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 외곽은 딱딱한 뼈 성분으로 되어 있으며, 3개의 튜브가 2/3바퀴 꼬여져 있는 형태로써 단면은 전정계(*scala vestibuli*), 중앙계(*scala media*), 고실계(*scala tympany*)로 구성되어 있다. 전정계와

중앙계는 전정막(*reissner*막, *vestibular membrane*)으로 구분되어 있으며, 고실계와 중앙계는 2만에서 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 mm에서 0.5 mm로 점점 길어지지만 굵기는 감소하여, 전체적으로 강성이 100배 이상 감소한다. 난원창 근처의 기저섬유는 고주파에 잘 공명되며, 소공 쪽에서는 길고 유연한 기저섬유가 있어 저주파에 잘 공명된다.

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 3,500개, 직경은 약 $12\ \mu\text{m}$ 이며, 외측(outer)유모세포는 3줄에서 4줄로 약 12,000개, 직경은 약 $8\ \mu\text{m}$ 정도이다. 유모세포에서 발생된 청각 신호는 나선신경절(spiral ganglion)을 통해 뇌의 중추신경계로 전달되어 비로소 소리를 인지하게 된다. 유모세포 끝에는 부동섬모(stereocilia)가 있으며, 덮개막(tectorial membrane)에 닿아있다. 기저막이 진동하면 덮개막과의 사이에 있는 부동섬모가 움직이게 되며, 200개에서 300개의 양이온 전달 채널이 열리어 신경전달물질이 분비되어 청각세포를 자극하게 된다.

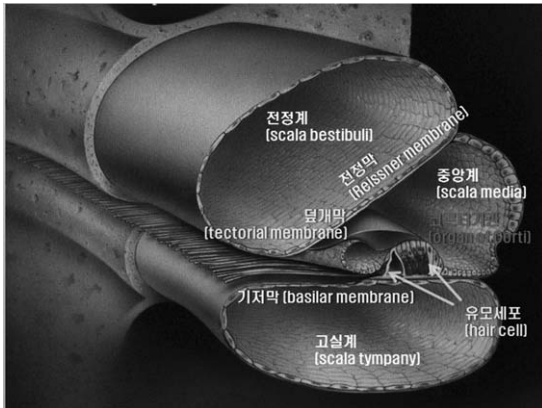


그림 4 달팽이관의 단면 구조

2. 청각 장애 및 인공달팽이관 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 보청기와 중이 임플란트를 이용하여 청력을 회복하고 있으며, 내이에 이상이 있는 경우 인공달팽이관 시술을 하게 된다.

인공달팽이관은 소리를 전기적 신호로 바뀌우는 마이크와 이 신호를 코드화해 주는 어음처리기, 변환된 코드를 귓속에 전달해 주기 위한 송신기와 수신기, 그리고 청신경을 자극하는 전극 등으로 구성되어 있다. 이러한 인공달팽이관 장치는 어음처리, 신호의 송수신 및 청신경 자극을 위

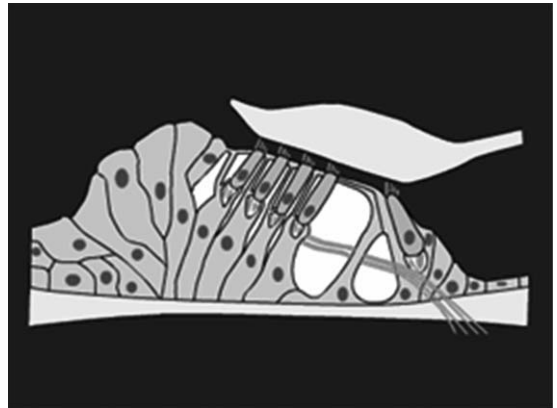


그림 5 기저막과 부동섬모

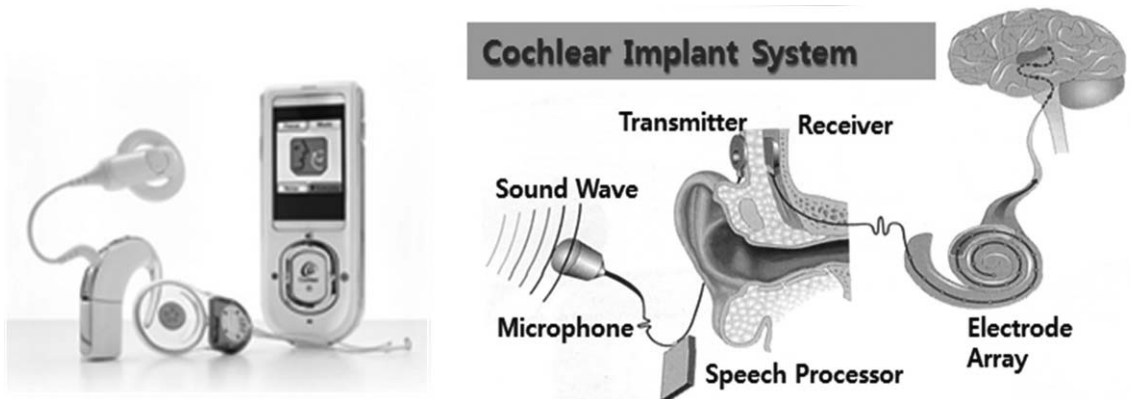


그림 6 기존의 인공달팽이관 시스템

한 큰 전력이 소모되는 단점이 있다. 또한, 어음 처리기와 배터리의 휴대, 그리고 측두골에 매식해야 하는 송수신기로 인한 장애 노출 등의 이유로 최근 완전이식형 인공달팽이관의 개발에 관심이 높아지고 있다.

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

3. 생체모사 인공기저막

그림 7은 달팽이관을 모사한 인공유모세포 및 인공기저막의 기본 개념을 보여준다. 달팽이관 내의 유모세포 및 기저막의 기능을 생체모사하기 위하여 MEMS 구조의 인공기저막을 제작하고 유모세포의 기능을 수행하는 압전 나노필라

어레이를 그 위에 성장시킨다. 음파가 발생하면 인공기저막이 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 인공달팽이관의 핵심기술이 된다.

생체모사 인공기저막은 기저막의 주파수 분리 특성이 공진(resonance) 원리에 있음을 이용하여 가청주파수 대역을 모두 포함하면서 동시에 특정 주파수 대역에서 공진하도록 설계된 공진기저막(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 인공달팽이관의 차별성은 차세대 와우 임플란트의 최대 문제인 마이크로폰을 없애고 소비전력이 큰 전자 어음처리에 사용되는 주파수 분리소자 대신에 기계적인 주파수 분리기인 인공기저막을 사용하는데 있다. 신경자극 전류의 파형에 대한 컨트롤을 자극기를 통하여 저전력으로 수행할 수

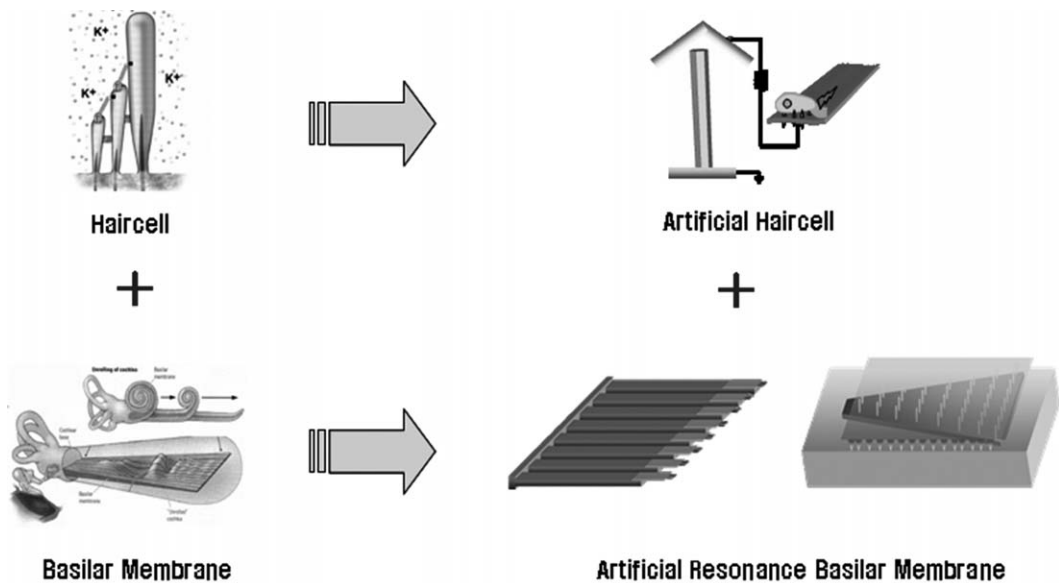


그림 7 유모세포와 기저막을 모사한 소자 개념도

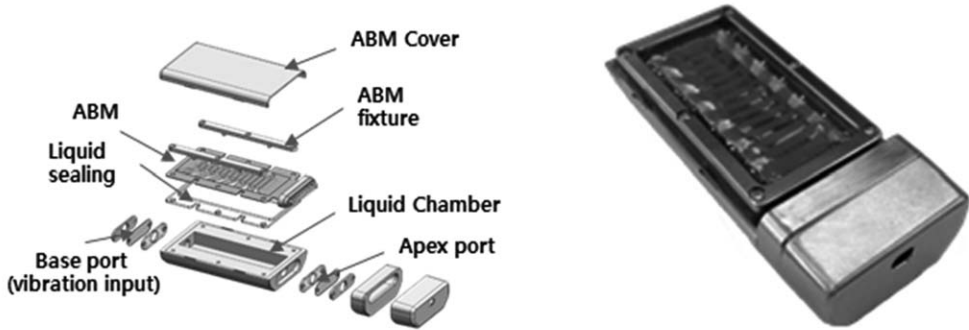


그림 8 완성된 생체모사 인공기저막 조립체

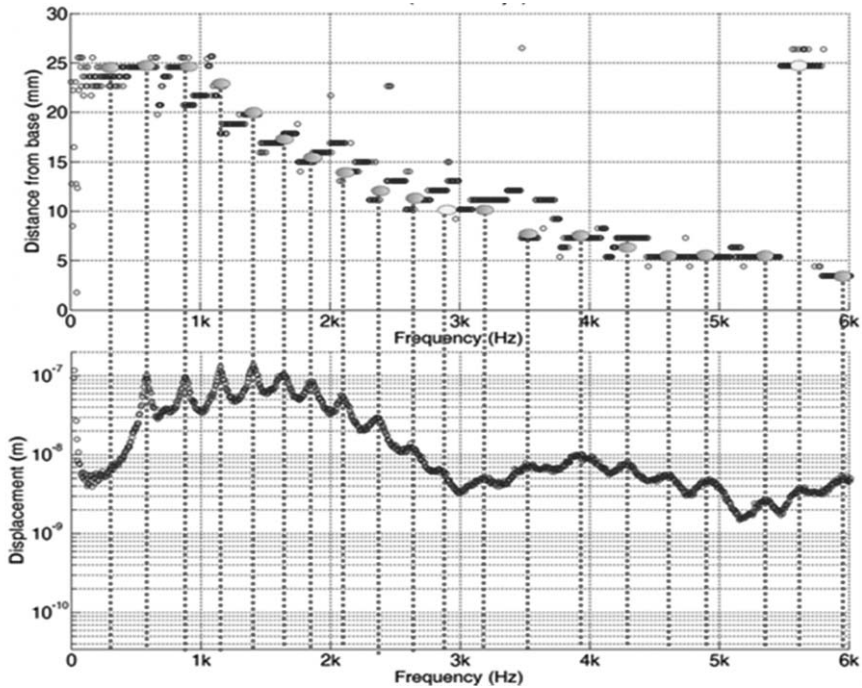


그림 9 인공기저막의 주파수 분리 특성

있다. 그림 8은 생체모사 인공기저막의 조립체를 보여주며, 그림 9는 인공기저막의 주파수 분리 특성을 보여준다.

3. 완전이식형 인공달팽이관

생체모사 완전이식형 인공달팽이관의 구성은 무전원 인공기저막, 신호 증폭기 및 신호처리장치, 외부에서 무선으로 파워 충전을 위한 유도코일 및 충전 배터리로 구성되어 있다. 그림 10은

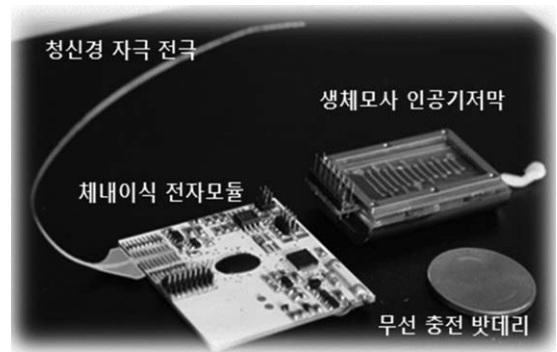


그림 10 완전이식형 인공달팽이관의 구성 부품

표 1 인공달팽이관의 성능 및 특징

	기존 인공달팽이관	생체모사 인공기저막을 이용한 완전이식형 인공달팽이관
마이크로폰	· 파워소모: 20 mW	- 인공달팽이관 소자 · 기계적 주파수 분리 채널: 13 · 전기적주파수분리 채널: 6 · 주파수 분리대역: 0.3 kHz ~ 5.0 kHz · 파워소모: 0 mW
음성처리기	· 파워 소모: 190 mW · 주파수분리 대역: 0.3 kHz ~ 8 kHz · 음성처리기법: C.I.S	- 신호처리 전자모듈 · 파워소모: 0.2 mW · 음성처리기법: C.I.S.
데이터 통신기능/자극칩	· 파워소모: 25 mW · 자극방식: Mono/Bi-polar	· 파워소모: 26 mW · 자극방식: Mono/Bi-polar biphasic current stimulation · 자극채널: 16
자극기 패키징	· Ti/Ceramic	· Liquid Crystal Polymer
이식 형식	· 부분 체내 이식형	· 완전 체내 이식형
전극	· 달팽이관 삽입형 전극	· 달팽이관 삽입형 전극
전원 공급/ 파워 전송 장치	· 충전식 외부 전지 (사용시간: 최대 16 h) · 전체소비전력: 235 mW	· 체내이식 배터리 · 무선전력충전 방식 · 전체소비전력: 26.2 mW (기존 대비 1/9 수준)

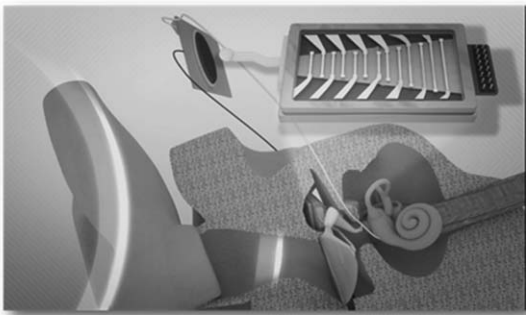


그림 10 완전이식형 인공달팽이관의 구성 부품

완전이식형 인공달팽이관의 구성 부품을 보여 주며, 표 1은 기존 인공달팽이관과 완전이식형 인공달팽이관의 특징을 보여준다.

4. 맺음말

달팽이관 속의 기저막과 부동섬모의 작동 메커니즘을 모사한 생체모사 인공기저막, 체내 이식

전자 모듈, 무선 충전 배터리 및 청신경 자극 전극 등으로 구성된 신 개념의 인공달팽이관 기술은 체내에 완전이식이 가능한 기술로서 주목받고 있으며, 국내의 연구진에 의해 국내외의 주요 국가에 원천특허가 등록되어 있다. 현재 동물 실험을 통한 청신경을 자극할 수 있는 전기신호 발생 실험까지 완료되어 있으며, 향후 인공기저막의 성능 개선 및 안전성 확보, 임상 실험에 대한 가이드라인 구축 등 중장기적인 후속 연구개발을 통해 완전이식형 인공달팽이관 제품 개발로 이어질 수 있을 것으로 기대되고 있다. **KSNVE**

<감사의 글>

이 글은 미래창조과학부의 미래유망융합기술 파이오니어사업의 지원으로 수행된 연구결과를 요약 정리한 내용이며, 연구 사업에 참여하셨던 모든 분들께 감사드립니다.