

나노섬모의 자연모사 기술

이 글에서는 인간 및 동물의 청각기관 또는 평형기관과 물고기의 옆줄에 존재하는 나노스케일 부동섬모의 구조 및 원리에 대해서 살펴보고 부동섬모의 형상 및 물성을 측정하고 분석하는 기술, 이러한 측정 및 분석 데이터를 토대로 등가적으로 모사하기 위한 인공 나노섬모의 해석 기술, 또한 인공 나노섬모의 제조 공정 기술에 관하여 소개하고자 한다.

『프』던 제이미 소머즈는 스카이다이빙을 하다가 낙하산이 안 펼쳐서 중상을 입게 됩니다. 이에 미국 정부는 600만 불의 사나이 스티브 오스틴에 이

어 ‘바이오킷 우먼’을 만들어낸다. 소머즈는 사고로 인해 다친 양다리, 오른쪽 팔, 오른쪽 귀를 잃고 생체 공학수술을 받게 된다. 오른쪽 귀는 뛰어난 청각능력을 보유하고, 왼쪽 팔이 불도저를 능가하며 두 다리는 시속 60km를 능가하는 속도로 달릴 수 있었다.』

이 이야기는 '70년대 후반에 국내 TV에서 방영되었던 공상과학 드라마로서 그 당시 초등학교생이었던 필자를 포함하여 많은

어린이들에게 과학적 호기심과 상상력을 일깨워 주었던 소머즈 시리즈 ‘The Bionic Woman’의 도입부이다. 바이오킷(bionics)라는 용어는 1960년에 700명의 생물학자, 공학자, 수학자, 물리학자, 심리학자들이 오하이오 주의 Dayton 학술대회에 모여서 공식적으로 창시한 과학 분야로서, 생체의 기구·기능을 공학적으로 연구·응용하는 학문으로 정의할 수 있으며, 생체모방공학(biomimetics)이라는 용어와도 유사한 목적으로 사용된다. 그 당시에는 관련 기술들이 발달하지 못하여 먼 미래의 일로 여겨져 왔던 생체모방과 관련된 연



그림 1 소머즈(The Bionic Woman)

허 신 : 한국기계연구원 미래기술연구부, 선임연구원
김 완 두 : 한국기계연구원 미래기술연구부, 부장

_e-mail : shur@kimmn.re.kr
_e-mail : wdkim@kimmn.re.kr

구들이 현재에는 IT, NT 및 BT 기술의 발달로 세계적으로 다양하게 진행되고 있다. 예를 들면, 근육마비자를 위한 바이오닉 근육, 망막이 손상된 사람에게 이식될 바이오닉 눈, 소리를 전자신호로 바꿔 뇌에 전달하는 바이오닉 귀, 냄새를 맡는 바이오닉 코, 그리고 화학적 메커니즘으로 맛을 감별하는 바이오닉 혀 등, 심지어 바이오닉 신경과 심장에 도전하는 곳도 있다. 소머즈의 오른쪽 귀의 경우는 아마 낙하 충격에 의해서 중이 및 내이의 청각기관들이 손상을 입었을 것이고 생체모방공학을 이용하여 제작된 인공 청각기관인 바이오닉 귀를 대체 삽입하였을 것이다. 만약 이러한 바이오닉 귀가 제작된다면 남녀노소의 사람들에게 가장 많은 혜택을 줄 수 있을 것이다. 왜냐하면 청각 장애는 사람에게 가장 많이 발생할 수 있는 장애 중의 하나이기 때문이다. 예를 들어, 중부 유럽인 중의 4%는 45세 후에 청각 장애 또는 귀먹음이 발생한다고 하며 15%에서 20%의 사람들이 그들 생애 중에 청력감소를 경험한다고 한다. 청각 장애의 원인으로서는 소리를 증폭시키고 전달하는 부분(외이, 중이)과 소리정보를 전기신호로 변환해서 뇌에 전달하는 부분(내이)인 달팽이관(cochlea)의 이상으로 발생할 수 있다. 그림 2에서와 같이 달팽이관에는 소리를 특정 주파수별로 분해하는 베셀러 멤브레

인(basilar membrane)과 베셀러 맴브레인의 상단에 배치되어 소리정보를 전기신호로 변환해서 신경을 통해 뇌로 전달하는 역할을 하는 부동섬모(stereocilia)

들이 존재한다. 또한 자연계에는 동물의 귀, 물고기의 옆선 등에 공통적으로 생모세포(hair cell) 위에 부동섬모가 존재한다. 물고기의 옆선에 존재하는 부동섬모는 유체의 흐름을 감지하고 주변의 움직이는 물체를 감지한다. 청각기관이 없는 히드라와 해파리와 같은 해저식물도 플라크톤과 같은 포획물을 탐지하기 위하여 기계적 감각수용기(mecha-

noreceptor)가 있을 수 있다. 이 글에서는 인간 및 동물의 청각기관 또는 평형기관과 물고기의 옆줄에 존재하는 나노스케일 부동섬모의 구조 및 원리에 대해서 살펴보고 부동섬모의 형상 및 물성을 측정하고 분석하는 기술, 이러한 측정 및 분석 데이터를 토대로 등가적으로 모사하기 위한 인공 나노섬모의 해석 기술, 또한 인공 나노섬모의 제조 공정

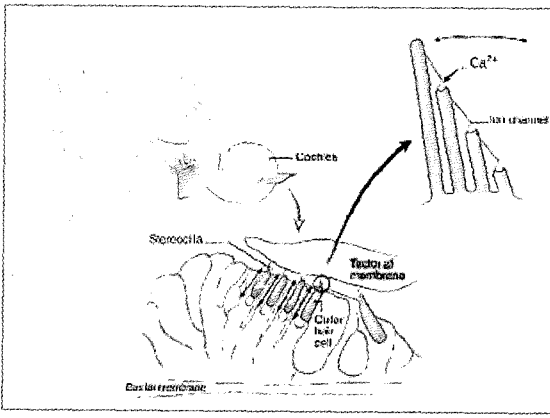


그림 2 달팽이관의 단면 및 부동섬모 구조

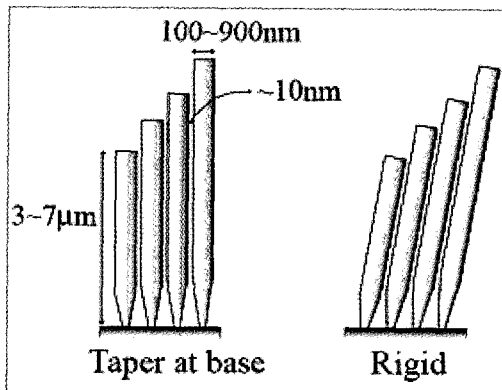


그림 3 부동섬모의 제원

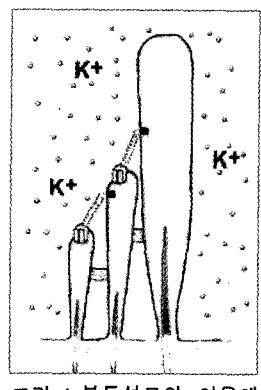


그림 4 부동섬모의 이온채널 작용

기술에 관하여 소개하고자 한다.

나노스케일 부동섬모의 원리

부동섬모는 그림 3과 같이 길이가 3~7 μm , 직경이 100~900nm 범위에 있는 길이가 다른 막대들이 정렬되어 있고, 이것들은 직경이 5nm인 작은 팁 링크(tip link)에 의해서 서로 연결되어 있다. 외부자극이 들어오면 부동섬모들이 변형되면서 팁 링크가 늘어나게 되고 이온 채널이 열리게 되고 양이온(cation)이 들어가게 되어 맴브레인 전위가 변화하게 된다. 이로 인해 전기신호가 발생하여 신경계를 통해 뇌로 전달되게 된다. 그림 4는 부동섬모의 이온채널의 작용을 보이고 있다.

동물의 청각과 관련된 부동섬모의 작용 메커니즘과 해석에 관하여 많은 연구들이 진행되어

왔으며 대표적인 연구자로는 미국 Rice 대학의 W. E. Brownell, Rockefeller 대학의 A. J. Hudspeth, Minnesota 대학의 P. Santi, Oregon 대학의 R. G. Walker, 영국 Nottingham 대학의 K. P. Steel가 있다.

나노스케일 부동섬모의 자연모사 기술 동향

나노스케일 부동섬모를 모사하기 위해서는 먼저 동작 원리, 기전 메커니즘 분석, 작동 특성을 분석 및 측정하고 물성, 형상, 제원 등도 파악한 다음, 등가적인 모델을 수립하고 다중스케일 또는 다중물리 해석을 수행한다. 해석 결과를 분석하고 측정된 시험 데이터와 비교하여 모델을 수정하고 최적의 등가 특성이 구현되도록 한다. 그리고 수행된 해석 결과와 최종 등가모델은 인공구

조물을 제작하는 데 사용한다.

해석기술

나노섬모와 같은 자연구조물의 해석을 위해서는 다중 스케일 해석과 다중 물리 해석 기법이 요구된다. 다중 스케일 해석은 연속체 방정식(continuum equation)이 적용되는 매크로 영역과 분자동역학(molecular dynamics) 해석이 필요한 나노스케일의 바이오 구조물이 접해있는 분야에 적용되며, 각각의 해석과 함께 이들의 커플링 문제가 중요하다. 다중물리 해석에서는 유체와 나노 물질 그리고 바이오물질이 접해 있는 대상을 해석하기 위해 유체, 구조, 화학, 전기의 통합해석이 요구되며, 많은 데이터를 신속하게 처리할 수 있는 하드웨어가 필요하다. 나노섬모와 주변 유체간 상호작용 해석을 위한 노력

이 계속되고 있으나 아직은 단순화된 모델을 사용하는 수준에 그치고 있어 주변 유체의 상태 변화에 따른 나노섬모의 미시적 변화 예측은 아직 연구되고 있지 않다. 워싱턴 대학의 A. Salt는 부동섬모 주위의 달팽이관 유체에 대한 연구를 심층적으로 수행하였으며, Endocochlear Potential의 발생

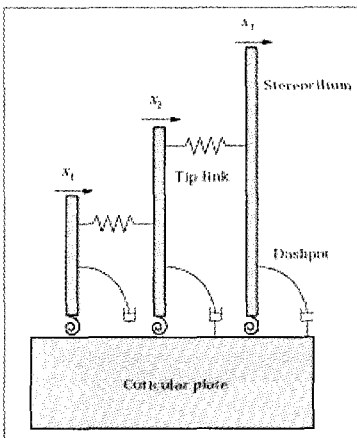


그림 5 부동섬모의 등가모델

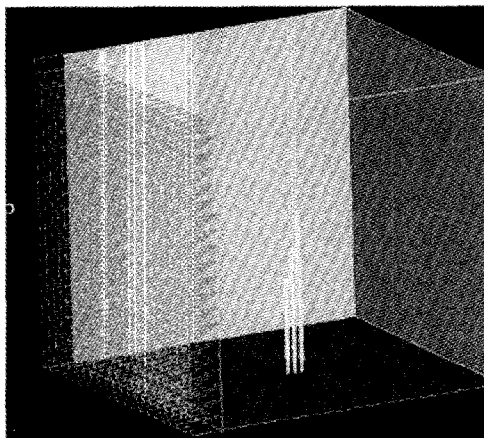


그림 6 부동섬모 및 림프액의 FPI 모델

모델을 제시하였다.

1998년에 Svrcek-seiler WA 등은 부동섬모의 Brownian motion에 대한 모델을 만들었으며 오스트리아 Vienna University of Technology, 헝가리 Research Institute for Particle and Nuclear Physics 공동 연구팀은 주변 유체를 배제한 채 부동섬모를 그림 5와 같이 2자유도를 가지는 딱딱한 막대기로 가정하여 변위 계산을 시도하였다. 최근에는 기계연구원에서 그림 6과 같이 부동섬모와 주변 유체와의 상호관계를 고려한 해석(FSI : Fluid Structure Interface)을 위하여 림프액인 유체공간을 설정하고, 유체공간 내에 부동섬모 변들이 존재하는 형상을 구현하여 해석을 수행하였다.

측정기술

최근 들어 원자력현미경(ato-

mic force microscope) 및 SEM(Scanning Electron Microscopy) 등의 미소스케일 구조물에 대한 계측기의 발달과 더불어 내이의 청각감각기관인 달팽이관 및 평형감각기관인 전정기관 내에서 유동 및 생체막의 가진에 의해 음파 및 운동을 감지하는 센서 역할을 하는 부동섬모에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다. Georg von Békésy는 음파에 대한 베셀러 맴 브레인의 진동응답을 최초로 측정하여 1961년에 생리학 또는 의학부문의 노벨상을 수상하였다. 그 이후 부동섬모의 기계적 물성뿐만 아니라 이온채널에 의한 기전원리에 대한 연구가 많이 수행되어 왔다. 1997년에 Furness DN 등은 부동섬모 변들 내의 접촉점 변형에 의한 기전 이온채널 개폐 가능성을 transmission electron micrograph을 이용하여 해석하였다. 1998년에 Silver RB 등은 Confocal mi-

croscopy, SEM 등을 이용한 전정기관 내의 섬모 측정으로 부동섬모의 지지구조 등에 대한 연구를 수행하였고 2000년에 Langer MG 등은 SEM을 이용한 부동섬모의 탄성 및 이미지를 측정하였다. 2002년에 Valk는 Guinea Pig의 부동섬모를 SEM 및 TEM으로 관찰하기 위하여 화학적 처리를 수행하여 관찰한 결과, 부동섬모는 glycocalyx에 의해 둘러 싸여 있고, 팁 링크에 의해서 연결되어 있음을 확인하였다.

최근 한국기계연구원에서는 Guinea pig의 등골을 달팽이관의 난원창으로부터 분리한 뒤, 달팽이관의 침단을 개방하고 2.5% glutaraldehyde(pH7.2) 고정액으로 관류하고 고정액 내에서 달팽이관의 기저 회전부에서 침단 부까지 골 와우각, 혈관조, Reissner막, 개막의 순서로 제거하였다. 그림 7은 부동섬모의 샘플을 채취하고 탈수와 금의 코



그림 7 Guinea pig의 outer and inner hair cell의 SEM 사진(KIMM, 2005)

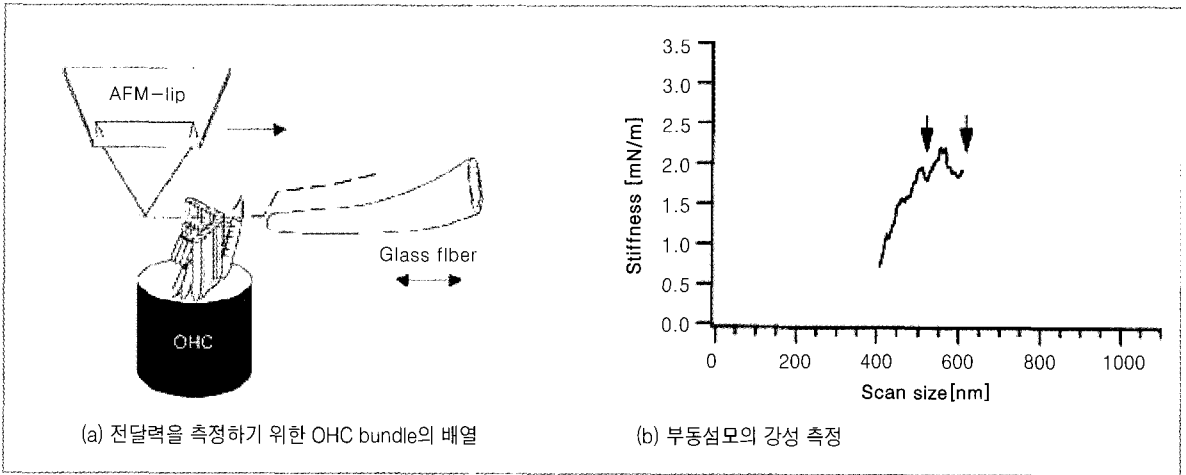


그림 8 부동섬모의 강성측정 방법 및 결과

팅 과정을 거쳐 환경주사전자현미경에서 관찰한 결과이다. 그림 7(a)는 outer hair cell과 inner hair cell의 전체를 관찰한 그림이고, 그림 7(b)는 outer hair cell의 상부, 중간부, 하부를 관찰한 그림으로 각각의 형상과 제원이 다르다는 것을 알 수 있다.

2001년에 Langer는 그림 8과 같이 Postnatal rats로부터 외과 부동섬모를 연구하기 위해서 AFM tip을 사용하여 각각의 부동섬모를 스캐닝하고, 스프링 상수 $2.5 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ N/m를 측정하였으며, 부동섬모 사이의 전달되는 힘을 측정하였다.

그림 9는 달팽이관의 부동섬모에 대한 강성을 측정하기 위한 모식도로서 그림 9(a)는 AFM 캔틸레버와 부동섬모의 시험 전 상태를 보이고, 그림 9(b)는 AFM 캔틸레버가 수평으로 이동하면서 대상 부동섬모를 변형시키는 과

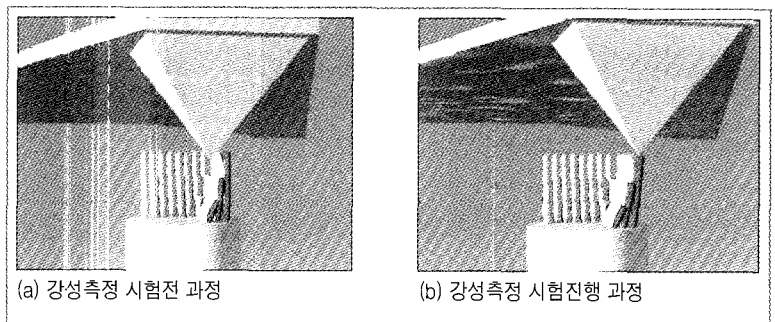


그림 9 부동섬모의 강성 측정을 위한 모식도

정을 보이고 있다.

제작 공정기술

부동섬모를 모사하여 제작되는 인공 나노섬모는 인공 청각기능에 응용할 수 있을 뿐만 아니라 높은 민감도, 방향 감지, 기계적 평형 유지, 노이즈 이하의 소리감지가 가능한 장점이 있기 때문에 기존의 막의 변형을 이용하는 음향 센서에 비해 크기는 줄이고

감도와 지향성을 획기적으로 개선시킬 수 있어 다양하게 응용 가능성이 매우 크다. 인공 부동섬모를 만들려는 시도는 그림 10과 같이 NASA의 F. Noca 등이 외부 압력 변화에 따라서 탄소나노튜브(CNT)의 변형과 휘어짐이 전기적 전위를 변화시킬 수 있다는 개념으로 시도한 것을 비롯하여 최근 몇 년 동안 이런 시도들이 행해져 왔다. 또한 Li 등이 알루미늄 양극산화막(AAO) 등을

이용해서 CNT를 자라게 하는 연구를 보고한데 이어서, 2002년에 J. Liang 등이 알루미늄 양극산화막을 이용하여 나노구멍 내부에 금속을 선택적으로 배열하고 에칭기술을 이용하여 나노 막대를 만드는 기술을 보고하였다.

나노헤어 제작은 CNT뿐만 아니라 폴리머를 녹여 사출성형하는 방법도 연구되고 있다. 독일 Fraunhofer 연구소에서는 UV 경화성 수지와 엠보싱 공정을 이용하여 종횡비는 대략 1인 무반사용 moth-eye 구조를 제작하였다. 그림 11은 기판 크기 13mm, 포어 지름 200nm인 알루미늄 양극산화막의 나노 포어필터(Whatman, Inc)를 스탬퍼로 사용하여 COC 구조물을 사출 성형을 적용하여 나노헤어를 제작한 결과이다. 종횡비는 150 정도이며, KOH를 이용하여 알루미늄 양극산화막을 녹여내는 방법으로 사출물을 이형하였다.

맺음말

나노섬모인 부동섬모를 모사하는 기술은 나노기술과 바이오테크놀로지의 상생 발전에 기여할 수 있는 핵심 원천 융합기술이며, 나노스케일의 자연구조물을 모사하는 공학적인 응용기술을 개발함으로써 의료, 복지, 환경, 군사 등의 광범위한 적용이 이루어질 수 있을 것이라고 확신한다. 또한 이러

한 자연모사 나노섬모 연구의 파급효과로 나노바이오 기능성 소재(완전 생체 삽입 인공보청기, 이온채널 모사 생체신호 변환소재 등), 고감도 음향소재(고성능 마이크폰/하이드로폰, 음향 이미징 어레이), 고감도 센서(미소 유동센서, 전단응력 센서) 개발 등에 의한 신산업 창출 및 고부가가치 산업 선도에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

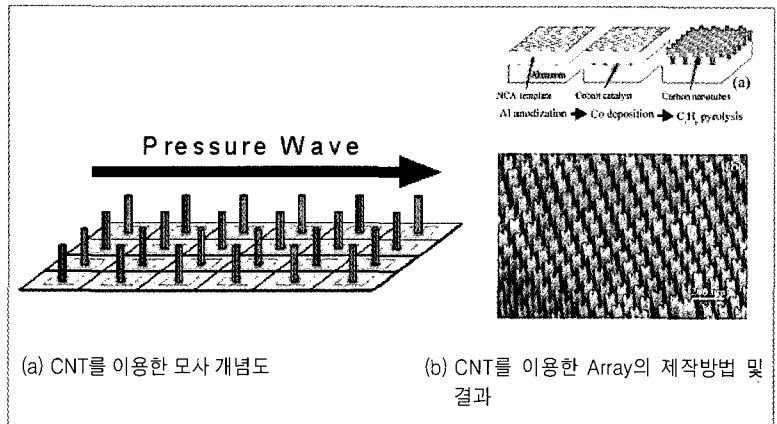


그림 10 CNT를 이용한 인공 부동섬모의 제작

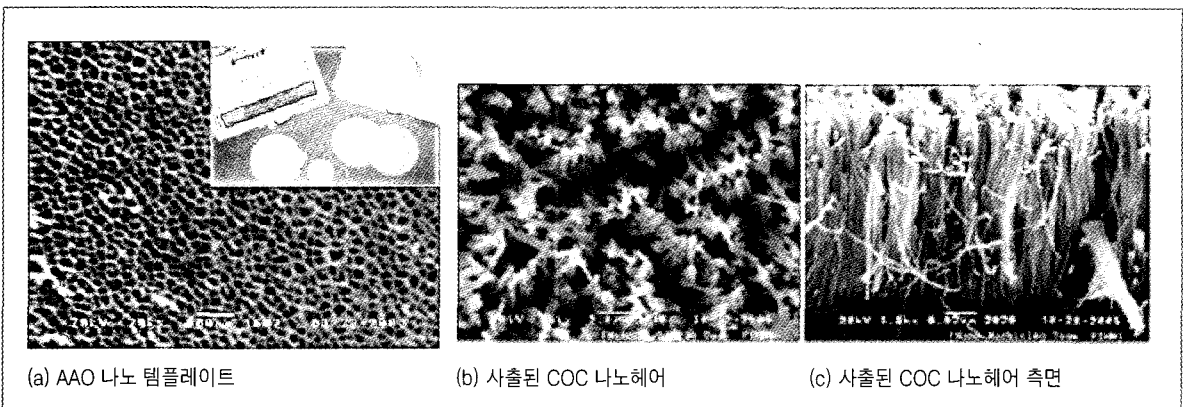


그림 11 AAO plate에 COC를 사출한 결과(KIMM, 2005)