

유체 내 생체운동 모방 기술

이 글에서는 유체 내에서 효율적으로 비행 또는 수영하는 생체의 운동과 이송 메커니즘의 원리를 이해하고 이를 모방하여 공학적으로 응용한 연구들에 대하여 소개한다

최 근 선진국에서는 생체시스템의 다양한 기능들을 인위적으로 모방 응용하여 이를 공업적으로 이용하고자 하는 '생체 모방 기술(Biomimetic Technology)' 개발을 위해 막대한 연구 개발비를 투자하고 있다. 즉, 새로운 기술개발이 한계에 다다랐을 때 그 해결책을 생체 시스템에서 찾자는 새로운 패러다임이다.

지구상의 모든 생명체는 수백만 년 동안 주어진 환경에 맞게 변화하여 온 결과이며, 생명체를 모방하는 기계를 만든다는 것은 이러한 자연의 경험을 이용하는 것을 의미한다. 동물의 근육은 고

효율형 기계적 모터이며 정교하게 제어가 가능하고, 물고기는 미약한 근육의 힘으로 매우 빠르고, 최신형 잠수함보다 효율적으로

유명한다.

생체모방 기술의 기원을 정확히 알 수 없을 정도로, 인간은 지난 수천 년 동안 자연을 모방하

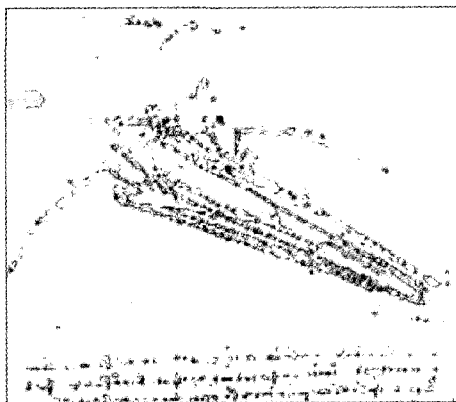


그림 1 레오나르도 다 빈치가 구상한 날름

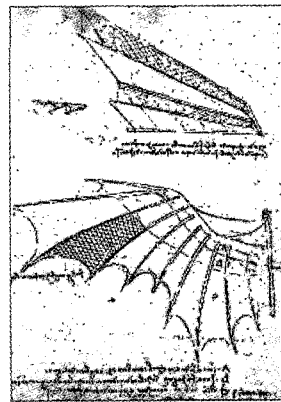


그림 2 레오나르도 다 빈치의 비행기 날개 연구

장영수 | 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터, 선임연구원
김광호 | 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터, 책임연구원

_e-mail : yschang@kist.re.kr
_e-mail : khkim@kist.re.kr

는 설계를 하여 왔다고 할 수 있다. 5세기 이탈리아의 레오나르도 다 빈치는 과학적인 측면에서 하늘을 나는 새를 관찰하고 설계한 비행기 도면을 남겼으며, 물고기의 모양을 근거로 하여 매끄러운 선체를 고안하였다. 19세기 릴리엔탈은 인간이 날 수 있는 기구개발에 새의 날개짓을 관찰하여 적용하고자 하였으며, Wright 형제는 대머리수리의 비행을 보고 이를 모형화하여 비행기를 제작하였다.

인간은 특히 하늘을 나는 새에 대한 모방에 관심이 컸으나, 생체 모방공학이라 할 수 있을 만큼의 정교한 작업이 가능해진 것은 최근의 일이며, 1960년 미 공군의 Jack Steele에 의해 최초로 생체공학(bionics)라는 용어가 제안되고, 본격적으로 생물학자, 엔

지니어들에 의해 생체모방 기술에 대한 연구가 시작되었다.

새와 곤충의 날개짓 모방 기술

예부터 사람들은 새처럼 하늘을 자유롭게 훨훨 날 수 있기를 바랐으며, 하늘을 날기 위해 연구하던 초기의 사람들은 모두 새의 모습과 나는 모양을 자세히 관찰하여 그 흉내를 내려고 하였다. 그래서 커다란 날개를 만들어 어깨에 달고 높은 곳에서 뛰어 내리는 무모한 일들이 1912년까지도 계속되었으며, 미국의 라이트 형제가 모터와 프로펠러가 달린 동력비행기를 타고 하늘을 난 것은 1902년 12월 17일의 일이었다. 그 이후로 고정익에 의한 비행기술이 발전하여 인간이 만들

어낸 고정익의 비행기는 새보다 더 빨리, 더 멀리 비행할 수 있게 되었다.

최근 초소형 미세 비행체(Micro Aerial Vehicle)를 개발하는 데 세계적으로 많은 관심이 모아지고 있다. 이는 초소형 비행체가 상용 또는 군용으로 사용 범위

가 매우 넓기 때문이다. 일례로 재난지역이나 위험지역에서 정보를 획득하고 인명구조를 위해 유용하게 사용될 수 있다. 초기에 공학자들은 MAV의 개발을 위해 단순히 기존의 비행체에서 사용하는 고정익 또는 회전익을 작게 만들고 이것의 공력학적 성능을 개선하려는 연구로 출발하였으나, 크기가 작아질 경우 유동의 특성이 매우 달라지므로 단지 날개의 크기만 줄이는 것으로는 큰 날개의 항공기와 유사한 성능을 얻을 수 없었다.

그림 3은 비행체의 무게와 레이놀즈(Reynolds) 수의 관계를 보여 주고 있다. 이 그림으로부터 일반적인 항공기의 경우 비행 Reynolds 수는 10^6 이상의 영역에 있음을 알 수 있다. 그러나 최근 관심을 가지고 개발하기 시작한 MAV의 비행영역은 레이놀즈수가 10^4 이하임을 알 수 있으며, 이 영역은 작은 새와 곤충의 비행영역에 근접해 있다.

마이크로 비행체(MAV : Micro Air Vehicle)에 퍼덕이는 날개를 사용하면 많은 장점을 가질 수 있다. 고정익 비행체는 자체의 무게를 지탱하기 위해서 공기 중을 비행할 때 공기흐름에 의해 발생하는 양력(lift)에 의존하고 이는 비행체가 작아질수록 불리해진다. 이에 비하여 퍼덕이는 날개는 비행속도뿐만 아니라 날개짓에 의해 발생하는 양력을 이용한다. 날개짓 비행은 동일한 속도

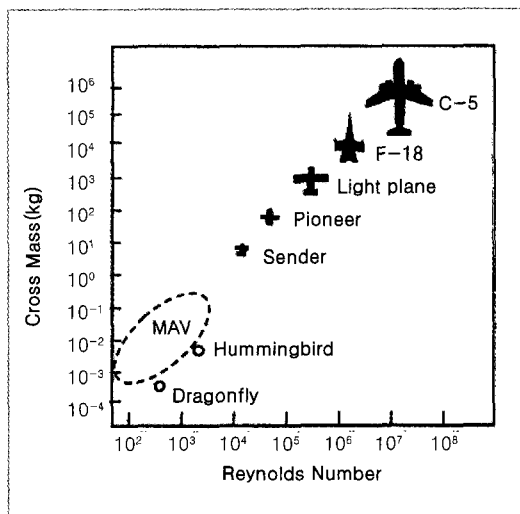


그림 3 비행체의 무게와 레이놀즈수와의 관계 (McMichael & Francis, 1997)

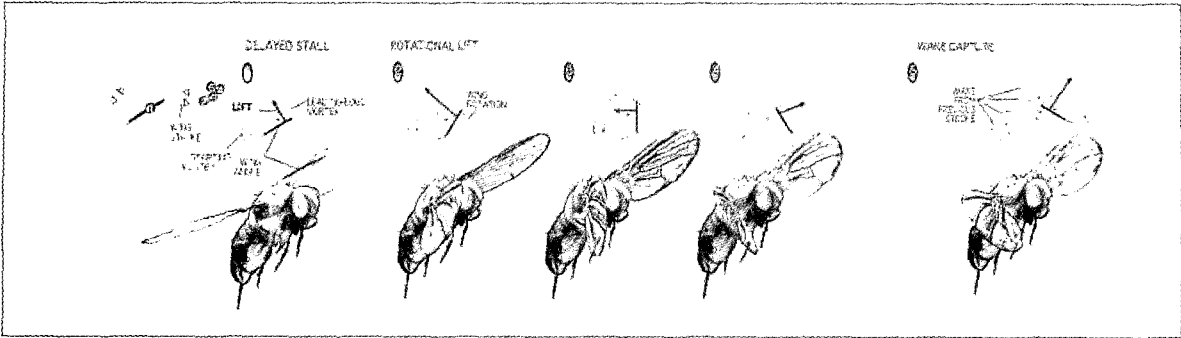


그림 4 1주기 동안 flapping wing의 비정상 공기역학

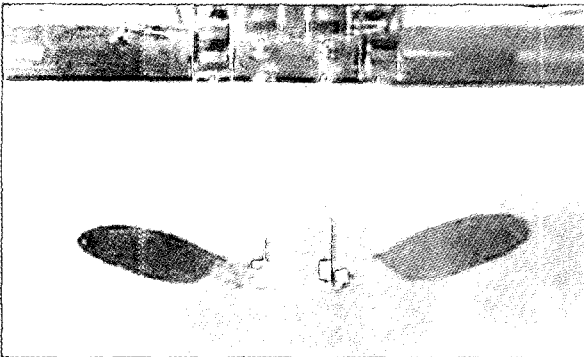


그림 5 Caltech 대학의 RoboBee 모델

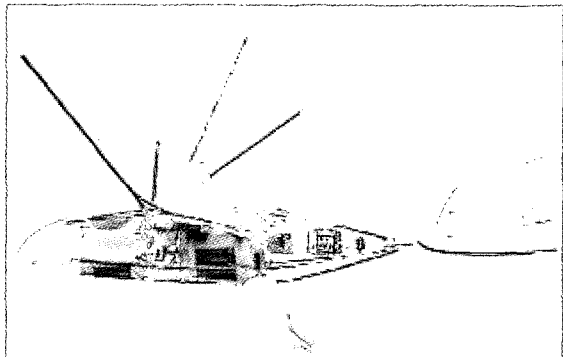


그림 6 CalTech 대학의 Microbat

와 양각에 대하여 정상상태의 비행에 비하여 높은 양력을 발생시키는데, 그 이유는 움직이는 날개에 의한 비정상상태 유동에 의해 유발되는 전연 와류(leading-edge vortex) 때문이라고 알려져 있다.

곤충의 날개는 얇고 유연한 특성을 가지고 있으며, 공기 중에서 날개짓 할 때 유동박리를 일으키고, 전연와류를 생성시킨다. 그리고 이러한 전연와류를 오랫동안 유지함으로써 이것이 순환(circulation) 및 날개의 양력을 증가시키는 원인이 된다. 그림 4는 곤충의 날개짓의 1주기 동안

의 지연성 실속, 회전에 의한 순환, 후류 포획과 같은 비정상상태의 유동 현상을 나타낸 그림이다. 곤충은 날개의 운동면을 경사 또는 비대칭으로 하거나 하향 날개짓 시간을 조절함으로써 수직 이륙 및 착륙을 가능하게 한다. 따라서 곤충의 비행은 미세하게 비행을 제어하거나 급히 이륙하기도 하고, 방향을 급히 바꾸거나 동등 떠다니는 능력을 갖는 초소형 자율적 비행체에 응용될 수 있으며, 이러한 능력은 실내와 같이 협소한 공간에 사용되는

“Flapping wing”을 이용한

비행체 개발에 관한 연구는 영국 Cambridge 대학의 C. Ellington 교수를 시작으로 수행되었으며, 같은 영국의 Exeter 대학의 R. Wootton 교수, Leeds 대학의 J. Rayner 교수팀 등에서 지속적으로 연구되고 있다. 독일에서도 Saarbruecken 대학의 W. Nachtigall 교수, Goettingen 대학의 W. Zarnack 교수팀들이 연구를 수행하고 있으며, 미국에서도 최근 들어 Berkeley 대학의 R. Fearing 교수팀, Caltech의 M. Dickinson 박사 연구팀들이 파리의 비행을 모사하는 추진체를 연구



그림 7 Georgia Tech의 Entomopter

하고 있다. 독일 UIm의 F. Lehmann 교수팀에서도 유사한 연구를 시작하고 있다. 이들 연구 인력들은 대부분 생물학, 동물학, 생태학 등을 연구한 학자들로서, 이러한 분야를 중심으로 연구 활동이 전개되어 왔으나 최근 들어서는 공학적인 개념을 접목하여 MAV 등 실제적인 응용분야를 그 대상으로 연구를 수행하고 있다.

파리의 경우, 공기역학적 비행 능력은 상상을 초월할 정도로 우수하다. 파리의 이동과 항법능력에 대한 원리를 밝혀내 하드웨어로 재구현하면 만능 곤충로봇을 만들 수 있을 것이다. 이러한 파리의 비행에 관한 연구는 앞에서 언급한 것 같이 미국 Caltech의 Dickinson 박사 연구팀에 의해서 수행되고 있다. 이 연구팀은 파리의 비행 역학을 분석하여 그림 5와 같은 Robofly라는 실험용 모형을 이용해 파리의 운동을 재현하고, 이때 날개에서 발생하는 힘과 날개 주위의 유동을 측정하여 비행 메카니즘에 대한 연구

를 수행하였다.

미국 Caltech의 Y. C. Tai 교수 연구팀과 UCLA의 C. M. Ho 교수 팀은 박쥐에서 모방한 날개를 사용한 초소형 비행체 Micro Bat의 시제품을

만들어 그 특성을 실험적으로 연구하였다. 이 날개는 티타늄 합금, 폴리머 등을 소재로 하며, 약간의 유연성을 가지고 있다. 실험 결과에 의하면 이러한 날개의 유연성이 양력 및 추진력 향상에 도움을 주는 것으로 파악되고 있다. 또한 여기에 MEMS 가공을 이용하여 미세 actuator valve를 부착하여 날개 주위의 유동장을 제어하고 이를 통해서 양력의 증대를 가져올 수 있다고 발표한 바 있다.

한편, 미국 국방부의 연구프로젝트의 하나로서 미국 조지아 기술연구소는 곤충 스파이 비행기인 엔토몹터(Entomopter)를 개발 중에 있다. 이 비행기의 특징은 전기를 이용한 제트 엔진이 아닌 화학반응으로 동력을 얻고자 하는 것이다. 몸통 부위에 있는 왕복운동 화학근육(reciprocating chemical muscle)에 연료를 주입한 후 화학반응을 일으켜 가스를 발생시키고, 이를 이용해 날개를 움직이는 방식으로 최

소한 3분 동안 비행을 목표로 하고 있다. 하지만, 아직까지 이 비행기는 날개길이가 25cm이고 무게는 15g으로 공중에서 15초간 비행이 가능하다.

우리나라에서도 이러한 연구의 필요성을 인식하고, 한국과학기술연구원에서 'flapping wing'을 이용한 추진체 개발을 위한 연구를 시작하게 되었으며, 공중에서의 정지비행과 전진, 후진 비행이 가능한 벌새의 독특한 비행능력을 가능하게 하는 날개짓의 운동 메카니즘을 규명하고, 이러한 날개짓을 모방한 왕복 진동형 운동에 관하여 운동 해석 및 공기역학적인 해석을 수행하였다. 벤처기업인 Neuros 사는 비교적 큰 인공 새인 Cybird(무게 280g, 날개 길이 99cm, 비행시간 18min)를 상품화하여 판매하고 있다. 그리고 이진욱은 2003년 Micro RC Ornithopter(날개 길이 23cm, 무게 28g) 개발하였고, 항공대의 정조원 교수팀이 Songgolmae(날개 길이 88cm, 무게 277g)를 개발하여 비행시간 23min을 기록한 것으로 알려져 있다. 국내에서는 주로 크기가 비교적 큰 새를 모방한 비행체의 개발에 주력하였으며, 곤충의 모방연구는 없는 실정이다.

Swimming and Undulation

Flapping motion은 새뿐만 아니라 물고기의 움직임에서도 볼 수 있으며 이를 모방하면 수

중 추진체의 운동에 적용할 수 있다. 대표적인 연구사례로서 미국 MIT의 해양학과 교수인 M. Triantafyllou와 A. Techet 교수팀을 들 수 있다. MIT에서는 Robo Tuna라는 실험장치를 통해서 대형수조 속에서 실험적으로 수중 추진 메커니즘을 연구하고 있다.

유체 속에서 이동하는 메커니즘은 바다, 호수 및 강에서 살아가는 생물로부터 영감을 얻는 경우가 많다. 이 생물들을 관찰하여 보면 이들 몸체의 길이 방향으로 움직이는 진행파를 이용하는 것을 알 수 있다. 칠성장어의 수영 운동은 몸의 길이 방향으로의 굴곡파 진행(undulation ; 파동 이동)을 이용하고 있으며, 몸의 중심축은 겉보기로 S형을 이루고 있다. 그 파형은 머리에서 꼬리 쪽으로 전파될수록 진폭이 증가한다.

좀더 진화된 수영 메커니즘은 날아다니는 곤충처럼 와류를 활용하는데, 파동 이동할 때에 몸의 길이 방향으로 와류를 흘려보낸다. 와류가 수영체의 꼬리 부분에 도달한다면, 꼬리는 와류를 몸의 한 쪽에서 다른 쪽으로 튀겨 보내는데 이 때 와류의 내부에 포함된 에너지가 추진력으로 변환된다. 물고기 운동의 생체모방(와류 발산 메커니즘)의 개발 예는 Robodolphin(동경공업대)과 Robotuna(MIT)가 있다. 참치와 돌고래는 유선형이며 몸의 앞부분이 비교적 단단하고 추진운동에서 진폭이 적당하기 때문에 채택되었다.

Northeastern 대의 Ayers 교수팀은 칠성장어의 수영운동을 이용하여 수중이동 로봇을 개발하였다. 몸의 축에 따라 교차하는 쌍방향 형상 움직임은 Nitinol로부터 만들어진 형상기억합금에

의해 구동된다.

마이크로 나노 영역에서 생체운동 모방

생체에서 일어나는 중요한 현상들이 모두 마이크로/나노 스케일에서 일어나며, 또한 모든 생명체는 주변 환경에 맞게 최적화된 최상의 시스템이란 점에서 이동 및 이송, 고정방법 등 생명체의 여러 가지 메커니즘을 모방하는 기계를 만든다는 것은 엄청난 자연의 경험을 이용하는 것을 의미한다. 특히 마이크로/나노의 세계에서, 마크로 영역의 작동 메커니즘과는 전혀 다른 법칙이 지배한다는 것을 알 수 있고, 따라서 새로운 개념의 구동방식이 도입되어야 하리라는 것을 알 수 있다. 마이크로 나노영역에서 미생물의 운동은 편모(Fragella)운동, 섬모(Cilliary), 아메바(Amoe-

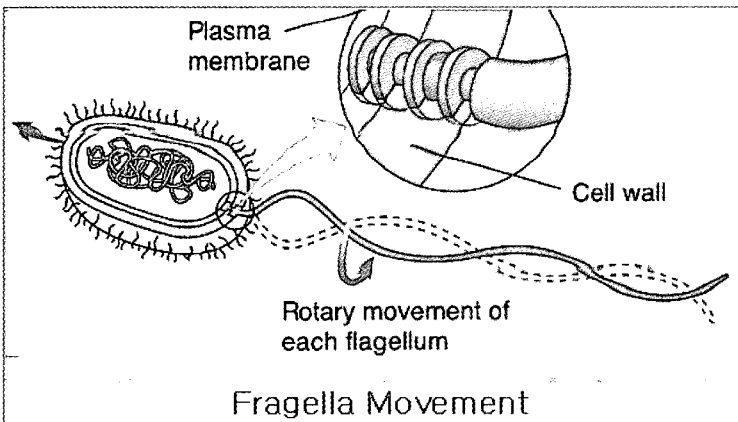


그림 8 편모운동

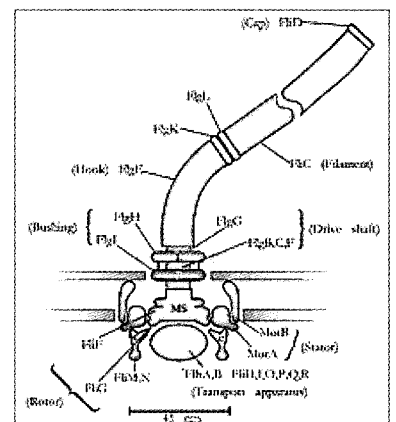


그림 9 박테리아 편모의 회전체 구조

boid) 운동 등이 있는데, 이들의 운동을 모사하여 마이크로 로봇의 추진에 활용하는 연구가 진행되고 있다.

편모운동(Flagella Movement)

체내를 이동하며 외과수술, 치료, 약물투약 등을 수행하는 의료용 미세로봇을 개발하는 경우 원생동물, 기생충, 곤충의 생체모방 기술을 활용하는 것이 필요하다. 의료용이나 산업용으로 사용될 마이크로/나노 로봇의 중요성이 부각되고 있으며, 효율적인 운동 기구는 핵심기술 중의 하나이다. 미세로봇의 이동은 자연계의 원생동물을 응용한 생체모방 기술로서 해결할 수 있으며, 미국, 유럽, 일본 등의 기술 선진국에서는 미래 기술인 분자로봇에 대한 연구를 크게 확대하고 있다.

편모는 50 μ m 이하의 크기를 가지는 미생물의 운동기관이다. 원핵생물이나 진핵생물에서 발견되는데 진핵생물의 편모와 원핵생물의 편모는 서로 다른 메커니즘을 갖는다. 진핵생물 편모의 작동 원리는 ATP가 디네인에 공급되어 미세소관을 들어 올림으로써 활주운동이 생기고, 넥신이 한계 이상의 활주 운동을 막기 위해 미세소관을 잡아당김으로 인해 활주운동이 굽힘운동으로 전환된다.

박테리아에서 볼 수 있는 원핵생물의 편모는 플라젤린이라는 단백질로 구성되어 있고 직경은

머리카락 직경의 500분의 1에 해당하는 12~19nm이며 길이는 세균의 수배이다. 그림 9에 보이는 바와 같이 편모는 세포 표면의 근처에 돌출되어 있어서 프로펠러와 같은 회전운동을 함으로써 1초에 세균의 길이의 10배 정도의 거리를 이동할 수 있다. DC 모터와 같이 편모의 경우도 회전자와 고정자의 역할을 하는 부분이 있고, 에너지원으로서 ATP가

박테리아 막을 통과하여 흐르는 산(acid)의 유동을 통해 생기는 에너지를 이용한다.

편모는 일반적으로 세포 표면에 적은 수로 존재한다. 원생동물 중에서 편모충류만이 편모를 갖고 있으며, 고등 동식물에서는 정자세포에 편모가 있어 정자세포가 편모운동을 통하여 난자로 갈 수 있도록 추진력을 준다. 편모의 길이는 다양하며 약 1 μ m에서부

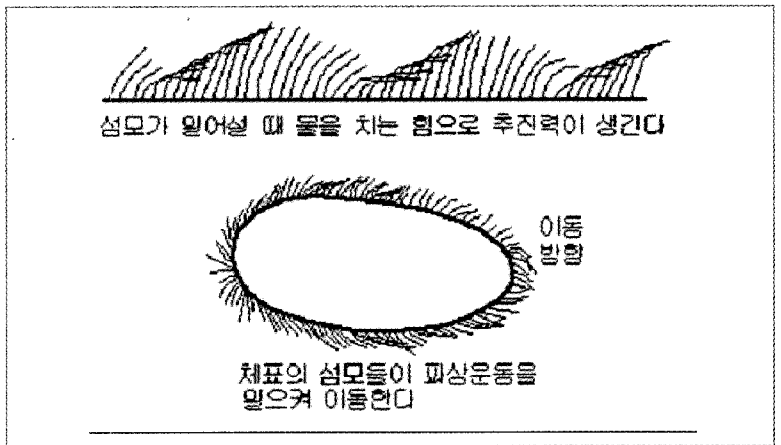


그림 10 섬모운동

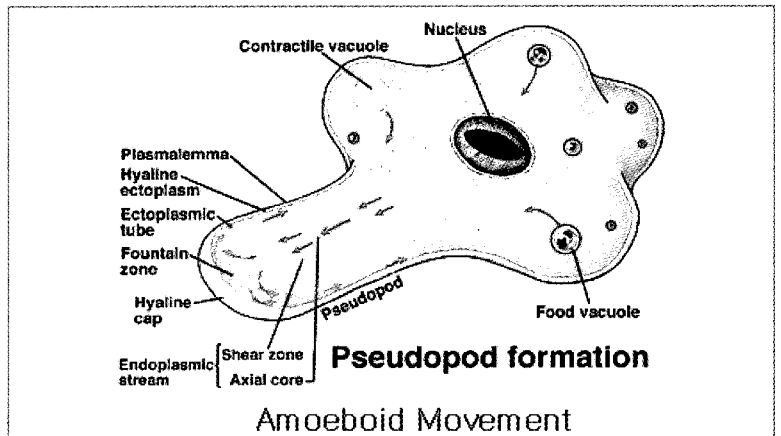


그림 11 아메바 운동

터 수 mm 길이에 달하는 것도 있다. 그러나 직경은 $0.2\mu\text{m}$ 정도로 거의 일정하다.

편모운동을 이용하여 미국의 Cornell 대학은 Nano Helicopter, Bio Molecular Motor를, Utah 대학은 박테리아의 편모운동을 이용한 나노로봇을, 일본의 Tohoku 대학은 혈관 내의 나노로봇을 연구하는 것으로 알려져 있다.

섬모운동(Ciliary Movement)

섬모운동은 짐신벌레와 같은 원생동물이 이동하는 방법이다. 섬모와 편모의 차이점은 명확하지 않지만 편모와 섬모가 행하는 운동 유형에 따라 진동성운동과 파동성운동으로 쉽게 구별할 수 있다. 진동성 유형을 갖는 섬모운동은 섬모에 수직으로 왕복운동이 일어나는데 이러한 섬모운동은 노 젓는 것에 비유할 수 있다.

섬모는 세포표면에 길이가 짧고 수가 많은 상태로 돌출되며, 진자운동을 하고 있다.

섬모운동의 모방과 관련하여 UCLA는 Micro Assembly Robot with Cilia를, Dartmouth 대학의 Bruce R. Donald 팀은 Micro Swimming Robot with Cilia를 연구하고 있다. Berkeley 대학의 Jon Edd 등은 수 mm 크기의 신장 결석 파쇄용 마이크로 로봇을 고안하고, 추진 성능을 해석적으로 분석하였다. 요도를 통하여 신장에 이동할 때, 이 마이크로 로봇은 나선형 탄소나노튜브 섬모로서 추진하는 구조로 되어 있다.

아메바 운동(Amoeboid Movement)

아메바 운동은 주로 단세포 아메바에서 발견되는 것이지만, 포유동물의 백혈구에서도 발견된다.

이들은 수축성 단백질인 액틴과 미오신이 관여하며, Ca^{2+} 에 의해 영향을 받는다.

맺음말

기존의 전통적인 기계 혹은 제어 기술들이, 당면하는 어려운 문제들의 해결에 한계를 보이면서 오랜 시간 최적화된 생체 기능을 모방함으로써 기존 기술의 문제점을 해결하고 개선하기 위한 생체모방 기술의 개발이 전 세계적으로 진행되고 있다. 이러한 전통적인 기술에 생물체 기술을 접목하는 생체모방 기술은 외국에서도 이제 도입단계에 있는 새로운 분야로서, 연구를 통하여 국내 고유의 원천기술을 확보하는 것이 가능하며, 그 중에서도 유체 내 생체모방 이동·이송 분야는 가장 실현성이 높으며 실용화에 근접할 수 있는 분야이다.

기계용어해설

재축확장(Re Cold Expansion)

재축확장은 시간이 지남에 따라 축확장 적용홀의 압축 잔류응력이 감소하는 것에 대해 다시 축확장법을 적용하여 초기 축확장 적용의 효과를 다시 생성하는 것이다.

드레이핑(Draping)

3차원 구조에 2차원 재료를 적용하는 공정 및 대상을 말하며 직물 등을 이용하여 3차원 곡면 구조에 맞게 휘감는 공정을 말한다.

주름각(Crimp Angle)

직물 복합재료의 종방향 혹은 횡방향 토우가 서로 교차하여 이루는 곡선 형태 중 최대 각도를 의미한다.

선형 모터(Linear Motor)

리니어 모터는 비선형효과를 크게 줄일 수 있고 구조 또한 간단하여 고추력, 긴 수명, 적은 유지비용, 적은 열손실과 같은 장점이 있어 고속/고정밀 선형운동에 주로 이용되고 있으나 모델의 불확실성이나 외란에 민감할 뿐만 아니라 리플력, 마찰 특성에 쉽게 영향을 받게 된다.