

김 대 검 한국과학기술원 기계공학과 조교수 | e-mail : daegyoun@kaist.ac.kr

이 글에서는 유연한 수중 동물들의 다양한 추진 및 감각 기관의 형태와 기능을 이해하기 위한 유체-구조 상호작용 연구와 이를 기반으로 한 자연모사 공학 응용에 대해 소개하고자 한다.

생명체들은 주변의 물, 공기와의 상호작용을 통해서 생존하기에, 자연모사공학의 여러 분야에서 유체 역학에 대한 이해가 필수적이다. 새와 곤충의 비행 원리를 응용한 초소형 비행체, 물고기의 수영 원리를 이용한 잠수체, 수면 위를 이동하는 소금쟁이를 모사한 로봇, 식물 내의 모세관 현상을 이용한 이송시스템 등에 대한 유체역학 연구가 그동안 활발히 이루어져 왔다. 이 글에서는 위의 분야 외에 상대적으로 덜 알려진 생체유체역학과 자연모사 연구 분야를 소개하고자 한다.

최근 본 저널의 테마기획에서 소개된 바와 같이 소프트한 재질의 액추에이터, 센서, 로봇에 대한 연구가 최근 활발히 진행되면서, 소프트한 구조로 이루어진 동물을 모방한 시스템 개발에 대한 관심도 점차 커지고 있다. 이러한 자연모사 소프트 액추에이터, 센서의 개발을 위해서는 생명체의 형태, 기능 및 움직임을 이해하고 주변의 유체와 어떻게 상호작용하는지에 대한 이해가 선행되어야 한다. 몸 전체가 매우 유연한 물질로 이루어진 생명체로는 대표적으로 오징어, 문어와 같은 연체동물, 해파리와 같은 자포동물 등이 있다. 이러한 수중 생명체들은 소프트 액추에이터, 로봇을 위한 대표적인 자연 모사 모델로 널리 이용되고 있다.

소프트한 수중 생명체 중 일부는 새, 곤충, 물고기

에서는 찾아 볼 수 없는 제트를 이용한 추진 방식을 이용한다. 제트 추진이란 기관을 수축하면서 몸 안에 있는 물을 방출시키고, 반작용으로 추진력을 얻는 방식이다. 인간이 만들어온 제트 엔진은 지속적으로 제트를 방출시키면서 추진력을 얻지만, 해파리, 오징어 등은 반복적으로 물을 방출하면서 추진력을 얻는다. 수중 동물의 복잡한 제트 추진 메커니즘을 이해하기 위해서 유체공학자들은 먼저 간단한 와류 고리 발생기(vortex ring generator) 모델을 이용하여 연구를 하였다. 발생기 실린더 내부의 물이 피스톤에 의해 외부로 방출되면서, 그림 1 좌측 상단에서 보는 바와 같이 고리 모양의 와류를 형성하게 된다. 와류 고리의 형태가 와류 발생기의 크기와 운동 조건에 영향을 받는다는 사실에 주목하여, 주어진 시간에 최대 추진력을 얻을 수 있는 와류 고리의 형태와 와류 발생기의 최적화된 운동 조건을 밝혀내었다. 와류 발생기를 이용한 연구는 해파리에 대한 생체역학 연구로 확장 적용되었는데, 실제로 해파리의 몸통 수축 운동은 와류 고리를 연속적으로 발생시키면서 최대 추진력을 얻도록 최적화되었다는 것이 밝혀졌으며, 이러한 해파리의 제트 추진 방식은 잠수체의 추진 효율을 향상시키기 위해 응용되기도 하였다(그림 1 우측 상단). 이 연구를 시작으로 동물들의 추진 효율성과 동물들이

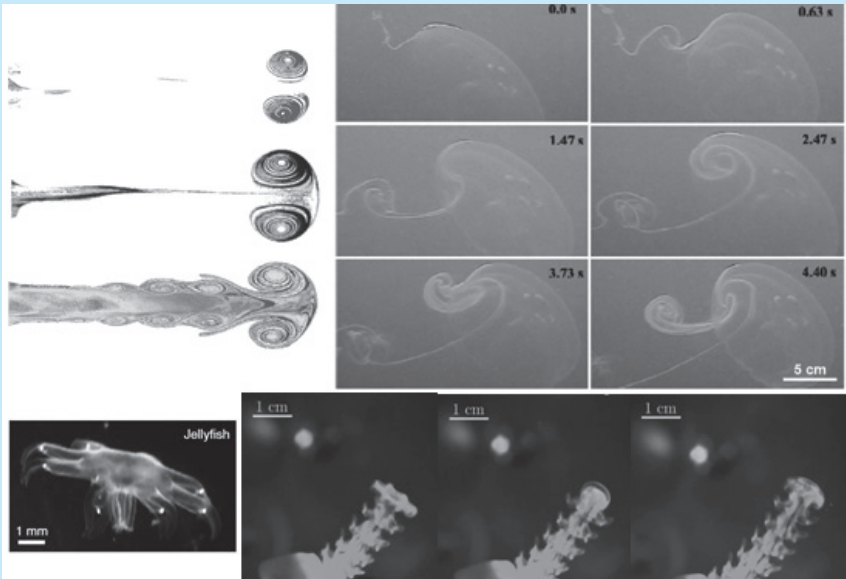


그림 1 와류 고리의 생성과 해파리/에피라 유동 가시화(Gharib et al., J Fluid Mech, 1998; Dabiri et al., J Exp Biol, 2005; Nawroth et al., Nature Biotechnolgy, 2012)

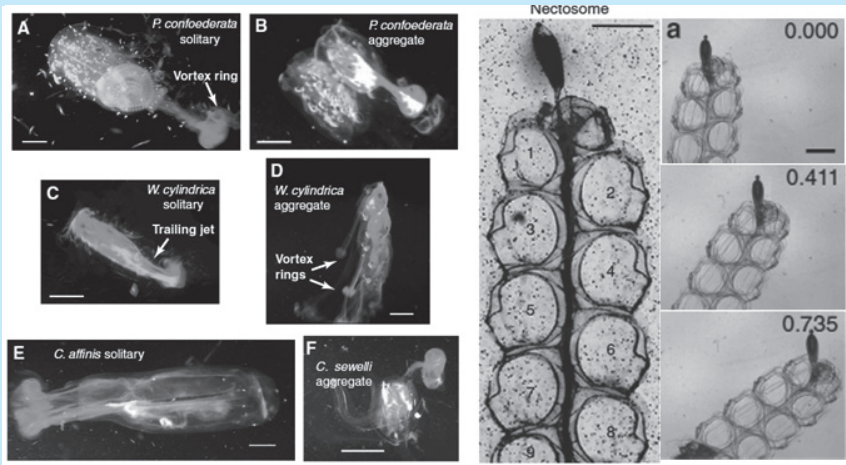


그림 2 좌: 살파 개체와 군집체의 유동 가시화(Sutherland and Madin, J Exp Biol, 2010). 우: 관해파리의 군집 이동(Costello et al., Nature Communications, 2015)

형성하는 와류 형태의 상관관계를 밝혀내기 위한 연구가 큰 각광을 받았다.

해파리 성체의 몸은 벨 모양인 것에 반해 성체가 되기 전 단계의 에피라(ephyra, 부유유생)는 불가사리 모양으로 다수의 돌출부(lobe)를 가지고 있다(그림 1

하단). 에피라는 돌출부 사이에 물이 새어나갈 수 있는 구조임에도 불구하고 어떻게 몸통을 수축하면서 추진력을 얻을 수 있는 것일까? 레이놀즈수가 큰 영역에서 유영하는 성체 해파리와는 달리 크기가 매우 작은 에피라는 레이놀즈수가 상대적으로 작은 영역에서 유영을 하며, 유체의 점성력의 영향을 더 크게 받는다. 에피라의 돌출부 사이의 빈 공간은 상대적으로 큰 유체 점성력으로 인해 막혀져 있는 것과 같은 효과를 지니게 되는데, 불가사리 모양의 몸 구조를 통해 부피를 줄이면서 효율적인 추진을 할 수 있는 것이다. 이러한 추진 방법에 대한 분석을 토대로, 쥐의 심장 조직을 이용하여 외부의 동력이 없이 유영하는 에피라 모사 소프트로봇이 제안되기도 하였다.

다른 수중 젤라틴 동물인 살파(salp) 또한 주기적인 제트 형성을 통해 추진력을 얻는다. 몸통의 아래쪽으로 물을 유입하고 내뿜는 해파리와는 달리, 살파는 위, 아래가 열려 있는 볼록한 실린더 형태를 하고 있다(그림 2 왼쪽). 몸을 반경 방향으로 수축하여 제트를 발생시키며, 몸통의 양쪽 끝 부분에 있는 밸브를 조절하여, 전진과 후진 운동을 자유롭게 수행할 수 있다. 살파의 독특한 특징 중 하나는 각 개체가 독립적으로 생활하기도 하고, 여러 개체들이 서로 연결되어 군집 생활을 한다는 것이다. 이러한 군집 생

축하여 제트를 발생시키며, 몸통의 양쪽 끝 부분에 있는 밸브를 조절하여, 전진과 후진 운동을 자유롭게 수행할 수 있다. 살파의 독특한 특징 중 하나는 각 개체가 독립적으로 생활하기도 하고, 여러 개체들이 서로 연결되어 군집 생활을 한다는 것이다. 이러한 군집 생

활 및 이동은 관해파리(siphonophore)에서도 찾아볼 수 있는데, 그 군집체의 길이가 40-50m에 달하기도 한다. 그림 2 오른쪽에서 보는 바와 같이 서로 연결된 개체들은 각각 제트 추진 방식으로 추진력을 얻어 군집체의 전체적인 움직임을 제어한다. 군집 윗부분의 어리고 약

한 관해파리는 방향전환을 위한 토크를 발생시키고, 뒤쪽의 상대적으로 크고 강한 관해파리는 진행방향의 추진력을 발생시키는 조직적인 움직임을 통해서 관해파리 군집체는 효율적으로 병진 및 회전 운동을 할 수 있다. 군집 이동에 대한 생체 유체역학적인 연구가 현재 진행 중이며, 이를 통해 수중 소프트 로봇의 군집 이동 등에 대해서 자연모사 해법을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

빛해파리(comb jelly)는 해파리와 모양이 유사하지만, 자포동물문에 속하는 해파리와 달리 유즐동물문에 속하는 젤라틴 동물이다. 제트 추진 방식 대신 대부분의 빛해파리는 섬모(cilia)의 운동을 통해서 추진력을 얻는다(그림 3 왼쪽). 일반적으로 섬모는 가늘고 긴 필라멘트 형태의 구조물로, 미생물이나 세포의 표면에 존재하며, 그 길이가 마이크로미터 스케일로 매우 짧다. 섬모의 운동은 추진력을 발생하기 위한 파워

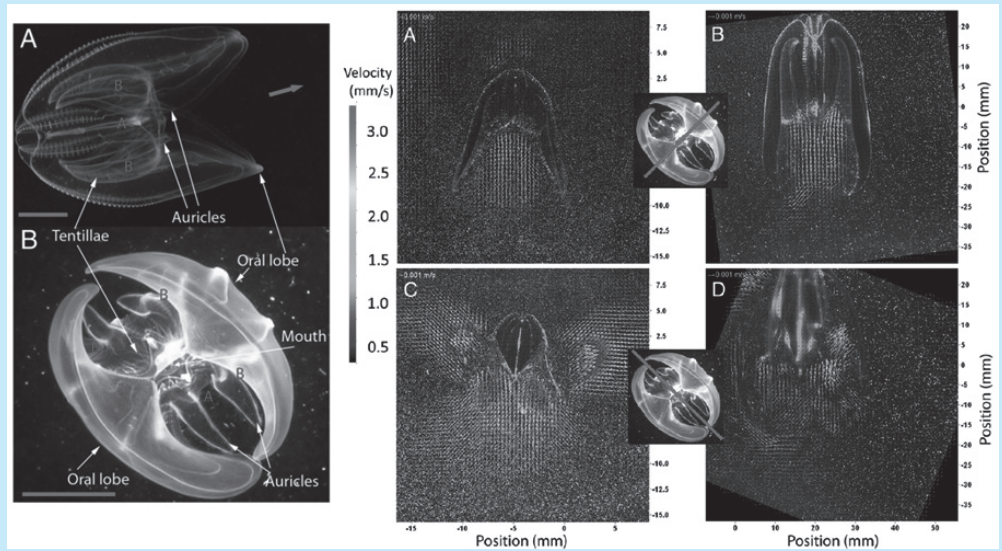


그림 3 빛해파리의 섬모를 이용한 유동 제어(Colin et al., Proc Natl Acad Sci, 2010)

젤리로 이루어진 수중 동물들은 주기적인 제트 분사를 이용한 추진, 섬모의 조직적인 운동을 이용한 추진 및 유동 제어, 각 개체의 동기화를 이용한 군집 이동 등 다양한 액추에이션 방식으로 주변의 유체와 상호작용한다

스트로크와 원래 위치로 돌아가기 위한 리커버리 스트로크로 나뉘는데, 일렬로 정렬된 섬모들은 위상차가 있는 동기화를 통해 섬모파(metachronal wave)를 만들어 추진력을 얻기도 한다. 빛해파리는 생명체에서 가장 큰 섬모를 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 미생물의 섬모와는 달리 관성력이 점성력보다 매우 큰 유동 영역에서 추진력을 얻거나 먹이 포식을 위한 유동 제어를 위해 사용된다. 빛해

파리는 몸통 내부 표면에 줄지어 배열되어 있는 섬모를 이용하여 몸통 안쪽으로 먹이 포식을 위한 유동(feeding current)을 만들어내는데, 먹이가 이러한 유동을 감지하지 못하도록 유동의 속도가 균일하도록 정교하게 섬모의 움직임을 제어하고, 이를 통해 먹이를 몸 안쪽으로 이동시켜 포식을 한다(그림 3 오른쪽). 이는 관성력이 큰 영역에서도 섬모를 이용하여 정교한 유동 제어가 가능하다는 것을 보여주는 일례

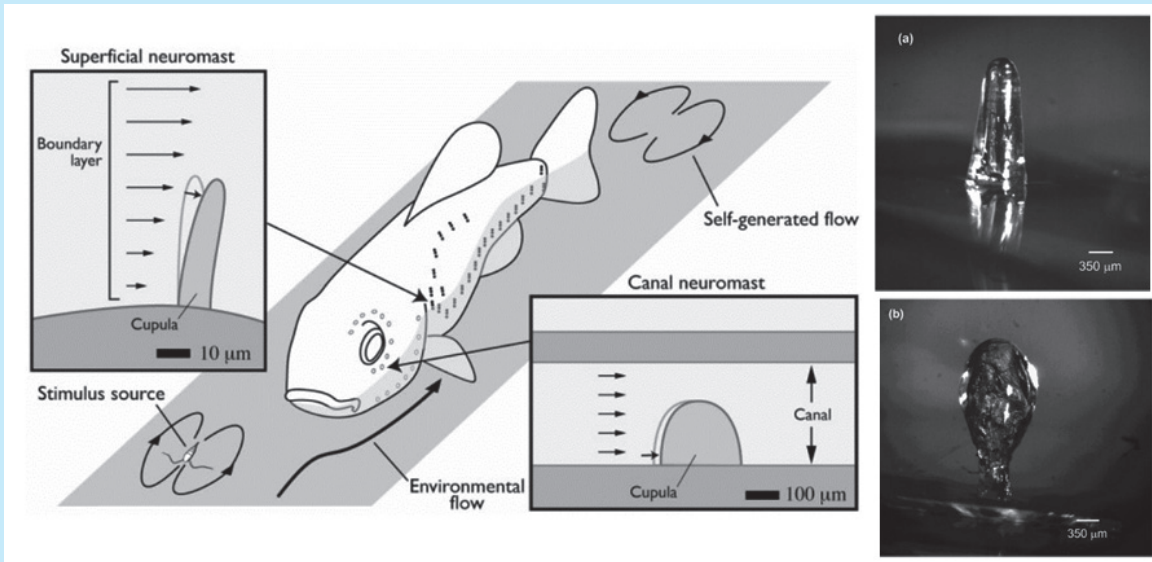


그림 4 좌: 물고기 측선의 유동 센서(Windsor and McHenry, Integr Comp Biol, 2009)
 우: 물고기 측선 모사 유동 센서(Kottapalli et al., Scientific Reports, 2016)

로, 섬모 형태의 소프트 액추에이터를 이용하여 다양한 스케일에서 유동을 제어하는 데 응용될 수 있을 것이다.

동물들의 감각 기관을 모사한 센서의 개발 또한 요즘 큰 각광을 받고 있는데, 수중 동물들의 대표적인 유동 센서로는 측선(lateral-line system)을 들 수 있다. 물고기는 포식, 장애물 회피, 집단 이동 등의 행동들을 위해 측선을 이용하여 유동을 감지하며, 어두운 수중 환경, 탁한 수질 등 시각 정보를 얻기 어려운 상황에서 측선의 역할은 더욱 중요하다. 물고기 주변의 유동은 측선의 마이크로 스케일의 젤 형태의 유연한 신경소구(neuromast)라 불리는 수용기관을 통해 감지된다(그림 4). 신경소구는 유동에 의해 변형되고, 이로 인해 신경소구 내부에 있는 모세포(hair cell)가 휘어지게 되고 전기 자극이 발생된다. 물고기 표면 아래의 관 내부에 존재하는 도관 신경소구(canal neuromast)의 변형은 앞뒤의 압력 구배에 영향을 받으며, 표면에 존재하는 표면적 신경소구(superficial neuromast)의 변형은 유동 속도에 영향을 받는다. 도관 신경소구와 달리 표면적 신경소구는 물고기 표

면의 경계층(boundary layer)에 존재를 하는데, 경계층 내부의 점성 효과에 의해서 감지하고자 하는 외부 유동 패턴에 변형이 일어나므로, 물고기의 측선의 기능을 이해하기 위해서는 경계층의 영향을 정확하게 파악해야 한다. 표면적 신경소구를 간단하게 실린더 형태로 가정하고 보에 대한 응력 해석 이론(beam theory)을 이용한 유체-구조 연성 모델링을 통해서, 경계층이 외부의 작은 진동수의 유동 자극은 그 크기를 감소시키고, 큰 진동수의 유동 자극에는 영향을 주지 않는 고역 필터(high pass filter)와 같은 역할을 한다는 것이 밝혀졌다. 그러나 물고기 표면 경계층 내부의 난류의 영향, 외부 유동이 아닌 물고기 자체의 움직임에 의한 발생한 유동이 신경소구에 미치는 영향, 다수의 신경소구를 이용한 종합적인 유동 패턴 분석 방법 등에 대한 이해는 여전히 부족한 실정이다. 측선의 신경소구와 유체의 연성에 대한 분석을 기반으로 MEMS 기반의 하이드로젤 센서 개발 연구도 활발히 진행되고 있다.(그림 4)

바다표범(harbor seal)의 수영 또한 널리 알려진 유동 센서 중 하나인데, 30초 이전에 바다표범을 지나친

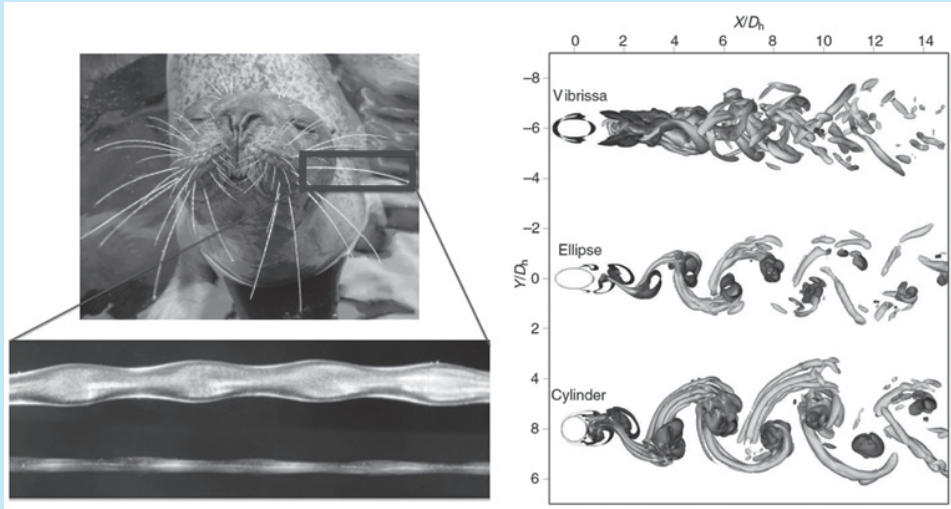


그림 5 바다표범의 수염(vibrissa)과 후류 구조 비교(Hanke et al., J Exp Biol, 2010)

동물들이 만든 유동 패턴을 수염의 진동을 통해서 감지함으로써 궤적을 추적할 수 있을 정도로 정확도가 매우 높다(그림 5 왼쪽). 이러한 바다표범의 수염은 단순히 원형 혹은 타원형의 실린더 형태가 아니라, 납작하고 앞 뒤 부분이 물결 모양인 독특한 형태를 지니고 있다. 단순한 원형 형태의 실린더가 유체 내에서 이동하는 경우, 그 실린더 뒤쪽에 주기적으로 생성되는 와류에 의해서 실린더가 주기적으로 큰 힘을 받으며 와류 유발 진동(vortex-induced vibration)을 하게 된다. 이와 같이 실린더의 자체적인 움직임에 의해서 발생하는 진동으로 인해 주변 유동에 의한 진동을 분리하여 감지하는 데 어려움이 있다. 그러나 바다표범의 수염은 그 독특한 모양으로 인해서 자체 움직임에 의한 주기적인 와류의 생성을 억제하고, 이로 인한 와류 유발 진동의 진폭을 현저히 줄일 수 있다(그림 5 오른쪽). 또한 외부의 불규칙한

수중 동물은 외부 유동에 의한 유동 감지 기관의 변형을 통해 유동 패턴을 파악하며, 정확도를 향상시키기 위해 독특한 형상의 감지 기관을 가지기도 한다

유동에 대해서는 원형 실린더 모양의 수염보다 더 큰 진폭으로 진동을 하게 되어, 외부 유동 패턴을 보다 정확하게 감지할 수 있다. 이러한 물결 모양의 바다표범 수염을 모사한 유동 센서가 현재 개발 중이며, 수중 로봇의 제어, 해양 환경 모니터링 등의 목적으로 활용될 예정이다.

지금까지 수중 동물들의 추진 기관과 유동 감

지 기관에 대해서 생체역학적인 관점에서 살펴보았다. 매우 유연한 젤라틴 동물들은 비록 단순한 구조로 이루어져 있지만 주어진 목적을 위해 정교하고 최적화된 움직임을 보이며, 수중 동물들의 유동 감지 기관의 형태가 외부 자극을 효율적으로 감지하기 위한 최적화의 산물이라는 것이 최근 일련의 연구를

통해서 밝혀졌다. 지금까지의 연구를 토대로 외부 환경 요인에 의한 추진 및 유동 감지의 영향, 센싱과 액추에이션의 통합, 군집 이동하는 생명체의 동기화된 움직임의 역학적인 효율성 등의 주제에 대해서 앞으로 연구가 활발히 진행될 것이다. 생명체를 대상으로 한 모델링, 실험, 수치해석 기법이 빠른 속도로 발전하고 있기에, 소프트 생명체에 대한 유체역학 연구와 이를 토대로 한 자연모사 시스템 개발에 대한 관심은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.