

수중동물의 헤엄침 역학

Swimming Mechanics of Aquatic-Animals

손명환*

Myong-Hwan, Sohn

한철희**

Cheol-Heui, Han

ABSTRACT

The present survey paper introduces the research history, characteristics of body and fin shapes, basic principles of various locomotions and propulsion-generation mechanism of aquatic animals in nature, which utilize unsteady flow through a noble mechanism that is different in paradigm from the propulsion-generation mechanism of man-made marine vehicles, and so have excellent performance and efficiency. The authors hope that the present paper helps to activate the domestic research interest on the fields of swimming in nature, which is expected to provide great ideas for improvement and innovation of today's marine vehicles.

주요기술용어(주제어) : Swimming, Aquatic-Animals, Fins, Thrust Generation, Robot Fish, Marine Vehicles

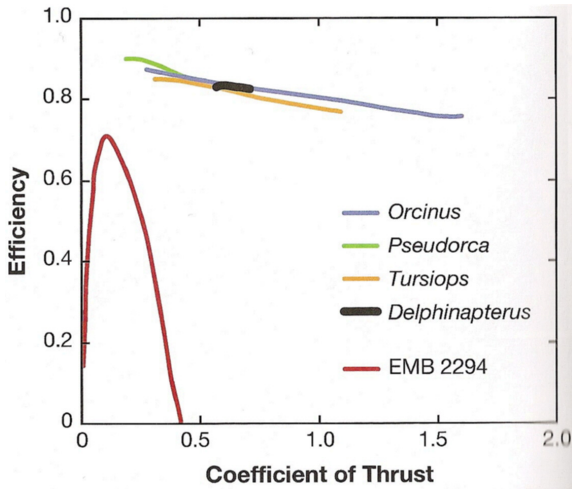
1. 서론

자연계의 수중동물은 오랜 기간 동안 살고 있는 환경에 가장 적합하게 몸의 형태와 운동 양식을 변화시키며 인간이 만든 기계와는 비교가 되지 않는 효율성과 우수한 운동성능으로 헤엄침을 하고 있다. 따라서 이들 수중동물의 모양과 운동 원리를 탐색하고 이를 공학적으로 적용하는 연구는 수중 운행체의 성능개선이나 더 나아가 전혀 새로운 수중 운행체의 설계에 산업적으로 활용할 수 있는 유익한 결과를 제시할 수 있다는 기대 하에 수중동물의 헤엄침에 관한 관찰과 연구는 인류의 역사 가운데 오래전부터 이루어져왔

다. 예를 들면 그림 1은 전형적인 선박용 프로펠러(EMB 2294)의 추진효율과 4종류의 소형 고래의 추진효율을 비교한 그래프로^[1], 고래가 매우 넓은 추진계수의 범위에서 80~90%의 추진효율을 가져 좁은 추진계수 범위에서 70% 이하의 추진효율을 갖는 EMB 2294 프로펠러보다 월등한 추진성능을 가지고 있음을 보여주고 있다.

최근에는 다양한 기능을 갖는 재료와 센서 기술을 동원하여 실제 물고기와 유사한 운동기능을 로봇 수중 운행체를 만들어 산업적으로나 군사적인 용도로 활용하고자 하는 노력도 이루어지고 있다^[2,3]. 자연계에서 발생하는 현상의 원인을 규명하고 이를 인간의 생활에 활용하고자 하여왔던 인류의 오랜 탐구정신과 최근의 재료 및 센서 기술의 발달은 이제 자연영감기술(Nature Inspired Technology) 혹은 자연 모방학(Nature-Mimetics)이라는 새로운 영역의 학문과 기술로 까지 발전하고 있다^[4].

† 2007년 8월 17일 접수~2007년 9월 7일 게재승인
 * 공군사관학교(Korea Air Force Academy)
 ** 국립충주대학교(Choongju National University)
 주저자 이메일 : myongsohn@hanmail.net



[그림 1] 선박용 프로펠러와 소형 고래의 추진효율 비교^[1]

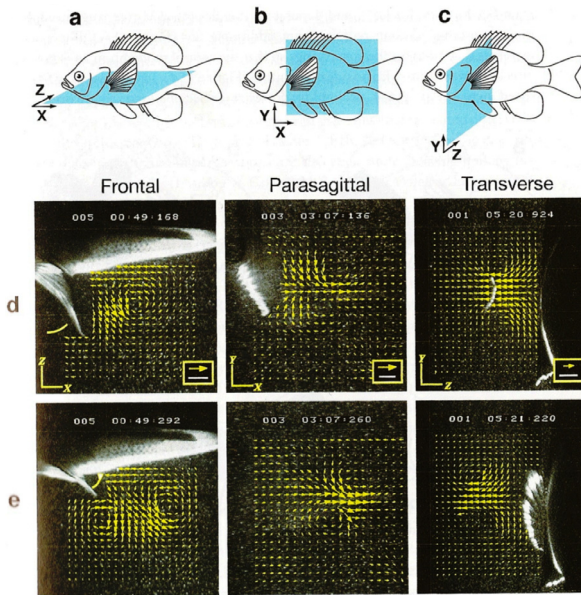
본 논문은 자연계의 물고기와 고래 등과 같은 수중 동물의 헤엄침에 대한 조사 자료를 제공하여 인간이 만든 수중 운행체의 추진력 발생과는 다른 패러다임에서 그리고 비정상 유동(unsteady flow)을 매우 근사한(noble) 방법으로 발생시켜 탁월한 운동기능과 운동효율성을 갖는 수중 동물의 헤엄침에 대한 국내 연구자들이 이해하는데 도움을 주고자 한다.

2. 수중동물의 헤엄침에 관한 연구 동향

설화와 단순한 개념적 지식의 수준을 넘어 자연계의 비행과 헤엄침에 대한 연구가 물리적인 법칙에 의거하여 본격적으로 이루어지기 시작한 것은 18세기와 19세기에 Daniel Bernoulli, Euler, d'Alembert, Poiseuille 등과 같은 걸출한 학자들에 의하여 classical hydro-dynamics의 원리들이 정립된 이후에야 가능하게 되었다. 20세기 초에는 정성적인 연구의 범위를 넘어 헤엄치는 살아있는 물고기의 동력(power)을 측정하기도 하였으며, 일정한 속도의 유동에 잠긴 죽은 물고기가 갖는 항력을 측정하기도 하였다^[5]. Gray는 생물학적 지식과 기계역학적인 지식을 결합하여 뱀장어의 anguilliform 운동을 전송파(traveling wave)의 일종으로 해석하고, 물고기 몸체의 파동운동(undulatory

motion)을 재현하는 기계를 만들기도 하였으며, 1936년에는 돌고래의 추진력 효율에 관한 논문을 발표하여 서구에서 물고기예의 헤엄침에 대한 연구가 활발하게 수행되는 계기를 만들기도 하였다^[6]. 1950년대에는 Geoffrey Taylor와 James Lighthill 두 탁월한 응용수학자가 다양한 수중동물의 추진력을 얻는 방식에 대한 해석 도구와 해석결과를 제시하였다. 이중 James Lighthill은 섬모(ciliary) 운동과 편모(flagellar) 운동, 보다 큰 크기의 수중동물의 운동 형태인 anguilliform motion, carangiform motion, ostraciform motion까지 거의 모든 종류의 수중동물 운동에 대한 수학적 모델과 수력학적(hydrodynamic) 연구결과를 제시하였다^[7-9]. 특히 포텐셜(potential) 유동과 유연한 물고기의 몸체 변형에 대한 선형화 가정에 기초하여 elongated-body theory를 개발하여 물고기 운동의 해석에 필요한 도구를 제시하였다. Wu^[10], Chopra^[11,12], Azuma^[13], Triantafyllou^[14], Lauder^[1] 등은 1960년대 이후의 수중동물 헤엄침에 대한 괄목할 만한 연구자들이다.

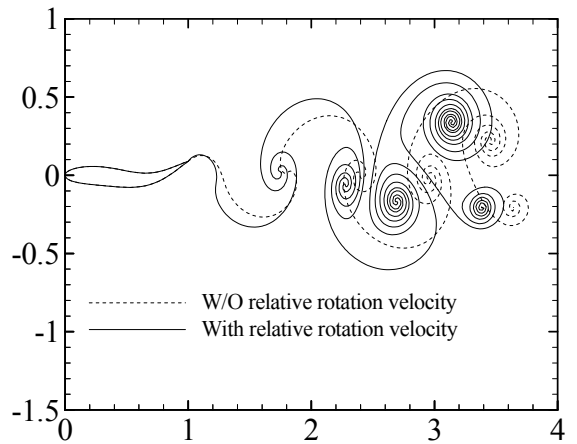
최근에는 생물학, 유체역학, 재료 및 센서/제어 기술 간의 학제적 통합연구를 통하여 실제 동물의 헤엄침에 보다 근접한 수학적 모델을 수치적으로 해석하고 실제 동물과 유사한 실험모델을 제작하여 자연계의 물고기 헤엄침이 갖는 탁월한 추진효율과 기동성능의 비밀을 밝히고 이를 인간이 만든 유체기계에 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면, Stamhuis와 Videler^[15]는 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용하여 몇몇 종류의 살아 헤엄치는 물고기 주위의 유동을 가시화하였으며, Anderson^[16], Triantafyllou^[17], Muller^[18] 등은 DPIV(Digital Particle Image Velocimetry)를 이용하여 살아 헤엄치는 물고기와 모형 물고기 주위의 유동을 측정하여 물고기 후류(wake)에 생성되는 reverse Karman vortex street의 존재와 함께, 꼬리지느러미가 후류의 구조를 적극적으로 조작함으로써 추진효율을 높인다는 연구결과를 발표하였다. Wolfgang^[19]도 비점성(invscid) 유동 모델을 사용하는 수치해석 방법으로 몸체와 지느러미에서 떨어져 나가는 와도(shed vorticity)가 비선형적으로 발전(evolution)하는 현상과 꼬리지느러미의 와류 재배치(re-positioning) 기능



[그림 2] DPIV data on flows induced by pectoral fin in freely swimming bluegill sunfish^[20]

을 밝히는 연구결과를 제시하였다. 그림 2는 Drucker와 Lauder^[20]가 수조에서 자유롭게 헤엄치는 bluegill sunfish의 가슴지느러미에 의해 발생하는 흐름을 DPIV를 사용하여 측정한 속도장이다. 가장 윗줄의 그림은 조명 평면을 보여주며, 두 번째 줄의 그림은 가슴지느러미를 뺀었다가 역으로 움직이는 순간(beat reversal)의 유동장이며, 맨 아래 줄의 그림은 중간 단계에서 마지막 단계의 upstroke 순간의 유동장이다. 가슴지느러미의 움직임(beat)에 의한 와류의 생성을 관찰할 수 있다.

국내에서는 한국 수중로봇기술 연구회원과 일부 대학에서 물고기 모사로봇을 개발하고 있으나^[21] 이는 재료와 제어기술을 동원하여 자연의 특정 물고기를 가능한 가깝게 모방하여 기능성을 향상시키고자 하는 관점의 연구가 대부분이며, 수중동물의 추진력 발생과 관련한 근본적인 물리현상을 역학적으로 규명하고자 하는 연구는 거의 찾아보기 힘들다. 최 해천은 헤엄침 속도가 가장 큰 물고기인 돛새치의 리블렛(riblet) 스킨이 갖는 항력감소의 기능에 대한 연구를 수행하고 있으며^[22], 한 철희는 비정상 2차원 패널 법을 사용하여 단순화된 한 마리의 물고기와 다수의 물고기



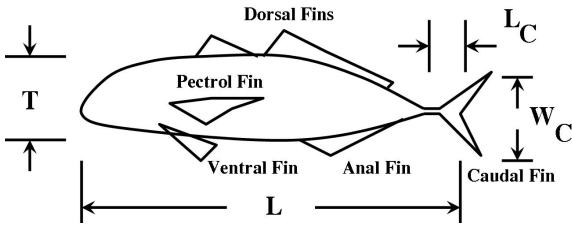
[그림 3] Example of wake patterns behind an undulating fish-mimetic foil^[24]

의 헤엄침에 대한 연구^[23], 모사로봇 물고기를 이용한 유체력 측정과 능동제어 연구 등을 수행한바 있다^[24,25]. 그림 3은 단순화된 물고기 모양의 foil에 대한 굽이침 운동(undulating motion)을 해석한 한 철희^[24]의 연구결과이다. 한국과학기술연구원(KIST)은 지능형 재료를 이용한 올챙이 로봇을 개발한바 있으며^[26], 건국대학교 인공근육연구센터는 지능형 재료를 작동기로 활용한 물고기 모사 로봇을 개발한바 있다^[27]. 한국과학기술원의 유동제어연구실에서는 immersed boundary법을 사용하여 유연한 필라멘트가 유동과 가지는 유체-고체 상호작용 연구를 기반으로 anguilliform의 물고기의 정상상태 유체력 해석, half-cylinder 뒤에서 발생하는 von Karman 와열 내를 움직이는 물고기의 유체력 계산 연구 등을 수행중이다.

3. 수중동물의 헤엄침 관련 몸체 구조와 헤엄침 형태

가. 몸체 구조

물고기의 몸은 앞과 뒤가 뾰족한 방추형(fusiform)이며, 단면은 달걀형(oval form)으로 전체적인 외형은 유선형이다. 물고기의 헤엄치는 능력은 유연한 몸체의 파동운동(undulation)과 지느러미의 움직임으로부터 발생한다. 그림 4는 전형적인 물고기의 몸체형



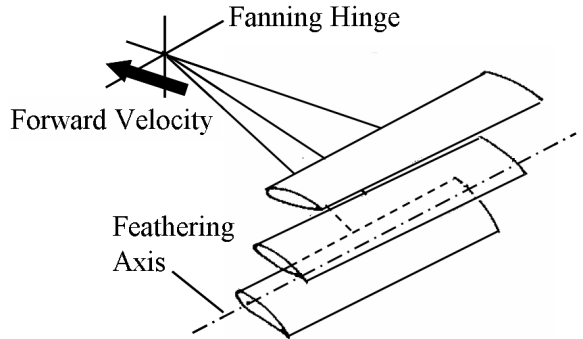
[그림 4] 물고기의 몸체와 지느러미 형태

상과 지느러미를 보여준다. 꼬리지느러미(caudal fin)는 추진력의 대부분을 발생시키며, 등지느러미(dorsal fin)와 배지느러미(ventral fin)는 방향안정성과 측력을 발생시킨다. 가슴지느러미(pectoral fin)는 여러 개의 방사형 핀(fin ray) 사이에 매우 유연한 막(membrane)이 연결되어 있어 그 모양과 운동 형태를 다양하게 변화시킬 수 있다. 이와 같은 모양과 운동 형태의 자유로운 변화 능력으로 가슴지느러미는 추진력뿐만 아니라 상하 움직임, 전진운동에 대한 정지, 선회 등 매우 다양한 운동능력을 제공한다.

꼬리지느러미와 가슴지느러미의 앞전은 항공기 날개의 단면과 같이 앞전은 둥글고 뒷전은 날카롭다. 물고기의 몸통과 꼬리지느러미를 잇는 폭이 가는 부분을 꼬리 자루(peduncle)라 하는데 이 부분은 꼬리날개의 파동운동의 힌지가 되는 부분이 된다. 물고기의 부레(bladder)는 헤엄치는 물의 비중에 따라 공기량을 조절하여 몸체가 항상 중립적인 부력을 갖도록 하며, 또한 피치제어에도 사용되는 공기주머니로 물고기 전체 부피의 5%(바다물고기의 경우)에서 7%정도(민물고기의 경우)를 차지한다. 또한 물고기의 몸 표면은 비늘과 점액으로 덮여 있는데 이중 점액은 물속을 헤엄치는 물고기의 마찰항력을 크게 감소시킨다.

나. Fanning motion에 의한 헤엄침

많은 수중동물은 몸체의 뒷부분 혹은 꼬리 자루(peduncle)을 힌지로 하여 강력하게 좌우(고래 등의 경우는 위아래)로 흔드는 운동을 하는데, 이는 마치 부채로 바람을 일으키는 것과 같은 원리로 물을 물고기 뒤로 보내는 기능을 수행하여 추진력을 발생시키므로 이와 같은 운동을 fanning motion이라 한다(그림 5). 대부분의 물고기가 다른 지느러미에 비하여 상대적으로 큰 꼬리지느러미를 갖는 이유가 대부분의 추



[그림 5] 꼬리지느러미(caudal fin)의 fanning motion

진력과 선회 등의 기동력이 이 꼬리지느러미에 의하여 제공되기 때문이다. 물고기의 꼬리날개의 형태와 파동운동 형태는 그 물고기의 헤엄치는 속도와 순간 기동력과 깊은 상관관계를 갖고 있는 것으로 관찰되고 있다. 일반적으로 작은 가로세로비(aspect ratio)와 커다란 후퇴각(sweep angle)을 갖는 꼬리지느러미를 갖는 물고기는 빠른 출발과 정지, 선회등과 같은 다양한 병진운동성능이 뛰어나나 순항속도는 상대적으로 작다. 꼬리지느러미의 가로세로비는 그림 4에서 WC로 표시된 fin width의 제곱을 fin 면적으로 나눈 값이며, 꼬리지느러미의 후퇴각은 꼬리지느러미의 앞전이 몸체의 수직축과 이루는 각이다. 고등어나 상어등과 같이 순항속도가 매우 큰 물고기의 꼬리지느러미는 커다란 가로세로비를 갖는 것을 관찰할 수 있다.

다. 사행운동(snaking motion)에 의한 헤엄침
물속에 사는 미세한 생물이거나 몸체가 둥글고 긴

물고기와 파충류 등은 긴 몸체 전체 혹은 일부를 정현적 변형(sinusoidal deflection)하여 횡 방향 파동(lateral wave)을 몸체 축 방향으로 보냄으로써 전진 운동을 한다. 이와 같은 운동을 사행운동이라 하며, 이 사행운동에 의한 헤엄침은 가장 원초적인 동물의 전진운동 형태로 수 마이크로(micrometer) 크기의 박테리아, 수십 마이크로 크기의 갯진벌레나 정충(sperm)도 사행운동으로 전진운동을 하며, 대부분 물고기도 어린 시절에는 이 운동으로 헤엄친다. 크기가 수십 마이크로이고 전진속도가 수십에서 수백 마이크로/sec 인 미소 생물이 물속에서 운동하는 것은 관성력은 무시할 수 있으므로 Stokes flow 영역으로 해석을 할 수 있으며, 이와 같은 미소 생물에 대한 해석적인 운동해석이 많은 유체역학자에 의하여 이루어져왔다. 박테리아성 편모류와 정충 등과 같은 미소 생물의 운동과 관련한 레이놀즈수는 10^{-6} 에 $\sim 10^{-5}$ 영역이다. 지렁이 등과 같은 환형동물도 긴 몸체의 사행운동에 의하여 전진운동을 하는데, 이들의 헤엄침에 대한 레이놀즈수 영역은 $10^1 \sim 10^2$ 이다. 따라서 이들 동물의 헤엄침에 대한 해석에서는 점성력과 관성력을 동시에 고려하여야 한다. 몸체 표면에 노출된 무수히 많은 섬모(cilia)를 물결치듯 연속적으로 파동함으로써 전진 운동을 하는 경우도 있다.

뱀장어, 바다뱀, 미꾸라지 등과 같이 둥근 단면과 긴 몸체를 갖는 동물들도 사행운동에 의하여 전진운동을 한다. 이와 같은 동물의 사행운동을 anguilliform 운동이라 하는데, anguilliform운동은 머리부터 꼬리로 가면서 점점 진폭이 커지는 횡 방향 파(transverse wave)를 전송을 하는 파동운동이다. 이들 동물의 전

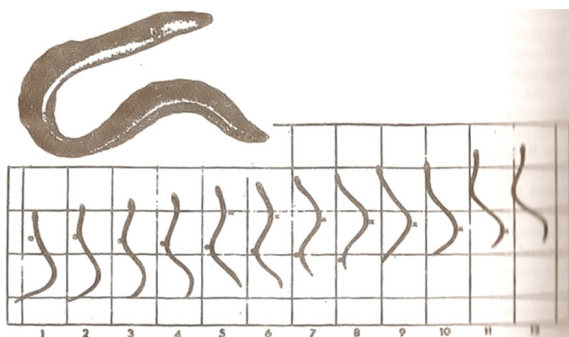
진속도와 파동이동 속도는 모두 10^{-1} m/sec 영역이며, 레이놀즈수 영역은 $10^1 \sim 10^3$ 이다. 그림 6은 뱀장어의 사행운동 형태와 시간에 따른 전진상태를 도시한 그림이다.

라. 기타 방법에 의한 헤엄침

앞서 기술한 부채운동(fanning motion)과 사행운동(snaking motion)외에 물속에서 생활하는 동물의 전진운동 방법에는 paddling, whipping, jetting, sweeping, beating, sailing, skating, wave riding 등이 있다. Paddling과 whipping은 카누의 노를 짓는 것과 같은 운동으로 몸체의 전부 또는 일부를 연속적으로 움직이는 사행운동과는 달리 몸체의 일부를 사용하여 추진력을 얻는 power stroke와 이를 원래의 위치로 되돌리는 recovery stroke를 반복하는 운동이다. 이 두 가지 중 paddling은 power stroke에서만 추진력이 발생하며, whipping은 power stroke과 recovery stroke에서도 대등하게 추진력을 발생시킨다. 물방개, 새우 류, 물갈퀴를 이용하여 물속을 헤엄치는 오리와 수달, 맛 조개(razor shell)등의 헤엄침이 paddling과 whipping형태의 운동이다.

Jetting은 몸의 일부 기관을 통하여 물을 분사시켜 모멘텀을 발생시킴으로 추진력을 얻는 방식의 운동이다. 해파리, 오징어, 가리비조개(scallops) 앵무조개(nautilus) 등이 jetting을 이용하여 전진운동을 하는 대표적인 생물이다. Sweeping은 노 짓는 배의 노 운동과 같은 원리로 추진력을 얻는 방식으로 게가 널찍한 5번째의 다리로 헤엄치는 것이 대표적인 예이다. 천천히 헤엄치는 물고기의 가슴지느러미도 sweeping 방식을 사용하여 작은 크기의 추진력을 얻는다.

Beating은 새의 퍼덕거림과 마찬가지로의 방식으로 upstroke와 downstroke로 구성된 flapping과 feathering의 복합운동을 통하여 추진력을 얻는 방식이다. 가오리의 헤엄침, 오징어의 몸체와 나란히 붙은 편을 이용한 헤엄침, 거북이의 앞발을 이용한 헤엄침 등에서 관찰되는 운동방식이 beating의 예이다. 혹등고래(humpback whale)의 앞발이 변형된 앞 지느러미(flipper)도 beating을 통하여 추진력을 얻는다. 가오리(ray)는 삼각형의 유연한 날개 같은 편을 beating 운동을 통하여 헤엄친다. 이들 기타의 수중동물의 기



[그림 6] 뱀장어의 snaking motion^[8]

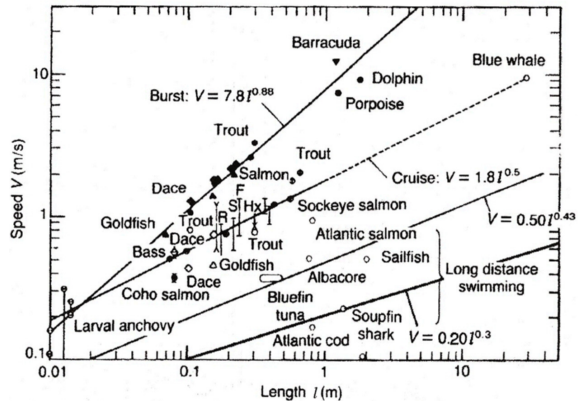
타 헤엄침 방법에 대한 자세한 설명을 참고문헌 [13], [28]에서 찾아볼 수 있다.

4. 수중동물의 운동해석

가. 운동성능 요소

물속을 헤엄치는 물고기의 운동성능을 나타내는 대표적인 지수는 추력계수와 동력계수와 이 두 계수의 비인 효율계수이다. 추력계수는 발생하는 추력(혹은 항력)을 전진속도를 기준으로 한 동압과 물고기 특성 길이로 무차원화 한 값이며, 동력계수는 일정한 전진속도 혹은 회전속도를 유지하는데 소요되는 소요동력(power required)을 무차원화 한 값으로 이때 소요 동력은 profile power, parasite power, miscellaneous power를 망라하며, 무차원화 기준 값은 전진속도의 동압과 특성길이이다. 효율계수는 추력계수를 동력계수로 나눈 값이다. 이들 운동성능에 영향을 미치는 요소는 지느러미의 면적, 가로세로비, 후퇴각 등과 같은 형태요소와 heaving 운동과 feathering 운동의 진폭과 주기, heaving 운동과 feathering 운동의 위상차 등이다.

이들 물고기 헤엄침의 운동성능에 대한 연구는 크게 구분하여 자연 상태에서의 평균속도 측정과 생물학적 대사 측정 등을 통하여 살아있는 물고기의 운동성능을 표본 산출하는 방법과, 기계적인 물고기 모델을 만들고 이 기계적 모델의 형상요소와 운동요소를 변화시켜가면서 운동성능을 측정하는 기계적 모델 연구의 방법이 있다. 그림 7은 자연 상태에서의 물고기 헤엄침 속도와 크기(길이)를 나타낸 것으로 일반적으로 물고기의 크기가 커질수록 순항속도가 커지는 것을 알 수 있다. 고래 류가 가장 큰 순항속도인 10m/sec 정도의 영역에, 연어(salmon)나 송어(trout) 등은 1~2m/sec의 순항속도를 갖는다. 순항속도를 몸체 길이로 나눈 값을 비속도(specific velocity)라 하는데 이 비속도의 상한 값은 10 sec^{-1} 정도이다. 꼬리지느러미의 부채운동에 의한 헤엄침에서 물고기 몸체의 뒷부분이 갖는 유연성은 운동효율을 높이는 데 중요한 역할을 수행함이 생태학적인 관찰과 기계적 모델 연구를 통해서 밝혀지고 있다. 상어나 청새

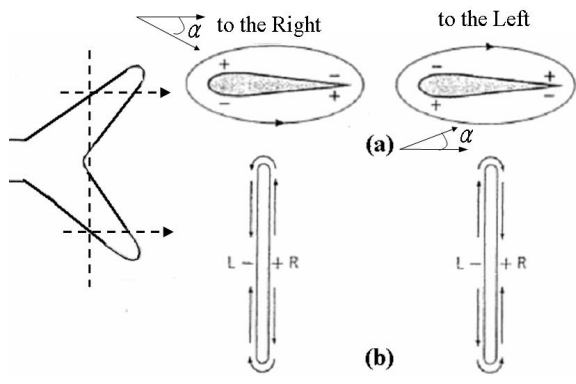
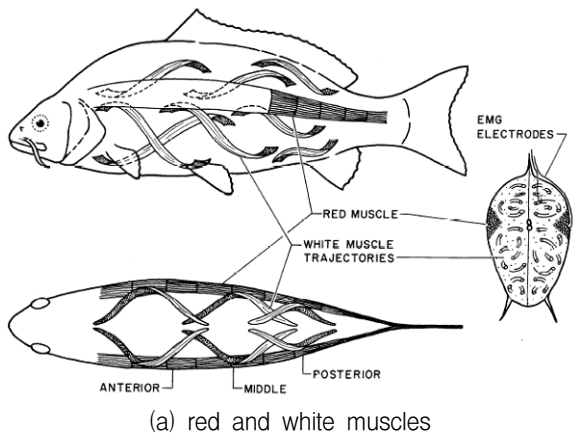


[그림 7] 수중동물의 크기와 헤엄침 속도 관계^[13]

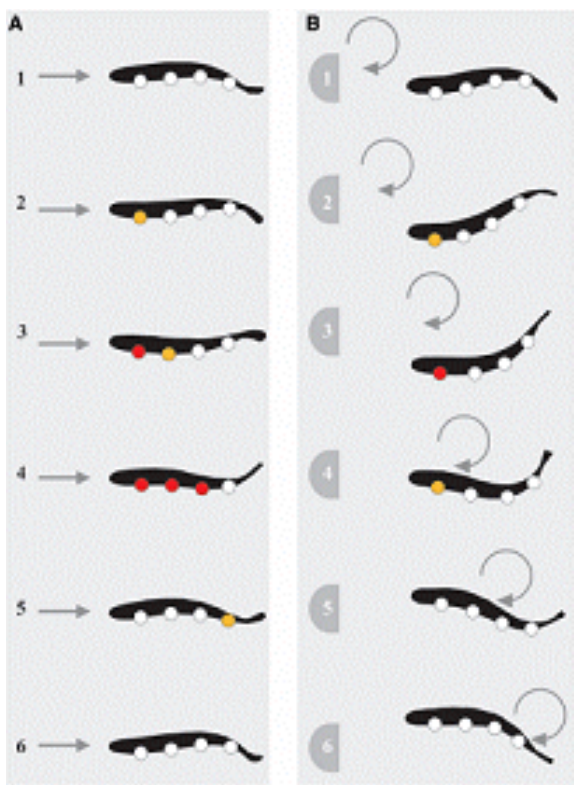
치(marlin) 등과 같은 순항속도와 순항거리가 매우 큰 물고기는 매우 잘록한 꼬리지느러미와 초생달형(crescent or lunate) 꼬리지느러미를 갖고 있음을 관찰할 수가 있다. 매우 잘록한 꼬리 자루는 꼬리 부분 운동의 유연성을 크게 하는 요소이고, 초생달형 꼬리지느러미 형태는 유도항력을 작게 하는 요소이다.

나. 추진력 발생 메커니즘과 추진 에너지 발생의 생리학

근육섬유의 기하학적 형상은 섬유의 유형에 따라 다르다. 그림 8(a)에 나타난 바와 같이 적색근육은 섬유들이 몸통 중심선으로부터 큰 각으로 몸통 안을 들어가던 나가던 나선형을 하고 있다. 적색근육은 수평 septa와 피부의 접촉부분에 종 방향의 띠의 형태로 배열되어 있다. 따라서 적색근육섬유들은 중심선에 대하여 매우 작은 각을 이루고 있다. 적색근육은 ATP를 얻기 위해 높은 효율의 oxidative phosphorylation pathway를 사용한다(적색근육은 적색근육에 많이 있는 혈관 내에 헤모글로빈을 높은 비율로 가지고 있고 mitochondrial membranes내에 myoglobin을 가지고 있어서 적색이다). 반면에 백색근육은 효율이 떨어지는 glycolytic pathway를 사용하며 oxidative phosphorylation path는 빠른 twitch를 생성 하는데 비하여 glycolytic pathway는 fast twitch를 만들어 낸다. 즉 적색근육은 천천히 안정적으로 헤엄치는데 사용되고 백색근육은 급격한 출발이나 약탈자로부터 도망치는데 사용된다. 그림 8(b)의 좌측그림(A)은 자



[그림 9] Mackerel의 tail fin의 좌우 운동에 따른 bound and tip vortex 발달



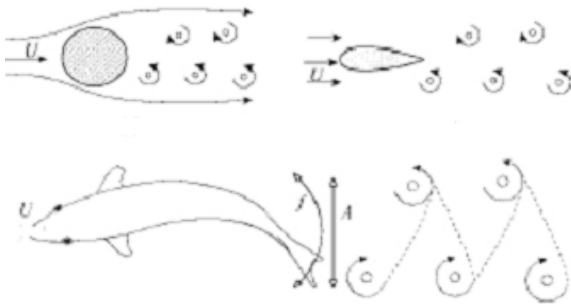
(b) muscle activities
[그림 8] 물고기의 근육섬유 및 근육 활성^[29]

유 흐름 내에서 이동하는 물고기의 muscle activity를 나타낸 그림이며 그림 8(b)의 우측그림(B)은 는 반원 실린더에서 발생하는 von Karman 와열을 헤엄쳐나가는 물고기의 muscle activity를 나타낸 그림이다.

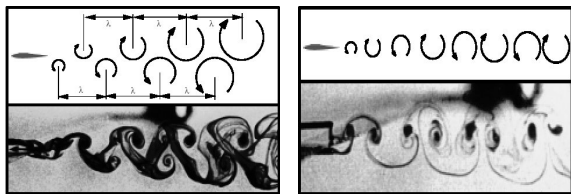
Karman와열을 헤엄쳐나갈 때 anterior근육을 독립적으로 사용하는 것이 관찰된다.

그림 9에 Mackerel tail fin의 fanning 운동에 따른 속박 와(bound vortex)와 익단 와(tip vortex)의 발달에 관한 그림을 나타내었다. 그림 9(a)에 나타낸 바와 같이 tail fin의 단면은 airfoil형상을 하고 있다. 유입되는 유동의 속도 및 받음각은 tail blade의 헤엄침 속도와 가속도 횡방향의 속도의 함수로 나타나며, 유동이 tail fin에 대하여 경사진 각으로 들어와서 fin의 leading edge에서 정체가 된 이후 leading edge를 바로 지나자마자 에어포일의 한 면에 정의 부호의 압력을 행사하며 결과적으로 반대편 면의 trailing edge에서 정체압력이 발생시킨다. 따라서 임의의 각에서 압력을 감소시키기 위하여 유동은 회전을 일으키게 되며 이로 인해 trailing edge에서 Kutta조건을 만족하게 된다. 그림 9(b)에서 tail fin이 우측으로 움직일 때 반시계 방향으로 그리고 tail fin이 좌측으로 움직일 때 시계 방향으로의 속박 와(순환)이 발생하며 tail fin이 방향을 바꿀 때 마다 속박와가 fin의 익단에서 떨어져 나가 익단 와류를 생성하게 된다.

그림 10은 tail fin에서 하류로 떨어져 나가는 후류를 2차원으로 나타낸 그림이다. 그림 10(a)에 나타낸 바와 같이 흐르는 유동 속에 실린더나 에어포일이 놓여 있는 경우 실린더나 에어포일로부터 하류로 떨어져 나가는 와류는 그림 10(b)에 나타낸 것과 같은 von Karman와열이 발생한다. 에어포일이나 물고기의 tail fin을 임계 Strouhal수로 진동시키면 그림

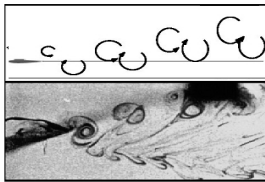


(a) von Karman and reverse von Karman 와열



(b) drag producing

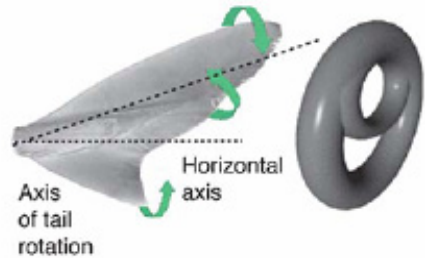
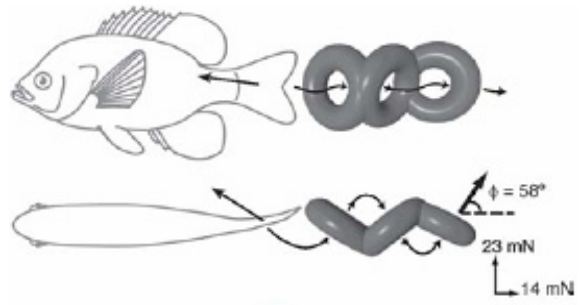
(c) zero drag or thrust



(d) thrust producing

[그림 10] Mackerel의 tail fin에서 하류로 떨어져 나가는 와류의 형상과 유체력 발생의 관계^[30]

10(c)에서와 같은 형상의 후류가 발생하며 이때의 항력이나 추력은 0이다. 임계주파수 이상으로 진동시키면 그림 10(d)와 같은 형태의 후류가 발생을 한다. 그림 10(b)~(d)에 나타난 버섯구름 모양의 후류가 상류방향을 가리키면 에어포일에서 항력이 발생하고 상방이나 하방을 가리키면 항력이나 추력이 0인 중립 상태이고 하류방향을 가리키면 추력이 발생한다는 점이다. 이로부터 버섯구름 모양의 후류형태만으로 항력이 발생할지 추력이 발생할지 여부를 판단할 수 있다. Jones등은 그림 10(d)에 나타난 후류를 발생시키는 에어포일과 같은 Strouhal수로 실린더를 진동시킨 뒤 에어포일과 실린더 하류에서의 속도분포를 측정하였다. 측정한 결과 에어포일에서는 추력이 발생을 하였으나 실린더에서는 항력이 발생을 하였다. 이로부터



[그림 11] Vortex ring shedding by fanning motion of tail fins^[20]

터 von Karman와열에서 역 von Karman와열로 바뀌는 기구는 에어포일의 trailing edge의 형상이 뾰족하기 때문에 이로부터 유동의 불안정성이 발생을 하고 이 불안정성이 와류 말림(wake roll-up)의 방향을 바꾸는 것이라고 추론하였다.

그림 11에 나타낸 바와 같이 tail fin의 fanning 운동에 의하여 물고기 tail fin에서 와류 고리(vortex ring)형태의 후류가 발생하여 하류로 떨어져 나간다. 이때 와류 고리를 이루는 평면에 수직한 방향이 fanning 운동의 반주기 마다 반대 부호의 값으로 바뀌게 된다. 또한 tail fin의 형상이 상하 대칭인 경우에는 원형의 와류 고리가 발생하나 비대칭인 경우에는 경우에 따라서 큰 와류 고리와 작은 와류 고리로 구성된 이중 와류 고리가 발생한다.

5. 로봇 물고기(robot fish) 연구의 동향 및 응용

자율무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle ; 이하 AUV)과 물고기 모사 로봇(Fish-Mimetic Robot 이하 FMR)은 프로펠러로 구동되는 수중 탐사정에 비하여 높은 추진 효율로 빠르게 움직이는 것이

가능하고, 광범위한 지역에 대한 해저 생태계의 관찰, 스텔스 성능이 우수하여 1995년 MIT의 “Charlie I (Robotuna I)” 개발이후 10년간의 짧은 역사 동안 많은 연구들이 이루어져 왔다. MIT에서는 좀더 효율적이고 조용한 수중운행체 개발에 연구의 초점을 두고 Robotuna I(1995) 및 II(2000)을 개발하였다. 일본의 National Marine Research Institute에서는 기동, 수영성능 및 modular robotics를 포함하는 다양한 연구를 수행하였으며 PPF 시리즈로 불리는 로봇 모델을 개발해 왔다.

일본의 Mitsubishi Heavy Industries는 2001년에 Coelacanth라고 불리는 멸종된 물고기를 모사한 로봇을 제작하였다. 무게가 40kg이며 길이는 120cm인 거대한 금속물고기이다. 로봇물고기는 동일한 양의 배터리 구동력만 있으면 잠수함보다 더 멀리 수영할 수 있으므로 인공물고기로 오염원을 찾거나 지도를 만들어 내기 위해 거대한 지역의 바다를 수색 할 수 있으며, 매복과 탐색, 자폭 등 군사용으로든 운용이 가능하다. 또한 로봇 물고기들을 개발하여 가상 수족관을 채울 수 있으며, 소형 물고기는 매우 긴요하게 쓰일 수 있는 로봇 플랫폼이 될 수 있다^[31].

영국의 University of Essex 연구팀은 3년에 걸쳐 리모컨으로 조정되는 기존 물고기 로봇과 달리 센서가 장착돼 수족관 안에서 스스로 사물을 피해가면서 헤엄칠 수 있는 로봇을 개발하여 송유관의 기름유출 파악, 스파이로봇의 용도로 활용할 계획이다. 이 로봇은 50cm 길이에 밝은 비늘로 덮여 있고 초속 50cm의 속도까지 헤엄칠 수 있다.

로봇 기술의 발전과 함께 다양한 종류의 로봇기술 응용 제품도 개발되었다. 대표적인 것으로는 영국의 BBC 방송국의 다큐멘터리를 통해 소개되어 더욱 유명해진 로보샤크(Roboshark, <http://www.roboshark.info/>)로 버밍엄 근처에 위치한 수족관에 전시되어 2006년부터 관광객들에게 개방되어 있다. 로보샤크는 상어의 행태를 관찰을 위해 설계되었으며, 머리 부분에 카메라를 장착하고 실제 상어 떼 사이를 유영하면서 지구상의 물고기 가운데 가장 크기가 크다는 고래상어 떼의 모습을 물속에서 찍어 왔다. 현재 이 로봇상어는 플라이마우스의 국립 수족관에 수용되어 있다. 로보샤크의 몸체 길이는 약 2미터 가량이며, 몸무

게는 35킬로그램이다. 헤엄치는 패턴과 속도, 깊이, 방향을 조종하는 전자뇌와 센서가 달려 있다. 수영 속도는 실제 상어와 비슷한 4.8km/h 정도이다^[32].

일본의 산업기술종합연구소 등이 개발한 ‘고분자 액추에이터(구동체) 소자’의 실용화를 추진하고 있는 벤처기업인 이맥스(大阪府 池田市)는 고분자 액추에이터를 꼬리 부분의 인공 근육으로 사용하는 물고기 로봇을 개발했다. 이맥스는 수조 등을 셋트로 한 인공 관상어 시스템으로서 완구 메이커 등을 통해 상품화를 꾀하고 있다. 고분자 액추에이터는 겔 상 이온 교환수지를 전극으로 사이에 끼운 것으로, 전압을 걸면 겔 내부의 이온과 물이 한쪽으로 쏠려 체적 변화에 의한 굽힘 변위가 생기도록 한 구조를 하고 있다. 이 회사는 고분자 액추에이터 기술 분야에서 세계 선두를 달리고 있다. 고분자 액추에이터는 재료 그 자체가 굽기 때문에, 작은 것에도 탑재될 수 있고, 움직임이 생물과 같이 매끄러운 것이 특징이다. 동력은 물고기의 체내에 있는 전자 코일을 향해 수조로부터 전자 유도로 주어진다. 자체의 랜덤 설계와, 상하로 움직이는 수조의 물로 예측하기 어려운 움직임이 실현됐다^[33].

로봇 물고기를 실제 물고기와 유사한 기동성 및 성능을 가지도록 만들기 위해서는, 먼저 물고기의 몸체와 지느러미의 실험 생물학적 연구에 바탕을 둔 물고기 움직임의 복잡적이고 연속적인 변화와 유체력 사이의 상관관계를 정확히 이해해야 한다. 다음으로 유체역학적 연구결과를 바탕으로 최적의 효율이나 기동성을 획득할 수 있는 체계적인 연구와 데이터베이스 구축을 통한 data mining 등의 최적화 연구가 필요하다. 아울러 물고기를 구성하는 근육이나 뼈 등을 모사할 수 있는 재료의 개발과 활용기술, 비선형 제어기술 개발 연구 등 다양한 학문분야의 복합적 연구가 절실히 필요한 실정이다

6. 결론

물에서 생활하는 동물의 헤엄침에 대한 기본적인 원리와 연구방향을 제시하기 위하여 수중동물의 헤엄침에 대한 연구동향, 몸체와 지느러미의 형태 특성,

헤엄침 형태의 종류, 운동 형태와 해석 방법을 소개 하였다. 새와 곤충의 비행과 마찬가지로 물고기의 헤엄침도 인간이 만든 수중 운행체와는 비교가 되지 않는 효율성과 우수한 운동성능을 갖고 있다. 따라서 이들 모양과 운동양식의 원리를 탐색하고 적용하는 연구는 수중 운행체의 성능개선이나 더 나아가 전혀 새로운 수중 운행체의 설계에 활용할 수 있는 유익한 결과를 제시할 것이다. 국내의 풍부한 재료 및 센서 기술 분야, 유체역학 분야와 생물학 분야 등의 연구 인력 간에 다학제적인 협력을 통하여 자연계의 헤엄침에 대한 연구가 국내에서도 활발히 진행되기를 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] Fish, F. E. and Lauder, G. V., "Passive and Active Flow Control by Swimming Fishes and Mammals", *Annual Review of Fluids Mechanics*, Vol. 38, pp. 193~224, 2006.
- [2] Triantafyllou, M. S., Barrett, D. S., Yue, D. K. P., Anderson, J. M., and Grosenbaugh, M. A. et al., "A New Paradigm of Propulsion and Maneuvering for Marine Vehicles", *Transactions of Society for Naval Architects Marine Engineering*, Vol. 104, pp. 81~100, 1996.
- [3] Bandyopadhyay, P. R., "Trends in Bio-robotic Autonomous Undersea Vehicles", *IEEE J. of Oceanic Engineering*, Vol. 30, No. 1, pp. 109~139, 2005.
- [4] Bar-Cohen, Y., "Biomimetics ; Biologically Inspired Technologies", CRC Press, 2006.
- [5] Alexander, R. M., "Animal Mechanics", Sidgwick and Jackson, London, pp. 1~21, 1971.
- [6] Gray, J., "The Propulsive Powers of the Dolphin ; Studies in Animal Locomotion VI", *J. of Experimental Biology*, Vol. 13, pp. 192~199, 1936.
- [7] Lighthill, M. J., "Note on the Swimming of Slender Fish", *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 9, pp. 305~317, 1960.
- [8] Lighthill, M. J., "Hydromechanics of Aquatic Animal Propulsion", *Annual Review of Fluids Mechanics*, Vol. 1, pp. 413~445, 1969.
- [9] Hussaini, M. Y., "Collected Papers of Sir James Lighthill", Oxford University Press, 1997.
- [10] Wu, T. Y., Brokaw, C. J. and Brennen, C. (eds), "Swimming and Flying in Nature", Vol. 1 and Vol. 2, Plenum Press, New York, 1975.
- [11] Chopra, M. G., "Hydromechanics of Lunate-tail Swimming Propulsion", *J. of Fluids Mechanics*, Vol. 64, Part 2, pp. 375~391, 1974.
- [12] Chopra, M. G. and Kambe, T., "Hydromechanics of Lunate-tail Swimming Propulsion. Part 2", *J. of Fluids Mechanics*, Vol. 79, Part 1, pp. 49~69, 1977.
- [13] Azuma, A., "The Biokinetics of Flying and Swimming", 2nd ed., AIAA Education Series, 2006.
- [14] Triantafyllou, M. S. Triantafyllou, G. S. and Yue D. K., "Hydrodynamics of Fishlike Swimming", *Annual Review of Fluids Mechanics*, Vol. 32, pp. 33~53, 2000.
- [15] Stamhuis, E. and Videler, J., "Quantitative Flow Analysis Around Aquatic Animals Using Laser Sheet Particle Image Velocimetry", *J. of Experimental Biology*, Vol. 198, pp. 283~294, 1995.
- [16] Anderson, J. M. Streitlien, K., Barrett, D. S. and Triantafyllou, M. S., "Oscillating Foils of High Propulsive Efficiency", *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 360, pp. 41~72, 1998.
- [17] Triantafyllou, G. S., Triantafyllou, M. S. and Grosenbaugh, M. A., "Optimal Thrust Development in Oscillating Foils with Application to Fish Propulsion", *J. of Fluids and Structure*, Vol. 7, pp. 205~224, 1993.

- [18] Muller, U., van den Heuvel, B., Stamhuis, E. and Videler, J., "Fish Foot Prints : Morphology and Energetics of the Wake Behind a Continuously Swimming Mullet(Chelon Labrosus Risso)", *J. of Experimental Biology*, Vol. 200, pp. 2893~2896, 1997.
- [19] Wolfgang, M. Anderson, J. M., Grosenbaugh, M. A., Yue, D. K. P. and Triantafyllou, M. S., "Near-body Flow Dynamics in Swimming Fish", *J. of Experimental Biology*, Vol. 202, pp. 2303~2327, 1999.
- [20] Drucker E. G. and Lauder, G. V., "Locomotor Forces on a Swimming Fish ; Three-dimensional Vortex Wake Dynamics Quantified Using Particle Image Velocimetry", *J. of Experimental Biology*, Vol. 202, pp. 2393~2412, 1999.
- [21] 홍석원, "한국의 수중로봇 기술동향," 한국수중로봇기술연구회 2007년 춘계 Workshop, 창원컨벤션센터, pp. 5~8, May 2007.
- [22] 최해천의 연구(private communication).
- [23] 한철희, 이학진, 조진수, "Numerical Study of Biomimetic Foil Propulsion", 대한기계학회논문집 B권, Vol. 30, No. 9, pp. 866~872, 2006.
- [24] 한철희, 이승희, 신창록, 박종현, "생체모사 물고기 로봇을 이용한 물고기 운동의 유체역학적 해석", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 자연모사공학 특별세션, June 2007.
- [25] Han, C., Lee, S. H. and Park, J. H., "Investigation of an Optimal Motion Pattern for a Robotic Fish", The World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, Chongqing & Nanjing, China, May 2007.
- [26] Jung, J. H., Kim, B. K., Tak, Y. H., Park, J. O., "Undulatory Tadpole Robot(TadRob) Using Ionic Polymer Metal Composite(IPMC) Actuator", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3, No. 27, pp. 2133~2138, 2003.
- [27] Wiguna, T., Park, H. C., Yoon, K. J. and Heo, S., "Mechanical Design of Biomimetic Fish Robot Using LIPCA as Artificial Muscle", SPIE's 13th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, USA, March 2006.
- [28] 손명환, "Flying and Swimming in Nature(2) ; Swimming of Aquatic Animals", 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 35~40, 2007.
- [29] Liao, J. c., Beal, D., N., Lauder, G. V. and Triantafyllou, M. S., "Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity", *Science*, Vol. 302, pp. 1566~1568, 2003.
- [30] Jones, K. D. and Platzer, M. F., "Flapping Wing Propulsion for Micro Aerial Vehicle", AIAA-2000-0897.
- [31] 물고기 로봇 개발, KISTI 글로벌동향브리핑 (GTB), 2005년 6월 30일.
- [32] <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/4117355.stm>
- [33] 헤엄치는 로봇을 꿈꾸다-로봇 물고기, KISTI 과학향기, 제337호, 2005년 9월 5일.