

탄성 조인트로 연결된 이중 꼬리 지느러미 오스트라키폼 물고기 로봇의 추진력 해석 및 조인트 위치가 추력에 미치는 영향

Analysis on the Propulsion Force of an Ostraciiform Fish Robot with Elastically Jointed Double Caudal Fins and Effect of Joint Position on the Propulsion Force

강 이 삭¹

Isaac Kang¹

Abstract A simplified linearized dynamic equation for the propulsion force generation of an Ostraciiform fish robot with elastically jointed double caudal fins is derived in this paper. The caudal fin is divided into two segments and connected using an elastic joint. The second part of the caudal fin is actuated passively via the elastic joint connection by the actuation of the first part of it. It is demonstrated that the derived equation can be utilized for the design of effective caudal fins because the equation is given as an explicit form with several physical parameters. A simple Ostraciiform fish robot was designed and fabricated using a microprocessor, a servo motor, and acrylic plastics. Through the experiment with the fish robot, it is demonstrated that the propulsion force generated in the experiment matches well with the proposed equation, and the propulsion speed can be greatly improved using the elastically jointed double fins, improving the average speed more than 80%. Through numerical simulation and frequency domain analysis of the derived dynamic equations, it is concluded that the main reason of the performance improvement is resonance between two parts of the caudal fins.

Keywords: Fish Robot, Ostraciiform Swimming, Elastically Jointed Caudal Fins, Propulsion Force Improvement, Fish Propulsion

1. 서론

물고기는 물 속에서 매우 효율적인 수영과 조용하고 빠른 기동을 할 수 있다^[4]. 따라서, 군사적 감시활동, 해저탐사^[5], 수중환경 감시, 생태학적 연구 등의 수중 임무 수행을 위한 차세대 수중 운행체^[6]를 개발하기 위한 방편으로 물고기 모방 로봇을 개발하기 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 1994년에 개발된 MIT의 RobotTuna^[7]를 시작으로 많은 물고기 모방 로봇들이 개발되었다. RobotTuna의 뒤를 이어 RoboPike^[8]가 개발되었으며, 물고기에서의 저항 감소 현상을 연구하는데 사용되었다.

이러 개선된 성능의 VCUUV (Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle)가 MIT의 Draper Lab에서 개발되었는데, 소용돌이(vorticity) 제어를 이용한 추진 및 기동을 할 수 있는 최초의 미션스케일(mission scale) 자율 수중 운행체라고 할 수 있다^[9,10]. 이 외에도 California Institute of Technology^[11], University of California San Diego 및 Northeastern University^[12], University of California Berkley^[13], Essex University^[14], Tokai University 및 National Maritime Research Institute (NMRI)^[15], Peking University^[16], 서울대학교^[29], 건국대학교^[17,22], 충주대학교^[18], Institute Technology Bandung^[19], 울산대학교^[28] 등에서 물고기 로봇 관련 연구들이 이루어지고 있다.

Received : Apr. 26. 2011; Reviewed : Jun. 3. 2011; Accepted : Aug. 16. 2011

¹ 서울과학기술대학교

Breder^[20]의 분류에 따르면, 물고기의 기동은 몸체 및 꼬리지느러미를 이용하는 BCF(Body and/or Caudal Fin) 기동, 중앙 및 양 옆의 지느러미를 이용하는 MPF(Median and Paired Fin) 기동으로 나눌 수 있다. BCF 기동은 가속 및 정속 유영에 유리하며, MPF 기동은 자세를 변환하는 기동시 유리한 것으로 알려져 있다. 오스트라키포(Ostraciiform) 유영 모드는 BCF 형태 중 가장 방향기동에 유리하며, 기동 및 정속 유영을 하는데 적합한 것으로 알려져 있다^[31,32]. 추진력은 꼬리지느러미를 좌우로 플랩핑(flapping)시킴으로써 얻는다. 또한 꼬리지느러미의 플랩핑 중심 방향을 바꿈으로써 방향전환 기동을 한다. 따라서, 오스트라키포 물고기 로봇은 꼬리지느러미의 플랩핑 및 플랩핑 축 방향만 제어하면 되므로 물고기 모방 로봇이나 수중 운행체를 구현하기가 매우 유리하다는 장점이 있다. 다양한 종류의 구동기(actuator)^[21-23]들이 물고기 모방 로봇의 유영 기동을 위해서 사용되었으며, 구동기에 따라 구동 방법을 달리하는 연구들이 진행되었다. 판 형태의 플레핑하는 꼬리지느러미를 이용할 경우 70% 정도의 효율이 보고된바 있다^[24].

꼬리지느러미 형태에 따른 추진 효율성 분석은 물고기 로봇 연구에 있어서 중요한 요소이다. 플레핑하는 동안 꼬리지느러미 주위의 물은 가속이 되고, Karman Vortex Street^[24]를 형성하며, 이것이 물고기 로봇을 추진시킨다. 지느러미가 추진력을 발생시키기 위해 플레핑을 할 때, 꼬리 지느러미 및 물의 운동에 의한 관성력(inertial force)은 스트로크(stroke)에 따라 수시로 방향을 바꾸게 된다. 특히, 꼬리지느러미와 물을 감속시킬 때에는 꼬리지느러미가 힘을 가하는 방향과 이것이 이동하는 방향이 서로 반대인 음의 일을 하는 구간이 발생하는데, 이때에 탄성체 등을 이용하여 에너지를 흡수했다가 꼬리지느러미가 추진을 발생시킬 때 그 저장된 에너지를 쓸 수 있도록 활용하면 추진에 필요한 에너지를 절약할 수 있음이 알려져 있다^[25-27]. 특히 Motomu Nakashima 외^[27]는 조인트가 2개 있는 물고기 로봇의 간략화된 운동 방정식을 제시하였고, Tuong Quan Vo 외^[28]는 조인트가 3개 있는 경우의 간략화된 운동 방정식을 제시하였다. 그러나 이 결과들은 추진력 발생이 꼬리지느러미의 마지막 단에서만 이루어진다고 가정하고 있다. 또한 꼬리지느러미 전체를 유연한 것으로 사용하는 것에 대한 연구들이 Yong-Jai Park 외^[29]와 Pablo 외^[30]

등에 의해 제시되었다. 유연한 꼬리는 자연 물고기에 가장 유사하고 추진 성능도 우수하나 추력에 대한 식이 폐쇄형(closed form)으로 주어지지 않기 때문에, 꼬리지느러미의 운동과 추진력 사이의 관계로부터 해석적으로 각 패러미터들이 어떤 값을 가져야 하는지 추측하기가 매우 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 탄성 조인트로 연결된 두 개의 꼬리 지느러미 모두에서 추진력이 발생하는 경우에 있어서 꼬리지느러미의 운동과 발생하는 추진력 사이의 관계식을 폐쇄형 해의 형태로 유도하였고, 이를 이용하여 정해진 크기의 꼬리지느러미를 둘로 나누어 탄성조인트로 연결할 경우 두 꼬리지느러미의 크기의 비가 발생 추진력에 미치는 영향을 해석하였고, 실험을 통하여 검증하였다. 본 연구에서 유도된 식은 비교적 간략하고 폐쇄된 형태의 해를 보여주기 때문에, 설계자들이 선형시스템의 주파수 응답 특성, 공진특성을 해석하는 것과 같은 방법으로 추진 시스템을 해석할 수 있게 하여서, 수학적인 복잡함을 피하면서 꼬리지느러미의 유연성과 추진에 대한 보다 깊은 이해를 직관적으로 할 수 있게 해주고 따라서 성능 개선을 위한 설계에 도움을 준다는 장점이 있다. 또한 본 논문에서 제시된 방식으로 조인트를 몇 개만 더 추가하고 발전시키면, 해석이 용이하면서도 유연체의 성능을 가지는 꼬리 지느러미 구조를 설계할 수 있게 할 것으로 기대된다.

2. 탄성체로 연결된 이중 꼬리지느러미 구조 및 운동 방정식

그림 1은 이중 꼬리 지느러미의 간략한 구조 및 원리를 보여 주고 있다. 여기서 (a)는 실제 물고기가 수영할 때의 꼬리의 모양을 보여주고 있으며, (b)는 단일 강체 꼬리지느러미를 이용했을 때의 관성력 및 저항에 의한 힘의 성분 분포를, (c)는 탄성체를 이용한 이중 꼬리지느러미를 사용했을 때의 힘의 분포를 보여주고 있다.

그림 1을 보면 추진 방향 힘 성분의 합은 일체형 꼬리지느러미를 사용한 경우보다 탄성 조인트로 연결된 이중 꼬리 지느러미를 사용한 경우가 크게 나타날 것을 예측할 수 있다. 특히 두개의 꼬리지느러미가 공진점 부근에서 운동한다면, 작은 θ_2 의 플랩핑으로도 θ_1 의 플랩핑을 크게 할 수 있으므로 추진 성능이 개선될 것을 예측할 수 있다.

꼬리지느러미의 플레핑에 따른 물고기 로봇의 추진력

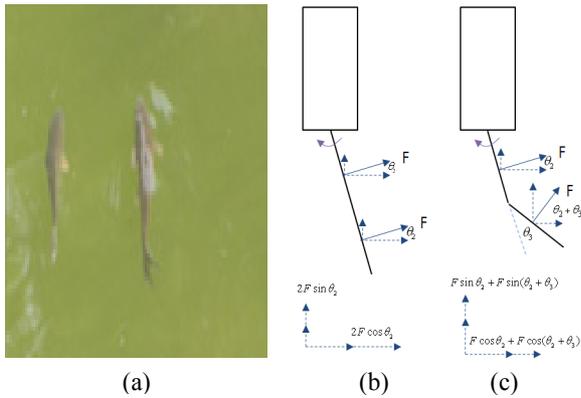


그림 1. 물고기의 꼬리지느러미의 운동: (a)물고기의 수영 모습, (b) 단일꼬리지느러미의 추력 구성, (c)탄성조인트로 연결된 이중 꼬리지느러미의 추력 구성

을 구하기 위해서는 먼저 플래핑에 의하여 각 꼬리 지느러미에서 발생하는 힘들을 구해야 한다. 그림 2와 같은 지느러미형 추진에 있어서, 다음과 같이 정현파 입력이 가해진다고 하자:

$$\theta_2(t) = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

$|\theta_2(t)| \ll 1$ [rad] 라 가정할 때, $\theta_2(t)$ 의 운동에 의한 링크 2의 중심의 속도 $v_2(t)$ 는 다음과 같이 근사화 할 수 있다

$$v_2(t) = a_2 \dot{\theta}_2(t) \quad (2)$$

여기서 a_2 는 조인트 1로부터 링크 2의 질량 중심까지의 거리이다. 이때, 링크 2의 중심에 가해지는 힘은 양력에 의한 힘(F_{J2})과, 관성가속에 의한 힘(F_{V2})으로 주어지며,

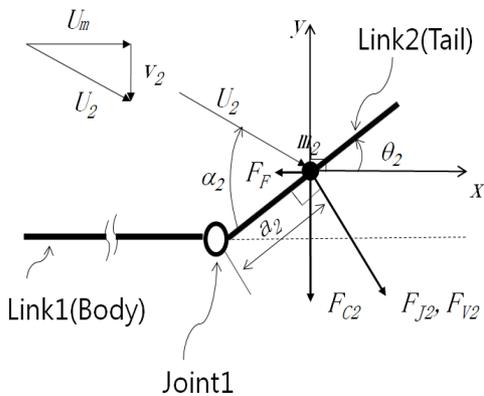


그림 2. 꼬리지느러미의 운동에 따른 힘의 분포

각각, 식(3)과 (4)으로 근사화 된다^[27,28].

$$F_{J2} \approx 2\pi\rho LC_2 U_2^2 \sin(\alpha_2) \cos(\alpha_2) \approx 2\pi\rho LC_2 (v_2 \cos \theta_2 + U_m \sin \theta_2) \times (-v_2 \sin \theta_2 + U_m \cos \theta_2) \quad (3)$$

$$F_{V2} \approx -\rho\pi LC_2^2 \left(\frac{d}{dt} (U_m \sin \theta_2 - v_2) \right) \quad (4)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도이고, L 은 꼬리지느러미의 세로 길이, $2C_2$ 는 꼬리 지느러미의 가로 길이 즉 링크 2의 코드 길이, U_2 는 꼬리지느러미 링크 2 부근에서의 유체의 순간 상대 속도, U_m 은 꼬리지느러미 앞쪽에서 평균적으로 흐르는 유체의 상대속도이고, α_2 는 꼬리 지느러미가 순간적으로 받는 받음각이고, θ_2 는 꼬리지느러미 링크 2가 수평에 대하여 윗쪽으로 움직인 각도를 나타낸다.

이제 그림 3과 같이 탄성 조인트로 꼬리 지느러미 1개(링크 3)가 추가로 연결된 이중 꼬리지느러미를 고려하자.

여기에서 입력 θ_2 와 이때 발생하는 추진력 F_F 사이의 관계식을 유도하고자 한다. θ_3 는 자체 모터가 없고 θ_2 의 움직임에 의하여 수동적으로 움직이므로 먼저 θ_2 와 θ_3 사이의 전달함수를 구하고, 다음으로 θ_3 의 운동에 의해 링크 3에서 발생하는 힘을 구한 후, 마지막으로 앞에서 구한 꼬리지느러미 앞부분(링크 2)의 운동에 의해 발생된 힘과 조합하면, 입력 θ_2 와 이때 발생하는 추진력 F_F 사이의 관계식을 구할 수 있다.

먼저, θ_2 와 θ_3 가 1 [rad]에 비해 충분히 작게 유지될 때, θ_3 는 θ_2 의 함수로 다음과 같이 주어짐을 유도할 수 있다.

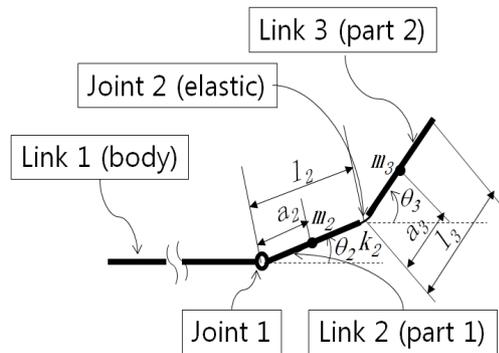


그림 3 탄성 조인트로 연결된 이중 꼬리지느러미 구조

$$T(s) = \frac{-(m_3 a_3 l_2 + \rho \pi L C_3^2 l_2 a_3) s^2 - (-c_2 + 2\pi \rho L C_3 U_m l_2 a_3) s + k_2}{\left((I_3 + m_3 a_3^2 + \rho \pi L C_3^2 a_3^2) s^2 + (c_2 + \pi \rho L C_3 U_m (2a_3 - C_3) a_3) s + (k_2 + 2\pi \rho L C_3 U_m^2 a_3) \right)} \quad (5)$$

여기에서 a_3 는 조인트 2로부터 링크 3의 질량 중심까지의 거리이며, $2C_3 (\triangleq l_3)$ 는 둘째 꼬리지느러미의 코드 길이이고, k_2 는 탄성 조인트의 탄성계수이며, I_3 는 링크 3의 관성 모멘트이고 m_3 는 링크 3의 질량이며, c_2 는 링크 2와 링크 3 사이에 생기는 댐핑을 나타낸다.

식(5)의 유도 과정은 다음과 같다. 즉, θ_3 의 크기도 작다고 가정할 때, 링크 3의 질량 중심에 가해지는 힘 F_{J_3} , F_{V_3} 은 식(2)-(4)를 이용하면 다음과 같이 근사화된다.

$$F_{J_3} \approx 2\pi \rho L C_3 (v_3 \cos \theta_3 + U_m \sin \theta_3) \times (-v_3 \sin \theta_3 + U_m \cos \theta_3) \quad (6)$$

$$F_{V_3} \approx -\rho \pi L C_3^2 \left(\frac{d}{dt} (U_m \sin \theta_3 - v_3) \right) \quad (7)$$

$$v_3 \approx l_2 \dot{\theta}_2 + a_3 \dot{\theta}_3 \quad (8)$$

이때, 링크 3에에서 θ_2 와 θ_3 사이의 운동 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & m_3 a_3 l_2 \cos(\theta_3 - \theta_2) \ddot{\theta}_2 + (I_3 + m_3 a_3^2) \ddot{\theta}_3 \\ & + m_3 a_3 l_2 \sin(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_2)^2 \\ & + c_2 (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) + k_2 (\theta_3 - \theta_2) \\ & = -(F_{V_3} + F_{J_3}) a_3 \\ & = -a_3 \left(\begin{aligned} & \rho \pi L C_3^2 \left(\frac{d}{dt} (v_3 - U_m \sin \theta_3) \right) \\ & + 2\pi \rho L C_3 (v_3 \cos \theta_3 + U_m \sin \theta_3) \\ & \times (-v_3 \sin \theta_3 + U_m \cos \theta_3) \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 링크 3에서 θ_2 와 θ_3 사이의 운동 방정식은 θ_2 , θ_3 의 크기가 작다고 가정할 때, 다음과 같은 선형미분방정식으로 근사화 할 수 있으며, 이로부터 식(5)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} & (I_3 + m_3 a_3^2 + \rho \pi L C_3^2 a_3^2) \ddot{\theta}_3 \\ & + (c_2 + \pi \rho L C_3 U_m (2a_3 - C_3) a_3) \dot{\theta}_3 \\ & + (k_2 + 2\pi \rho L C_3 U_m^2 a_3) \theta_3 \\ & = -(m_3 a_3 l_2 + \rho \pi L C_3^2 l_2 a_3) \ddot{\theta}_2 - (-c_2 + 2\pi \rho L C_3 U_m l_2 a_3) \dot{\theta}_2 \\ & + k_2 \theta_2 \end{aligned} \quad (10)$$

이때 우리가 구하고자 하는 추력 F_F 는 링크 2와 링크 3으로 이루어지는 꼬리지느러미의 운동에 의하여 다음과 같이 근사화된다.

$$\begin{aligned} F_F & = -(F_{J_2} + F_{V_2}) \sin \theta_2 - (F_{J_3} + F_{V_3}) \sin \theta_3 \\ & \approx -\rho \pi L (C_2^2 a_2 \ddot{\theta}_2 + C_2 U_m (2a_2 - C_2) \dot{\theta}_2 + 2C_2 U_m^2 \theta_2) \theta_2 \\ & \quad - \rho \pi L (C_3^2 l_2 \ddot{\theta}_2 + 2C_3 U_m l_2 \dot{\theta}_2) \theta_3 \\ & \quad - \rho \pi L (C_3^2 a_3 \ddot{\theta}_3 + C_3 U_m (2a_3 - C_3) \dot{\theta}_3 + 2C_3 U_m^2 \theta_3) \theta_3 \end{aligned} \quad (11)$$

따라서, 식(1)과 같은 정현파로 구동되고, $\theta_2(t)$, $\theta_3(t)$ 가 작게 유지될 때, 추력은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} F_F & = -\rho \pi L A^2 \left(\begin{aligned} & -\omega^2 C_2^2 a_2 \sin(\omega t) + \omega C_2 U_m (2a_2 - C_2) \cos(\omega t) \\ & + 2C_2 U_m^2 \sin(\omega t) \end{aligned} \right) \sin(\omega t) \\ & \quad - \rho \pi L A^2 \left(\begin{aligned} & -\omega^2 C_3^2 l_2 \sin(\omega t) \\ & + 2\omega C_3 U_m l_2 \cos(\omega t) \end{aligned} \right) |T(j\omega)| \sin(\omega t + \phi) \\ & \quad - \rho \pi L A^2 \left(\begin{aligned} & -\omega^2 C_3^2 a_3 \sin(\omega t + \phi) \\ & + \omega C_3 U_m (2a_3 - C_3) \cos(\omega t + \phi) \\ & + 2C_3 U_m^2 \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \right) |T(j\omega)|^2 \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\phi = \angle T(j\omega)$ 이다. 따라서 평균 추력은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} F_{FA} & = \rho \pi L A^2 \left(\omega^2 C_2^2 a_2 / 2 - C_2 U_m^2 \right) \\ & \quad + \rho \pi L A^2 \left(\begin{aligned} & \omega^2 C_3^2 l_2 \cos(\phi) / 2 \\ & - \omega C_3 U_m l_2 \sin(\phi) \end{aligned} \right) |T(j\omega)| \\ & \quad + \rho \pi L A^2 \left(\omega^2 C_3^2 a_3 / 2 - C_3 U_m^2 \right) |T(j\omega)|^2 \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)과 식(5)는 물고기 로봇의 꼬리지느러미를 설계

하는데 있어서 어떤 방식으로 접근해야 하는지를 쉽게 보여주고 있다. 식(13)에서 첫번째 항은 링크 2 지느러미에 의한 추력을 나타내고, 두번째 항은 링크 2와 링크 3의 지느러미들이 상호작용을 하면서 발생시키는 추력이며, 세번째 항은 링크 3의 지느러미가 발생시키는 추력이다. 첫째항과 셋째항에서 플랩핑 주파수 ω 가 어느 정도 커야 평균 유속 U_m 에 의해 발생하는 역방향 추진력을 이기고 앞으로 전진할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 두번째 항은 $|T(j\omega)|$ 의 크기에 비례하며, 특히 세번째 항은 $|T(j\omega)|$ 의 제곱에 비례하기 때문에 원하는 주파수에서 $|T(j\omega)|$ 가 크도록 설계하면 전체적인 추진력을 크게 할 수 있을 것을 예상할 수 있다.

또한 식(5)에서, 공진주파수는 스프링 상수 k_2 가 커질수록, 평균 유속 U_m 이 빠를수록 커지는 것을 알 수 있고, 따라서 스프링 상수가 큰 경우는 구동을 빠르게 하는 경우에 유리하고, 또한 유속이 빠른 경우에도 구동을 빠르게 해야 더욱 효과적으로 $|T(j\omega)|$ 를 크게 하여, 추력을 높이게 될 것을 예측할 수 있다.

식(5)와 식(13)으로 주어지는 추력식은 여러가지 조건에서 꼬리지느러미의 패러미터를 최적화하는데 사용할 수 있는데, 예를 들어 탄성과 댐핑, 그리고 링크2와 링크 3로 이루어지는 꼬리지느러미의 길이의 합이 일정하다고 할 경우, 어느 위치에 탄성체를 넣어야 추력을 최대한으로 할 수 있는지 예측하는데 사용할 수 있다.

즉, 꼬리지느러미의 질량이 균일하게 분포되어 있다고 가정하고, 꼬리 지느러미의 총 길이 즉 링크 2와 링크 3의 길이의 합은 $2C$ 로 일정할 때,

$$\begin{aligned} l_2 &= 2rC, \\ l_3 &= 2(1-r)C \end{aligned} \tag{14}$$

로 둘 수 있다. 여기서 r 은 l_2, l_3 의 길이의 비를 조절하는 인자로 0과 1사이의 값을 가지며, 클수록 링크2 부분, 즉 꼬리지느러미 앞 부분이 큰 비중을 차지하게 된다. 꼬리지느러미의 모양이 직사각형이고 두께가 일정할 경우 질량 중심은 중앙에 있게 되므로 다음과 같이 둘 수 있다.

$$\begin{aligned} a_2 &= C_2 = l_2/2, \\ a_3 &= C_3 = l_3/2 \end{aligned} \tag{15}$$

이때, 평균 추진력 관련 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있으며, 이 식을 활용하면, r 값을 어떻게 설계하면 추력을 크게 할 수 있는지 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{FA} &= \rho\pi LA^2 rC(\omega^2 r^2 C^2 / 2 - U_m^2) \\ &+ \rho\pi LA^2 \omega r(1-r)C^2 \left(\frac{\omega(1-r)C \cos(\phi)}{-2U_m \sin(\phi)} \right) |T(j\omega)| \\ &+ \rho\pi LA^2 (1-r)C(\omega^2 (1-r)^2 C^2 / 2 - U_m^2) |T(j\omega)|^2 \end{aligned} \tag{16}$$

$$T(s) = \frac{-\left(\frac{(2m_3 r(1-r)C^2 + 2\rho\pi L r(1-r)^3 C^4) s^2}{-(-c_2 + 4\pi\rho L U_m r(1-r)^2 C^3) s + k_2} \right)}{\left(\frac{(I_3 + m_3(1-r)^2 C^2 + \rho\pi L(1-r)^5 C^5) s^2}{+(c_2 + \pi\rho L C_3 U_m (1-r)^2 C^2) s} + (k_2 + 2\pi\rho L(1-r)^2 C^2 U_m^2) \right)} \tag{17}$$

즉, 식(16)에서 셋째 항을 보면 r 이 작을 수록 추력에 미치는 영향이 커지고, 1에 가까울수록 추력에 미치는 영향이 작아짐을 알 수 있다. 이것은 r 이 크면 링크 2가 커지고 링크3는 작아지기 때문이다. 식(17)의 분모를 보면, r 이 작을 수록 댐핑이 커져서 안정화되는 경향을 보이며, 이는 θ_2 가 움직여도 θ_3 가 잘 안 움직이게 하는 역할을 한다. 또한 r 이 커질수록 식(17)의 분모에서 최고 차 항의 크기가 상수 항 보다 더 빨리 줄어들어 공진 주파수가 커질 것을 예측할 수 있다. 또한 같은 r 에 대하여 탄성계수 k_2 가 커지면 예상대로 공진주파수가 커지는 것을 알 수 있다. 즉, k_2 가 커짐에 따라 추진력을 키우기 위해서는 구동 주파수를 올려야 한다.

3. 탄성체로 연결된 이중 꼬리지느러미 물고기 로봇의 제작

탄성체로 연결된 이중 꼬리지느러미에서 꼬리 지느러미의 분할비와 추력간의 관계를 살펴보고 식(5)와 (13)으로 유도된 추력식이 실제 시스템에서도 비슷한 현상을 보이는지 알아보기 위하여 그림 4 및 그림 5와 같이 간단하게 오스트라키펜 추진을 모사할 수 있는 물고기 로봇을 제작하였다. 그림 4는 로봇을 옆에서 본 설계 모

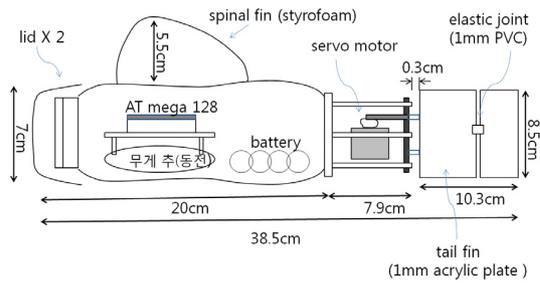


그림 4. 물고기 로봇의 개략도

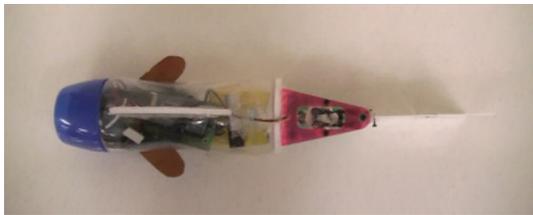


그림 5. 제작된 물고기 로봇의 모습

습이고, 그림 5는 실제로 제작된 물고기 모방 로봇을 위에서 내려다 본 모습이다. 몸체는 방수를 위하여 물병을 활용하였으며, 내부에 ATmega128 마이크로 컨트롤러와 전원을 공급하는 배터리, 물고기 로봇의 비중 및 균형을 조절해주는 무게 추를 두었다. 뚜껑을 열면 전원을 연결하여 충전하거나 마이크로프로세서와 plug-in하여 프로그램 수정이 가능하도록 단자를 배치하였다. 꼬리 자루에는 서보 모터가 장착되어 있고, 꼬리지느러미에 플랩핑 운동을 전달할 수 있도록 연결하였다. 몸체의 총 길이는 실제 물고기와 유사하도록 전체의 3/4정도 되게 하였다. 스티로폼으로 된 등지느러미를 부착하여 주행시 좌우 흔들림이 작게하였고, 중심이 수면 5~7cm 아래에서 평면상으로 자유롭게 움직일 수 있도록 설계하였다. 추진은 서보 모터에 의한 꼬리지느러미 플랩핑 운동에 의해 추진된다. 모형의 총 길이는 38.5cm, 지름은 7cm, 총 중량은 785g이다.

탄성 조인트로 연결된 이중 꼬리지느러미가 추력에 미치는 영향을 간단하게 알아보기 위해서, 강체 재료로 이루어진 꼬리지느러미를 수직으로 2개로 분할하고 분할된 두 조각을 탄성체로 연결하였다. 그리고 첫 번째 조각을 서보모터에 연결하여 구동하였다. 이렇게 하게 되면 탄성체로 연결된 두 번째 조각은 식(5)에 의하여 첫번째 지느러미에 일정한 위상 지연을 가지고 운동하게 된다.

꼬리지느러미는 표 1 및 그림 6에서와 같이 총 6개를

표 1. 꼬리지느러미구분에 따른 분할 비

꼬리지느러미	번호					
	1	2	3	4	5	6
Joint 위치(r)	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0
두께	1mm					

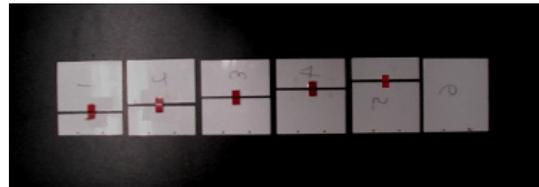


그림 6. 번호 및 r 에 따른 탄성조인트 꼬리지느러미의 모양 (좌로부터 1,2,3,4,5,6번)

제작하였다. 탄성 조인트의 위치는 표 1의 r 값 및 식(14)에 의해 정해지도록 하였다.

인조꼬리지느러미의 소재는 두께 1mm 아크릴판이며, 조인트는 두께 0.1mm PVC로 제작하였다. 꼬리지느러미의 길이는 전체 모형 길이의 1/4로 맞추었으며, 이는 실제 물고기에서와 유사한 비율이다. 지느러미의 가로세로 비율 또한 다른 연구들에서 사용한 대로 설정하였다. 비록 지느러미 모양이 실제와 다르게 직사각형이지만, 물고기 로봇의 운동은 실제와 큰 차이가 없다²⁸⁾.

본 연구에서 제작한 모형은 꼬리지느러미의 진동을 통하여 추진력을 얻는다. 이때 지느러미에 진동을 전달하는 동력원은 RC용 서보 모터이며, 0~45°, 0~4 Hz의 범위에서 일정한 주기와 진폭으로 진동시킬 수 있다. 마이크로프로세서는 ATmega128을 사용하였으며, 마이크로프로세서가 PWM의 펄스 폭 제어를 통하여 꼬리지느러미의 앞부분의 진동수 및 진폭을 제어한다. 본 실험에서는 서보모터를 sin과 함수로 구동하였다.

4. 물고기 로봇 추진 실험 및 이론과의 비교 분석

탄성 조인트의 상대적 위치 및 구동 주파수에 따른 이중 꼬리지느러미의 추진력 발생과 식(16), (17)로 주어지는 근사식에 의한 추진력 변화를 비교하기 위하여 그림 7과 같이 실제 수조에서 실험을 진행하였다. 추진 실험은 깊이 30cm, 안 쪽 지름 170cm의 수조에서 실행되었는데, 수조의 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝으로 모형이 이동하는데 걸리는 시간을 통해 전체 경로에서의 평균속력을 측정하였다.

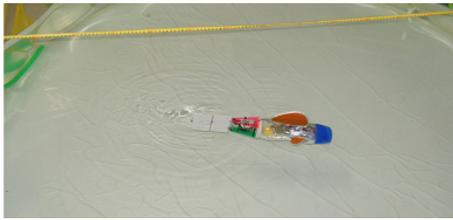


그림 7. 수조를 이용한 물고기 로봇의 추진 성능 실험 장면

θ_2 의 진폭은 10° 로 두고, 그림 6과 같이 주어지는 1~5번의 꼬리지느러미에 대하여 1Hz, 2Hz, 3Hz로 구동 주파수를 변화시키면서 평균 추진 속력을 측정하였다.

물고기 로봇의 총 길이가 40cm이기 때문에 물고기 로봇이 수조에서 진행하는 거리는 대략 135cm가 된다. 로봇이 직선경로에서 벗어나 오차가 생길 수 있지만, 수조가 원형이기 때문에 작은 경로 이탈에 대해서는 이동경로가 비슷하다. 실제로 반복 실험을 할 때 상대적으로 느린 속력범위에서는 오차가 1초 내외, 상대적으로 빠른 속력에서는 오차가 0.5초 내외였다.

그림 8은 이중 꼬리지느러미가 플랩핑을 할 때 운동을 촬영한 것이며, 예상 대로 바깥쪽 꼬리지느러미(링크 3)가 안쪽 꼬리지느러미(링크 2)보다 위상이 지연되어 움직이는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 꼬리지느러미의 링크 2 부분과 링크 3 부분



그림 8. 이중 꼬리지느러미의 움직임 사진

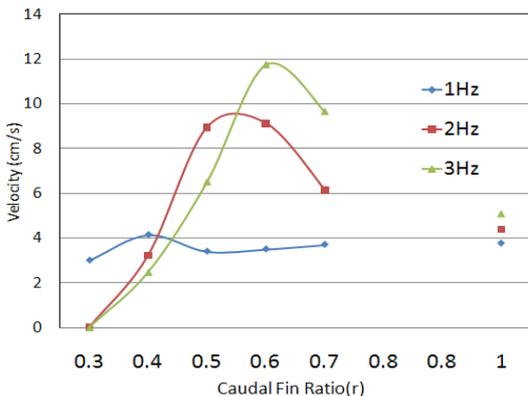


그림 9. 이중 꼬리지느러미의 비(r) 및 플랩핑 주파수에 따른 추진 속도 실험 결과

의 비를 $r : 1-r$ 의 비로 두고 r 을 변화시켰을 때의 물고기 로봇의 추진속도 실험 결과를 보여 주고 있다. 또한 주파수의 변화에 대한 속도의 변화도 동시에 보여 주고 있다. r 은 전술한 바와 같이 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7에 대하여 실험을 하였으며, 분리되지 않은 꼬리지느러미와의 비교를 위하여 r 이 1인 경우도 추가하였으며 그림 9의 맨 우측에 점으로 나타나 있다. 실험 결과를 보면 주파수가 증가함에 따라 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 r 의 변화에 대해서는 특정 구간에서 최대치를 가지는 것을 보여주고 있다. 플랩핑 주파수가 1 Hz일 때는 r 이 0.4 부근에서 최대값을 가지며, 2 Hz일 때는 r 이 0.55 부근, 그리고 3 Hz일 때는 r 이 0.62 부근에서 최대값을 가지는 것을 보여 주고 있다. 그리고 r 이 증가함에 따라 공진피크를 일으키는 주파수가 증가하는데, 이는 같은 탄성계수에 대하여 꼬리지느러미 뒤쪽이 짧아질 경우 공진점 주파수가 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 정량적인 성능 개선 비교는 표 2와 같다. 주파수가 올라갈수록 탄성조인트를 가진 이중 꼬리지느러미를 이용한 경우가 단일 꼬리지느러미를 이용한 경우에 비하여 성능이 개선되었으며, 평균 82.7%의 현저한 속도 개선이 이루어 졌다.

이와 같은 성능변화를 앞에서 유도한 식(16), (17)과 비교분석하기 위해서, 앞 절에서 유도한 평균 추력 방정

표 2. 일체형 및 탄성조인트 연결형 꼬리지느러미의 구동주파수에 따른 추진 속도 비교

구동주파수 (Hz)	평균 속도(cm/s)		속도 개선비(%)
	일체형	탄성조인트 연결형	
1	3.76	4.14	10
2	4.38	9.12	108
3	5.08	11.73	130

표 3. 시뮬레이션에 사용한 인자들의 정의 및 값

인자	설명	값
L	Tail fin span	0.085 [m]
ρ	Water density	998 [kg/m ³]
C	Effective half cord length	0.055 [m]
U_m	Nominal fluid velocity	0.05 [m/s]
M_t	Total mass of double tail fin	1.17E-3 [kg]
c_2	Damping of joint 2	1.1E-4[Nms/rad]
k_2	Elasticity of joint 2	1.9E-2 [Nm/rad]

식인 식(16)과 식(17)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터들은 표 3과 같다. 이 값을 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서 보면 그림 9의 실험 결과에서와 매우 유사하게 이중 꼬리지 지느러미의 앞 뒷 부분 비율을 정하는 r 에 따라 추진력이 피크 점을 보임을 알 수 있다. 그림 10에서 추진속도와의 비교를 위해서 수직 축은 추진력의 제곱근으로 표시하였다. 실험 결과인 그림 9와 비교할 때 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, 공진피크 주파수는 r 에 따라 증가하는 현상을 보이며 이것은 r 이 증가하면 꼬리지느러미의 뒷부분 크기가 줄어들어 상대적으로 고주파수에서 공진점을 이루는 것으로 판단된다.

그림 11은 실험에 사용된 꼬리지느러미 두 파트의 비인 r 의 변화에 따라 θ_2 에서 θ_3 로 가는 전달함수 $T(s)$ 의

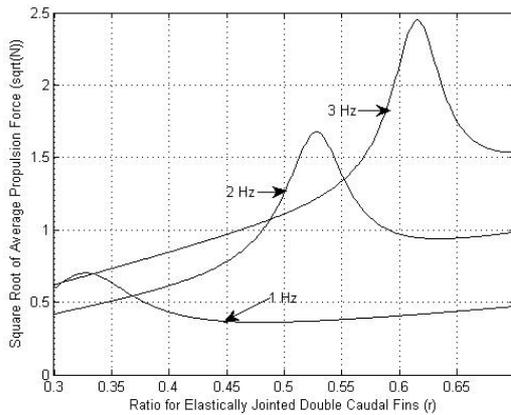


그림 10. 이중 꼬리지느러미의 비(r) 및 플랩핑 주파수에 따른 발생 추진력 시뮬레이션 결과

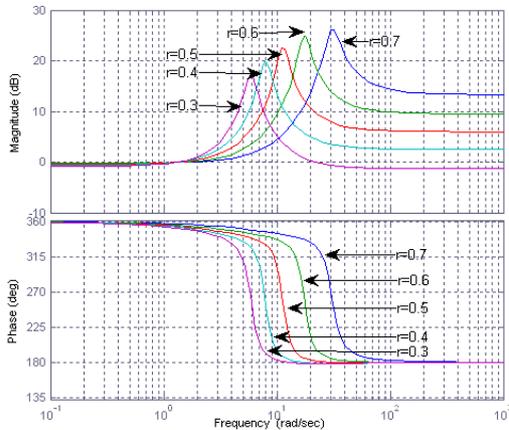


그림 11. 이중 꼬리지느러미에서 r 에 따른 전달함수 $T(s)$ 주파수 응답

주파수 응답을 보여 주고 있는데, 실험에서와 마찬가지로 r 이 증가함에 따라 공진주파수가 커지는 쪽으로 변화하는 것을 보여주며, 이는 그림 9에 있는 실험 결과와 비교할 때, 각각의 r 에 따라 공진점 부근의 주파수로 구동될 때 추진속도가 최대치를 보이는 것을 보여주고 있음을 알 수 있다. 실험과 시뮬레이션 결과는 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, 약간의 오차가 있는 것은 실험 오차 및 시뮬레이션시 사용한 인자와 실제 로봇물고기의 인자 사이에 약간씩의 차이가 있기 때문이며, 또한 교차곱셈 항 등 비선형 오차 및 교차항들을 무시했기 때문인 것으로 판단된다. 또한 θ_2 의 진폭은 서보 모터에 의하여 10° 로 유지되는 반면, θ_3 는 공진에 의하여 그 크기가 증폭된다. 이것은 실험에서 추진력을 개선하는 요인이 되지만, θ_3 의 진폭이 작을 때 성립하는 선형모델과는 차이를 나타내게 하는 요인이 되기도 한다.

5. 결론

본 논문에서는 탄성조인트로 연결된 이중 꼬리지느러미의 추력 식을 간단한 폐쇄된 형태의 식으로 유도하였으며, 이 식이 꼬리지느러미의 성능을 예측하고, 최대의 추력을 낼 수 있는 꼬리지느러미를 설계하는데 사용될 수 있음을 보였다. 특히 유도된 식이 유연 꼬리지느러미를 해석하기 위한 첫 단추로 오스트라키폴 유영을 하는 물고기 로봇의 꼬리지느러미를 두개로 나눈 후 탄성 조인트로 연결하여, 간단하게 꼬리지느러미에 탄성을 부여할 경우, 탄성과 전체 꼬리지느러미의 크기 등이 고정된 경우에 있어서, 꼬리지느러미의 앞단과 뒷단의 길이의 비인 r 을 최적으로 정하는데 사용될 수 있음을 보였으며, 또한 실험결과와 이론적 예측치가 매우 유사하게 변화됨을 검증하였다. 실험 결과 최대 추력은 제시된 식에 의한 이론적 예측대로 꼬리지느러미를 나누는 비인 r 값에 의해 결정되는 공진주파수 부근에서 구동될 때 발생되었으며 평균 82.7%의 추진 속도 개선을 이룰 수 있었다. 이러한 연구 결과는 오스트라키폴 유영을 하는 물고기 로봇의 꼬리지느러미를 효과적으로 설계하는 데에 유용하게 쓰일 수 있다. 또한 조인트를 몇 개 더 추가하고, 본 논문에서 유도된 식을 확장하면, 유연한 꼬리지느러미에 매우 유사하면서도, 비교적 간략한 형태의 폐쇄된 해 형태의 추진력 식을 얻을 수 있으므로, 각 조인트에서의 탄성 크기를 효과적으로 정하여 추력을 극대화하는 데도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

또한 본 연구에서는 추진에 중점을 두었는데, 앞으로 추진 뿐 아니라 방향 전환, 안정성 등에 대한 연구도 필요하다.

참고문헌

- [1] Videler J. J., *Fish Swimming*, Chapman & Hall, London, U.K. (1993)
- [2] Gray J., Studies in Animal Locomotion VI. The Propulsive Powers of the Dolphin, *Journal of Experimental Biology*, 13 (1935) 192-199
- [3] Sfakiotakis M., Lane D. M. & Davies J. C., "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion," *Journal of Oceanic Engineering*, Vol.24, No.2, pp.237-252, 1999.
- [4] Lighthill M.J., "Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.44, pp.265-301, 1970.
- [5] Listak M., Martin G., Pugal D., Aabloo A. & Kruusmaa M., "Design of a semiautonomous biomimetic underwater Vehicle for environmental monitoring," *Proceedings of 2005 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp.9-14, 2005.
- [6] Bandyopadhyay R., "Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles," *Journal of Oceanic Engineering*, Vol.29, pp.1-32, 2004.
- [7] Barret D. S., Triantafyllou M. S., Yue D. K. P., Grosenbaugh M. A., Wolfgang M. J., "Drag Reduction in Fish-like Locomotion," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.392, pp.183-212, 1999.
- [8] Kumph J.M., "Maneuvering of a Robotic Pike," *MS thesis*, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [9] Anderson J. M., Kerrebrock P. A., "The Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle (VCUUV): An Autonomous Robot Tuna," *The 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, NH, August 23-25, 1999, Available at: <http://www.drapet.com/digest2000/paper6.pdf>.
- [10] Anderson J. M. and Chhabra N. K., "Maneuvering and stability performance of a robotic tuna," *Integrative and Comparative Biology*, Vol.42, No.1, pp.118-126, 2002.
- [11] Vela P. A., Morgansen K. A., and Burdick J. W., "Underwater locomotion from oscillatory shape deformations," *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, Las Vegas, Nevada, USA, December 2002.
- [12] Selverston A. I., Rabinovich M. I., Huerta R., Novotn, T., Levi R., Arshavsky Y., Volkovskii A., Ayers J. and Pinto R., "Biomimetic Central Pattern Generators for Robotics and Prosthetics," *In ROBIO2004, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Vol.1, pp.885 - 888, Shenyang, China.2005.
- [13] Deng X. and Avadhanula S., "Biomimetic Micro Underwater Vehicle with Oscillating Fin Propulsion: System Design and Force Measurement," 1570621abstract *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005. Barcelona, Spain, pp.3312-3317, 18-22 April 2005
- [14] Liu J., Hu H., "Biological Inspiration: From Carangiform Fish to Multi-Joint Robotic Fish," *Journal of Bionic Engineering*, Vol.7, No.1, pp.35-48, 2010.
- [15] Hirata K., Takimoto T., & Tamura K., "Study on turning performance of a fish robot," *Proceeding of 1st International Symposium Aqua Bio-Mech.*, Honolulu, HI, pp.287-287, Aug 2000.
- [16] Yu J.Z., Wang L. & Tan M., "A framework for biomimetic robot fish's design and its realization," 2005 *American Control Conference*, Portland, OR, USA, June, 2005.
- [17] Hur M., Kang T., Chan W. L., Choi J.M., "H_∞ controller design of an ostraciiform swimming fish robot," *Indian Journal of Marine Sciences*, Vol.38, pp.302-307, September 2009.
- [18] Seunghee Lee, Jounghyun Park, and Cheolheui Han, "Optimal control of a mackerel-mimicking robot for energy efficient trajectory tracking," *Journal of Bionic Engineering*, Vol.4, Issue 4, pp.209-215, December 2007.
- [19] Sitorus P.E., Nazarudin Y.Y., Leksono E. &

- Budiyono A., "Design and Implementation of Paired Pectoral Fins Locomotion of Labriform Fish Applied to a Fish Robot," *Journal of Bionic Engineering*, Vol 6, pp.37-45, 2009.
- [20] Breder C.M., *The Locomotion of Fishes*, Zoologica, Vol.4, pp.159-296.
- [21] Garner L.J., Wilson L. N., Lagoudas D.C. & Rediniotis O.K., "Development of a Shape Memory Alloy Actuated Biomimetic Vehicle," *Smart Master Structure*, Vol.9, pp.673-683, 2000.
- [22] Seok Heo, Tedy Wiguna, Hoon Cheol Park, and Nam Seo Goo, "Effect of an artificial caudal fin on the performance of a biomimetic fish robot propelled by piezoelectric actuators," *Journal of Bionic Engineering*, Vol.4, Issue 3, pp.151-158, September 2007.
- [23] Guo S., Fukuda T. & Asaka K., "A New Type of Fish-Like Underwater Microrobot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.8, No.1, 2003.
- [24] Schouveiler L., Hover F.S., and Triantafyllou M.S., "Performance of flapping foil propulsion," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.20, pp.949-959, 2005.
- [25] Blake R.W., *Fish Locomotion*, Cambridge University Press, 1983.
- [26] Harper, K.A., Berkemeier M.D., and Grace S., "Modeling the Dynamics of Spring-Driven Oscillating -Foil Propulsion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.23, No.3, July 1998.
- [27] Motomu NAKASHIMA, Norifumi OHGISHI, and Kyosuke ONO, "A Study on the Propulsive Mechanism of a Double Jointed Fish Robot Utilizing SelfExcitation Control," *JSME International Journal*, Series C, Vol.46, No.3, pp.982-990, 2003.
- [28] Tuong Quan Vo, Hyung Seok Kim, Byung Ryong Lee, "Propulsive Velocity Optimization of 3-Joint Fish Robot Using Genetic-Hill Climing Algorithm," *Journal of Bionic Engineering*, Vol.6, No.4, pp.415-429, 2009.
- [29] Yong-Jai Park, Useok Jung, Jeongsu Lee, Ho-Young Kim, and Kyu-Jin Cho, "The effect of Compliant Joint and Caudal Fin in Thrust Generation for Robotic Fish," *Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, September 26-29, 2010.
- [30] Pablo Valdivia y Alvarado and Kamal Youcef-Toumi, "Design of Machines with Compliant Bodies for Biomimetic Locomotion in Liquid Environments," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.128, pp.3-13, March 2006.
- [31] Jeffrey A. Walker, "Does a Rigid Body Limit Maneuverability?" *Journal of Experimental Biology*, Vol.203, pp.3391-3396, 2000.
- [32] Parasar Kodati and Xinyan Deng, "Experimental Studies on the Hydrodynamics of Robotic Ostraciiform Tail Fin," *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 9-15, 2006, Beijing, China.



강 이 삭

1993 서울출생
2009~현재 서울과학고등학교
재학중
관심분야: 생체 모사 로봇, 지
능 로봇, 재활 로봇