

생체 모방 로봇 물고기의 설계와 제어에 관한 연구[§]

김영진* · 김승재* · 양경선* · 이정민** · 임충혁*** · 김동환***†

* 서울과학기술대학교 나노생산기술연구소, ** (주)컨벡스, *** 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부

Design and Control of a Biomimetic Fish Robot

Young Jin Kim^{*}, Seung Jae Kim^{*}, Kyung Sun Yang^{*}, Jeong Min Lee^{**}, Chung Hyuk Yim^{***},
and Dong Hwan Kim^{***†}

^{*} Nano Manufacturing Device, Seoul National University of Science and Technology, ^{**} Convex co., Ltd,
^{***} School of Mechanical Design & Automation Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received June 16, 2010; Revised October 17, 2011; Accepted October 26, 2011)

Key Words : Biomimetics(생체모방), Underwater Swimming(잠영), Neutral Buoyancy(중성부력), Carangiform Motion(꼬리몸통운동)

초록: 이 논문에서는 최소의 배터리를 소비하여 물고기 로봇을 구동하고, 물고기와 같은 유연한 운동을 할 수 있는 생체 모방(biomimetic) 물고기 로봇의 설계, 제작, 제어에 관하여 제안 하였다. 두 개 모터를 적용하여 물고기와 같이 유연하게 움직일 수 있는 방법을 제시 하였다. 중성 부력을 유지하는 방법과 빠르게 잠영하고, 방향을 전환 하기 위한 방법을 제시 하였다. 로봇 물고기의 꼬리는 유연한 움직임을 만들기 위하여 폴리머 재질을 사용하여 만들었다. 꼬리 내부는 관절과 강선으로 구성된다. 로봇 물고기에 척추에 해당하는 우레탄 골격과 관절을 이루는 편에 연결된 강선을 당겨 꼬리에 정현파 명령을 주어 물고기와 비슷한 유영을 할 수 있도록 하였으며, 부력 조절 장치를 설치하였으며, 이 부력 조절 장치를 이용하여 물고기 로봇이 상승, 하강을 할 수 있도록 하였다.

Abstract: This paper introduces the mechanical design, fabrication, and control of a biomimetic fish robot whose driving motions resemble a real fish's flexibility and movement. This robot uses two motors create flexible movement like that of a fish. Several schemes, such as neutral buoyancy, fast underwater swimming, and direction changes, are introduced. The tail of the fish robot is made of a polymer material for flexible movement. The interior of the tail contains a joint and a wire. A sine wave command was applied to the tail to produce motion resembling a real fish swimming, and a buoy control device was installed. The up and down motion of the robot fish was controlled using this device.

- 기호설명 -

- F_a, F_b : 강선을 당기는 힘의 방향(N)
- T_a, T_b : 모터의 회전 토크(Nm)
- φ, ψ : 모터를 회전 시키는 각도(degree)
- α, β : 고정 편이 회전각도(degree)
- γ : 탄성부재에 발생된 굽힘의 곡률반지름(mm)
- θ : 원호의 중심각(degree)
- σ_m : 수직응력(kg/mm)
- I : 단면 2 차 모멘트(mm⁴)

- c : 중립면에서 가장 먼 거리(mm)
- M_t : 굽힘 모멘트(Nm)
- F_T : 추진력(N)
- F_L : 양력(N)
- F_D : 항력(N)
- ρ : 물의 밀도(g/cm³)
- v_T : 물고기 로봇의 추진 속도(mm/s)
- v_L : 물고기 로봇의 상승 속도(mm/s)
- S_1 : 전면단면적(mm²)
- S_2 : 평면단면적(mm²)
- V : 물고기 로봇 전체 체적(cm³)
- Δ_v : 보조 부력장치의 체적변화(cm³)
- W : 자중(kg)

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계 학술대회 (2010. 6. 3.-4., 광주과학기술원) 발표논문임.

† Corresponding Author, dhkim@snut.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

- F_B : 물고기 로봇의 작용하는 부력(N)
 F'_B : 보조 부력장치에 작용하는 부력(N)
 θ_T : 꼬리 지느러미 각도(degree)
 θ_H : 로봇 머리부 각도(N)

1. 서 론

1.1 로봇 물고기의 개발 배경

로봇 물고기는 1994 년 MIT 에서 Robotuna⁽¹⁾ 개발을 시작으로, 1998 년 Draper Lab 에서 MIT 의 Robotuna 를 기초로 VCUUV(Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle)⁽²⁾를 개발하였다.

시대를 거듭 할수록 로봇 물고기는 많은 발전을 하였다. 제어적 측면과 기구적 측면에서 실제 물고기와 흡사한 구현을 하기 위하여 많은 노력을 기울여 왔다. 최근 2006 년 Essex 대학에서 개발된 물고기 로봇 G 시리즈⁽³⁾는 실제 물고기와 유사한 모양으로 제작되었으며, 물고기와 비슷한 유영운동 기능을 보여 주었다. 현재 물고기 로봇은 단순히 물고기 유영 기능을 표현하는 형태에서 벗어나 실제 물고기와 유사한 모양과 유영운동을 할 수 있는 생체모방 관련 연구들이 활발히 진행되고 있다.⁽⁴⁾

실제 물고기와 같은 유영 운동을 모방하기 위해서 로봇의 관절을 구성하고, 다수의 모터와 링크를 구성하고, 제어하여 물고기의 유영운동을 구현하고 있다. 최근에는 물고기의 지느러미가 프로펠러보다 유체역학적으로 효율적 이다는 것이 밝혀지면서 물고기 꼬리에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있다.⁽⁵⁾

여러 개의 모터를 이용하여 로봇의 관절 구성하면, 로봇을 구동 시킬 때 많은 용량의 전력이 필요하다. 물고기 로봇은 물속에서 사용하는 장소적 제약으로 전력소모의 최소화가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 전력소모를 최소화 하기 위하여 꼬리 지느러미를 구성하였으며, 실제 물고기와 같은 유영운동을 할 수 있는 물고기 로봇을 제작하는 방법을 제안하고, 동시에 물고기 로봇의 설계, 제작, 제어에 관한 연구를 소개한다.

2. 로봇 물고기의 설계

물고기가 유영하는 운동형태는 BCF(Body and/or Caudal Fin)운동과 MPF(Median and/or Paired Fin)운동 두 가지 형태가 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 BCF 형태로 추진을 할 수 있는 꼬리 지느러미를 설계, 제작하였다.

꼬리 지느러미를 설계, 제작하였다. 꼬리지느러미를 사용하여 주기적 운동을 하는 물고기를 Carangiform 운동 형태라 한다.⁽⁷⁾ Carangiform 운동을 하는 물고기는 몸통은 움직이지 않고, 몸통에서부터 1/3 지점에 해당하는 꼬리지느러미(Caudal fin)까지 주기적으로 움직이는 운동을 한다.^(7,9) Carangiform 운동은 몸의 일부에서부터 파장을 일으켜 꼬리 지느러미까지 힘을 전달하여 파동을 일으키는 운동이다.⁽⁸⁾

2.1 로봇 물고기 꼬리지느러미의 운동학적 모델

꼬리 지느러미를 유연하게 움직일 수 있도록 하기 위한 방법을 Fig. 1 에 개략적으로 나타내었다. 점 O 에 단면이 직사각형인 우레탄을 외팔보 형식으로 한쪽 면에 고정하고, 핀을 고정하였다. 꼬리지느러미가 작동을 할 수 있도록 점 a 에 설치된 핀 p_0 를 강선이 당기도록 하고, 점 b 에 설치된 핀 p_1 을 강선이 당기도록 볼트로 고정하였다. 모터 M_1 을 F_a 방향으로 φ 만큼 구동하면 Fig. 1 에 보는 바와 같이 핀 p_0 에 고정되어 있는 강선이 당겨지며, 강선의 당김으로 핀 p_0 는 α 만큼 회전하며, M_2 를 F_b 방향으로 ψ 만큼 구동 시키면 핀 p_1 은 β 만큼 회전을 한다. 회전은 Fig. 1 과 같이 우레탄 꼬리지느러미 뼈대에 굽힘이 발생된다. 꼬리지느러미는 Carangiform 운동 추진 메커니즘에 핵심요소이다. 물고기 행동 연구에서는 물고기의 이동진폭은 척추에서부터 근육까지 곡률로 나타난다고 연구되고 있다.⁽⁸⁾

Fig. 2 는 꼬리지느러미를 개략적으로 나타내었다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 두 개의 핀만이 가장 큰 각도의 변화를 보여주므로 2 개의 핀에 대해서만 나타내었다.



Fig. 1 Fish robot tail made by Urethane

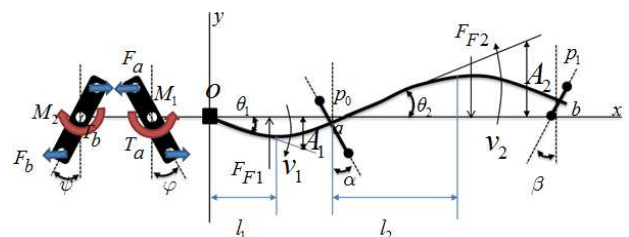


Fig. 2 Model for forces and motions on the robot fish

M_1 을 회전시켜 p_0 에 고정되어 있는 핀을 당기면 핀의 각도는 α 만큼 회전을 하며 이 회전으로 점 O 에 고정되어 있는 뼈대에는 θ_1 의 각도 변화가 발생한다. 또한 M_2 를 회전시켜 p_1 에 고정되어 있는 핀을 당기면 핀의 각도는 β 만큼 회전하며 이 회전으로 점 a 와 점 b 사이에는 θ_2 의 각도 변화가 발생한다. 꼬리가 굽혀지는 방향으로 물은 v_1 과 v_2 의 속도로 밀려나며, 반대 방향으로 F_{F1} 과 F_{F2} 의 유체력(hydrodynamic force)이 발생한다. 여기서 F_F 는 밀려나는 물에 대한 반발력이다. 꼬리지느러미 각 θ 의 변화는 $\theta = A \sin \omega t$ 와 같이 나타낸다. $\omega = 2\pi f$ 이므로 지느러미 각은 식 (1)과 같다.^(7~11) Carangiform 추진 파동 곡선은 물고기의 관성중심에서 꼬리 링크에 이르기 까지 나타난다.⁽⁹⁾

$$\theta = A \sin 2\pi f t \quad (1)$$

θ 만큼 꼬리지느러미가 변화 할 때 링크의 중심에서 속도 v_1, v_2 는 식 (2)~식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 A_1 과 A_2 는 꼬리 지느러미 링크의 진폭이다.

$$v_1 = l_1 \dot{\theta}_1 \quad (2)$$

$$v_2 = l_2 \dot{\theta}_2 \quad (3)$$

따라서 식 (1)을 미분하여 식 (2), (3)에 대입하면 식 (4), (5)가 된다.

$$v_1 = l_1 A_1 2\pi f \cos 2\pi f t \quad (4)$$

$$v_2 = l_2 A_2 2\pi f \cos 2\pi f t \quad (5)$$

여기서 A_1 과 A_2 는 꼬리지느러미 링크의 진폭이다.

꼬리의 측면에 발생하는 유체저항력 F_F 는 식 (6)과 같다.

$$F_F = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 S_1 \quad (6)$$

각각 링크에 대한 물의 반발력을 계산하면 식 (7), (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{F1} = \frac{1}{2} \rho C_D (l_1 A_1 2\pi f \cos 2\pi f t)^2 S_1 \quad (7)$$

$$F_{F2} = \frac{1}{2} \rho C_D (l_2 A_2 2\pi f \cos 2\pi f t)^2 S_1 \quad (8)$$

$\cos 2\pi f t = 1$ 일 때 진폭이 최대이므로 식 (9), (10)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ρ 는 물의 밀도, C_D 는 항력계수, S_1 은 전면단면적, A_1, A_2 는 꼬리지느러미의 진폭이다.

$$F_{F1} = \frac{1}{2} \rho C_D (l_1 A_1 2\pi f)^2 S_1 \quad (9)$$

$$F_{F2} = \frac{1}{2} \rho C_D (l_2 A_2 2\pi f)^2 S_1 \quad (10)$$

모터가 회전하는 각도와 링크의 핀이 회전하는 각도 사이의 관계를 $\varphi \cong \alpha$ 라고 가정한다면, 모터에서 발생하는 토크 T 는 꼬리에 발생하는 굽히는 힘과 같다. 물을 밀어내는 힘을 계산하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 L 은 링크의 중심 길이이다.

$$T = F_F l \quad (11)$$

모터의 발생하는 토크의 합은 식 (12) 같이 나타낼 수 있다. 여기서 힘의 방향은 시계방향을 (+) 방향이라 가정한다.

$$T = T_b - T_a \quad (12)$$

식 (12)에 식 (7)과 식 (8)을 대입하여 정리하면 식 (13)과 같다.

$$T = 2\pi^2 f^2 \rho C_D S_1 (l_2^3 A_2^3 - l_1^3 A_1^3) \quad (13)$$

여기서 링크 1 은 몸통에 가까우므로 추진력에 거의 영향을 주지 않는 것으로 간주하면 꼬리지느러미의 추진력은 링크 2 에 의하여 결정된다. 따라서 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = 2\pi^2 f^2 \rho C_D S_1 (l_2^3 A_2^3) \quad (14)$$

탄성재료의 굽힘을 이용하면, 물고기 로봇의 꼬리지느러미 역시, 물고기가 꼬리에서 파동을 발생하여 추진하는 Carangiform 운동 형태와 같은 파동 운동을 구현 할 수 있으며, 이 파동은 물고기 로봇을 물속에서 전진할 수 있도록 하는 추진력으로 작용된다.

꼬리지느러미에 핀을 삽입하기 위한 치수는 Table 1 과 같다.

Table 1 Dimension of robot fish tail

l_0 (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)
40.94	120	120	132.5



Fig. 3 Snapshots of fish robot swimming in underwater

Fig. 3 은 완성된 물고기 로봇의 수영하는 모습을 나타내었다.

유체 역학적으로 발생하는 힘과 모멘트 관계는 유체 속에서 움직이는 물체는 표면에 작용하는 압력의 차이와 표면 전단력으로 인해 유동방향으로 항력(drag force)을 받으며, 유동 방향에 수직으로 양력(Lift force)이 작용한다. 물속에서 움직이는 물체는 추진방향으로 추진력과 추진력(thrust force)의 반대방향으로 항력, 항력에 수직하는 양력의 힘을 받는다.⁽¹³⁾

물고기 로봇에 작용하는 모든 힘의 총합은 식 (15), (16)과 같이 정리할 수 있다.

$$\sum F_x = F_T - F_D \quad (15)$$

$$\sum F_y = F_L - W + F_B \quad (16)$$

여기서 F_T 는 파동에 의하여 발생하는 물고기 로봇의 추진력, F_D 는 물고기 로봇의 추력에 반대방향으로 작용하는 항력, F_L 은 물고기 로봇에 발생하는 양력, W 는 물고기 로봇의 자중, F_B 는 물고기 로봇에 작용하는 부력이다. 항력에 관한 식 (17)과 같이 표현된다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D v_T^2 S_1 \quad (17)$$

y 방향으로 작용하는 식을 정리하면 식 (18), (19)와 같이 표현된다.

$$F_B = \rho g V \quad (18)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho C_L v_L^2 A_2 - mg + \rho g V \quad (19)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, C_L 는 양력계수, C_D 는 항력계수, v_T 는 물고기 로봇의 추진 속도, v_L 는 물고기 로봇의 상승속도이다.

2.2 로봇 물고기의 잠영과 부상을 위한 모델

물고기 로봇이 잠영과 부상을 할 때, 머리의 방향 전환을 구현하기 위하여 옆 지느러미(pectoral fin)의 회전과 보조부력 조절장치의 부력을 사용하



(a) Downward swimming (b) Upward swimming

Fig. 4 Robot head direction change of robot fish

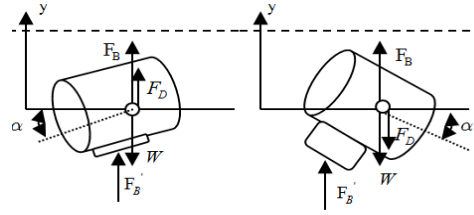


Fig. 5 Vertical forces of fish robot in a fluid

여 물고기 로봇의 머리부 방향전환을 구현하였다. 실제 물고기가 잠영할 때, 머리 부분을 아래로 향하여 물속으로 들어가며, 부상 할 때는 머리 부분을 위쪽으로 향하게 하여 올라온다. 이와 같은 형태의 수영을 구현하기 위하여 로봇 물고기의 배면에 보조 부력 장치를 설치하였고, 내부에는 무게추를 설치하였다. 보조부력 장치에 몸체의 공기를 주입하고, 무게추를 회전하여 무게중심을 변화시키는 방법으로 물고기 로봇의 머리부 방향을 전환할 수 있도록 하였다. Fig. 4 의 (a)는 하강 할 때 머리 방향을 나타냈으며, (b)는 부상 시 머리 방향을 나타내었다.

물속으로 잠영할 때, 보조부력장치에 들어 있는 공기를 물고기 로봇의 몸통으로 이동 시키면 보조부력 장치에 부력이 제거된다. 그리고 무게추를 머리방향으로 회전 시키면, 무게 중심이 앞쪽으로 이동하여 물고기 로봇의 머리 부분이 아래를 향한다. 부상할 때는 무게추를 머리 반대방향으로 회전 시키고, 보조부력장치 쪽으로 몸통에 있는 공기를 공급한다. 보조 부력 장치의 부피가 증가하면, 머리 부분의 부력이 발생된다. 이 부력이 머리 부분을 들어올리는 효과를 갖는다. 따라서, 물고기 로봇의 머리 방향이 위쪽으로 바뀐다.

Fig. 5 는 물고기 로봇이 물속으로 들어갈 때 머리의 위치와 부상할 때 머리 위치를 간략히 표시하였으며, 운동 방정식은 식 (20)과 같이 표현할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= -W + F_B + F_B' + F_D \\ W &= mg \\ F_B &= \rho g V \\ F_B' &= \rho g \Delta v \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 W 는 물고기 로봇의 자중, F_D 은 물고기 로봇이 상승 또는 하강할 때 발생하는 항력(Drag force), F_b 는 물고기 로봇 전체에 작용하는 부력, F_b' 보조 부력장치의 보조 부력, 물고기 로봇이 상승 또는 부상하면 식 (21), (22)와 같다.

$$m\ddot{y} = -mg + \rho g(\Delta v + V) - \frac{1}{2} C_D S_2 (\dot{y})^2 \quad (21)$$

$$\dot{y} = -g + \frac{\rho g(\Delta v + V)}{m} - \frac{C_D S_2 (\dot{y})^2}{2m} \quad (22)$$

2.3 꼬리지느러미(Caudal Fin) 골격 설계

Carangiform 형태의 운동을 형성하기 위하여 꼬리 지느러미 재질은 우레탄을 사용하여 척추 골격을 만들고, 이 우레탄 골격 사이에 Table 1에 표시한 치수 간격으로 핀을 삽입하여 관절의 역할을 할 수 있도록 하였다.

꼬리지느러미 구조를 간략하게 Fig. 6에 표시하였다. M_1, M_2 모터에 설치한 회전바(rotation bar)에 양쪽 끝에 강선을 각각 연결하였다. 모터를 F_a, F_b 방향으로 구동 시키면 연결되어 있는 강선이 점 b와 점 c의 핀을 당기도록 설계하였다.

2.4 물고기 로봇의 형상 설계

물고기 로봇의 기구 시스템 구조도를 Fig. 7에 표시하였다.

WHB(waterproof head box), WBB(waterproof body box), Caudal fin 세 부분으로 분할하여 구성하였다. WHB에는 제어보드와 옆 지느러미(Pectoral fin) 모터 설치 하였으며, WBB에는 Head 모터, 꼬리몸통(Tail Peduncle)모터, 꼬리지느러미 모터, 배터리, 워터펌프 등을 설치하였다. 꼬리지느러미 역할을 하는 우레탄 골격이 실리콘 몸통 안쪽에 삽입 되도록 설계, 제작하여 설치 하였다.

전원은 리튬 폴리머 14.8V, 5000mA 를 사용하였으며, 최대 방전은 36A 이다. 리튬 폴리머 배터리 2 개를 병렬로 연결하여 25.6V 의 전원을 만들어 사용하였다.

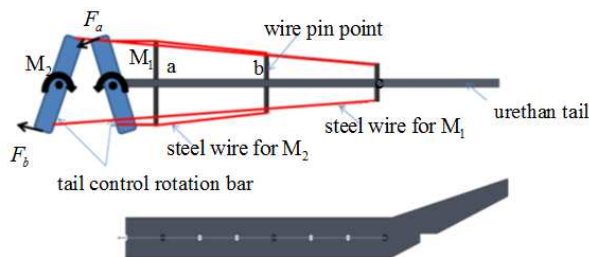


Fig. 6 Moving structure of robot fish tail

옆 지느러미는 물고기 로봇을 상, 하 방향 전환을 하기 위하여 설치 하였으며, 방향 전환을 빠르게 하기 위하여 보조 부력장치를 배면에 설치 하였다. 워터펌프를 이용하여 물 또는 공기를 몸체 밸러스트 탱크에 공급, 또는 배출하는 방식으로 중성부력(Neutral buoyancy)을 형성할 수 있도록 하였다.

제작된 물고기 로봇의 크기와 무게 Table 2와 같다.

3. 로봇 물고기의 제어

3.1 메인 CPU와 AI 모터의 통신

물고기 로봇이 물속에서 제어하기 위한 메인 CPU 는 TMS320F2812 DSP 를 사용하였으며, 구동은 AI 모터를 사용하여 제어 하였다. 머리와 꼬리는 AI RX-64 를 사용하였으며, 옆 지느러미는 AI RX-28 을 사용하였다. AI RX-64 의 모터 사양은 Table 3 과 같다.

Table 2 Specifications of robot fish

Weight (kg)	Length (mm)	width (mm)	Height(mm)
7.32	850	500	350

Table 3 Specifications of AI RX-64 motor

Weight (g)	Size (mm)	Reduction Ratio	Torque (kg·cm)
125	40.2×61.1×41.0	1/200	64.4

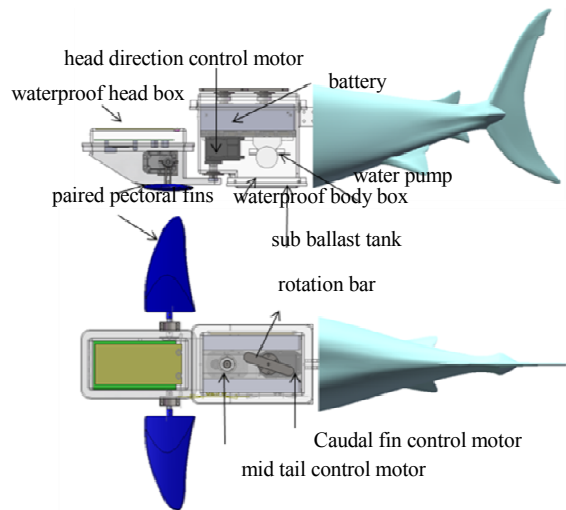
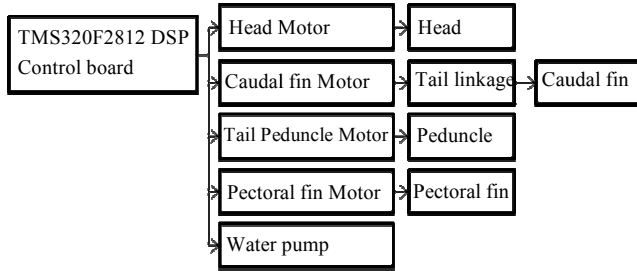
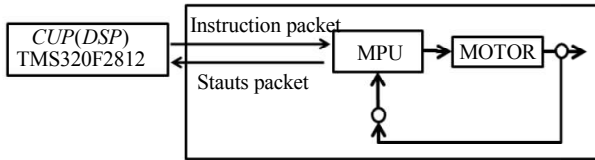
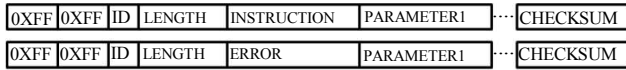


Fig. 7 Schematic structure of robot fish

Table 4 Specifications of AI RX-64 motor

Voltage(V)	Current(mA)	Protocol	Board rate(bps)
12~21	1200	RS485	7343~1M

**Fig. 8** Structural diagram of robot fish**Fig. 9** Block diagram of AI Motor**Fig. 10** Structure of data communication packet

물고기 로봇의 하드웨어 구성은 Fig. 8 에 표시하였다. 꼬리 지느러미를 구동하는 모터는 2 개로 구성되어 있으며, 다른 모터는 방향 전환 등에 사용되는 모터이다.

AI 모터는 RC 서버모터와 달리 PWM 방식의 펄스 신호를 제어명령으로 사용하기 않고, RS485 비 동기 직렬통신 방식으로 명령패킷을 전달 받는다.

Table 4 는 AI RX-64 모터의 제어 사양이다. AI 모터의 블록 선도를 Fig. 9 에 표시하였다.

메인 CPU 와 AI 모터는 RS485 비동기 직렬 통신을 사용하여 통신을 하며, 메인 CPU 는 꼬리 지느러미의 파동각도를 계산하여 명령패킷(Instruction packet)을 보낸다. AI 모터에서 받은 제어 명령을 수행하고 메인 CPU 에 상태패킷(status packet)을 보내준다. 명령패킷(Instruction packet)구조와 상태패킷(status packet) 구조는 Fig. 10 과 같다.⁽¹⁵⁾

3.2 물고기 로봇의 시뮬레이션

꼬리지느러미의 왕복운동은 일정한 주기를 가지는 파동관련 식으로 표현하는데, 일반적으로 정현

Table 5 Dimension of pool for experimentation

Width(mm)	Length (mm)	Depth(mm)
2160	4140	790

Table 6 Experimental results of robot fish in underwater

Velocity(m/s)	0.2
Rise Velocity(m/s)	0.2
Drop Velocity(m/s)	0.15
Steering angle(degrees)	±27
Battery life time(min)	180

파(sine wave)로 정의되며, 식 (23)과 같이 표현한다.^(7~11)

$$\theta(t) = A \sin(2 \pi f t) \quad (23)$$

프로그램에서는 음수 값을 만들지 않기 위하여 1 을 더하여 식 (24)와 같이 나타내었다.

$$\theta(t) = (1 + \sin(2 \pi f t))\theta_0 + \theta_m \quad (24)$$

여기서 θ_0 는 모터의 최대 회전 각도, θ_m 은 모터의 초기 각도이다. 위 식을 이용하여 꼬리 지느러미의 제어 명령을 만들었으며, 꼬리 지느러미의 진동 범위는 $180^\circ \sim 250^\circ$ 이고, 머리부의 진동 범위는 $0^\circ \sim 50^\circ$ 이다. 꼬리의 위치를 $\frac{\pi}{2}$ 에서 시작하였으며, 머리부의 운동은 0 도의 위치에서 시작하였다. 꼬리의 운동과 머리의 운동은 식 (25)와 식 (26)을 제어 명령으로 주었다.

$$\theta_T(t) = \{1 + \sin(\frac{\sum_{n=1}^{100} f(n)\pi}{100} + \frac{\pi}{2})\} \times 70 + 180 \quad (25)$$

$$\theta_H(t) = \{1 + \sin(\frac{\sum_{n=1}^{100} f(n)\pi}{100} + \frac{\pi}{2})\} \times 30 + 180 \quad (26)$$

여기서 $\theta_T(t)$ 는 꼬리지느러미의 각도이고, $\theta_H(t)$ 는 물고기 로봇 머리부의 각도이다.

4. 실험

물고기 로봇의 실험은 야외용 풀장에서 진행하였다. 물의 깊이는 60cm 로 하여 물고기 로봇의 속도와 잠영 및 부상 속도를 측정하였다.

실험 조건은 물에 의한 외력이 물고기 로봇에 가해지지 않는 상태이다. 파도나 유체의 흐름이 없는 정지 유체 상태에서 실험을 하였다. Table 5 는 풀장의 크기이다.

Table 6 은 물고기 로봇을 속도와 전력 소모를 나타낸 것이다. 물고기 로봇의 속도는 0.2m/s 의



Fig. 11 Pictures of fish robot on surface water (left) and in underwater (right)

속도로 추진을 하였으며, 2 개의 배터리 25.6V 5000mAh 의 용량으로 3 시간 가량 운용이 가능함을 확인할 수 있었다. 배터리를 3 시간 사용 후 충전 시간이 약 240 분 걸린다. 보조장치를 이용하여 물고기 로봇의 머리부의 방향을 전환하여 상승속도와 하강 속도를 측정하였다.

부력제어를 통하여 물고기 로봇의 머리부의 방향 전환이 이루어짐을 확인하였다.

물고기 로봇 수영 실험에서 Fig. 11 에 물 밖에서 촬영한 사진과 수중에서 촬영한 사진을 보여주고 있다. 물고기 로봇이 수영을 할 때에 꼬리 부분에서 추진 위한 파동 발생 시 실제 물고기와 같은 Carangiform 운동을 함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 2 개의 모터를 사용하여 꼬리 지느러미의 운동을 구현하는 방법을 설계하고, 제작 및 실험에 대하여 소개 하였다. 우레탄 꼬리 골격에서 발생하는 굽힘에 의하여 발생된 파동이 물고기와 운동 형태와 같은 Carangiform 운동 구현이 가능하다는 결론을 얻을 수 있었으며, 우레탄 꼬리의 설계를 바탕으로 하여 두 가지의 물고기 로봇 형태를 제작하여 실험하여, 강선을 이용하여 꼬리의 운동을 구현 시 모터를 이용하여 구현하는 방법이 모터 에너지 소모 측면에서 더 효과적이며, 모터를 이용한 수영 방법과 비교하여 좀 더 유연한 꼬리 운동을 만들 수 있다는 결론을 얻었다. 그리고 승, 하강을 위하여 부력제어를 실행하여 보다 유연한 운동을 구현 할 수 있었다.

참고문헌

(1) Streitlien, K., Triantafyllow, G. S. and Triantafyllow, M. S., 1996, "Efficient Foil Propulsion Through Vertex Control," *ALAJ*, Vol. 34, pp. 2314~2319.
 (2) Liu, J. D., Dukes Ian, Hu H. H., 2005, "Novel Mechatronics Design for a Robotic Fish," in *IEEE/RSJ*

International Conference of Intelligent Robots and Systems, pp. 2077~2082.
 (3) Anderson, J. M., 1996, "Vorticity Control for Efficient Propulsion," Ph.D. Dissertation. Massachusetts Inst. Technol./Woods Hole Oceanographic Inst. Joint Program. Woods Hole, MA.
 (4) Heo, S., Wiguna, T, Gu, N. S. G. and Park, H.C., 2007, "Mechanical Design, Fabrication and Test of a Biomimetic Fish Robot Using LIPCA as an Artificial Muscle," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 1, pp. 36~42.
 (5) Junzhi, Y. and Wang, L., 2005, "Parameter Optimization of Simplified Propulsive Model for Biomimetic Robot Fish," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona*, Spain, pp. 3306~3311.
 (6) Sfakiotais, M., Lan, D. M. and Davies, J.B.C., 1999, "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 24, pp. 237~252.
 (7) Tong, B., 2000 "Propulsive Mechanism of Fish's Undulatory Motion," *Mechanics in Engineering*, Vol. 22, pp. 69~74.
 (8) Xia, D., Chen, W., Liu J. and Liu, Y., 2007, "System and Experimental Research on Biomimetic Robot Fish," in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 5*, pp.111~116.
 (9) Chen, W., Xia, D. and Liu, J., 2008, "Modular Design and Realization of a Torpedo-Shape Robot Fish," *Proceeding of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp.125~130.
 (10) Vo T. Q., Kim, H. S., Cho, H. S., Dang, D. N. and Lee, B. R., 2009 "A Study on Optimization of Fish Robot Maximum Velocity Using The Combination of Genetic - Hill Climbing Algorithm," *ICROS-SICE International Joint Conference*, August 18-21, 2009, Fukuoka International Congress Center, Japan, pp. 2280~2285.
 (11) Zhou, C., Cao, Z., Wang, S. and Tan, M., 2008, "The Dynamic Analysis of the Backward Swimming Mode for Biomimetic Carangiform Robotic Fish," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center Nice, France*, Sep., 22-26, 2008, pp. 3072~3076.
 (12) Ferdinand, P., Beer, E., Russell, J. and DeWolf, J.T., 2004 "Beer SI Mechanics of Materials" Third Edition in SI units, McGraw-Hill Inc., New York, pp. 211~223.
 (13) Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M., 2006. "Fluid Mechanics: Fundamentals & Applications." McGraw-Hill Inc., New York, pp. 525~570.
 (14) Siegwart, R. and Wuhmann, T., 2009. "Design of a Diving System for a Robotic Fish" *Bachelor Thesis at ETH Zurich.*, pp. 21~25
 (15) A product Data Sheet of AI Servo Motor RX-64 of ROBOTIS, pp.16~20.