

생체모사 물고기 로봇을 이용한 물고기 운동의 유체역학적 해석

한철희[†] · 이승희^{*} · 신창록^{*} · 박종현^{**}

Hydrodynamics Analysis of Fish Locomotion Using a Biomimetic Fish Robot

Cheolheui Han[†], Seunghee Lee^{*}, Chang-Rok Shin^{*} and Jong Hyeon Park^{**}

Key Words : Biomimetics(생체모사), Fish Robot(로봇 물고기), Bio-External Fluid Mechanics(생체유체역학)

Abstract

Fish-mimetic robots or fish-mimetic propulsors have been developed or under construction. A mechanical system cannot have the same functions as bio-organic systems. Thus, the hydrodynamic characteristics of fish locomotion should be well understood in order to develop and control a feasible intelligent fish-mimetic robot with its optimal motion pattern known. In this paper, a mackerel-mimetic robot fish is fabricated in order to understand the hydrodynamic characteristics of fish locomotion. A simplified unsteady flow theory is also applied to the hydrodynamic analysis of the motion of the anterior part of the robotic fish. The normal and axial forces of the fish are measured by changing the amplitude and frequencies of fanning motion. It is found that the present theoretical results agree with the measured data.

1. 서론

산업 발달과 인구증가에 기인한 자원고갈, 대규모 식량창고인 해양 생태 파괴 등의 에너지·환경 문제로 인해 이미 몇몇 공업선진국들은 오래 전부터 해양자원 활용 및 해양생태계 보존에 끊임없는 관심을 가지고 많은 연구를 수행해 왔다. 그러나 바다 속 환경은 대기권 밖 우주의 환경만큼이나 접근하기 어려운 기술적 제약조건들이 많이 존재하여, 그 동안의 많은 연구에도 불구하고 바다 속은 여전히 미지의 세계이다.

자연에 존재하는 생물체 들은 적자생존의 치열한 경쟁과 극심한 자연환경에서 살아남기 위해 나름대로 진화과정을 통해 해결책을 모색해 왔다. 따라서, 자연생물체들이 가지고 있는 다양한 특성을 잘 이해하고 이를 공학적으로 이용할 경우 기

존의 공학적 문제가 쉽게 해결될 수 있다.

최근 지능형재료·MEMS 관련 기술의 급격한 발달과 함께, 자연생물체를 모사하려는 생체모사학(Biomimetics)관련 연구⁽²⁾ 들이 활발히 진행되고 있다. 이중 물고기 모사 로봇(Fish-Mimetic Robot; 이하 FMR)은 프로펠러로 구동되는 수중 탐사정에 비해 높은 추진 효율로 이동 가능하고, 광범위한 지역의 해저 생태계관찰에 용이하기 때문에, 자율무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle; 이하 AUV) 및 어뢰 개발 등에 적용되는 연구가 많이 이루어 지고 있다. 그러나, 물고기 모사 로봇 관련 연구들은 주로 로보틱스 관련 연구자들이 일부 물고기의 형상과 운동을 단순 모사하여 제작하고 있기 때문에 유체역학적 지식을 바탕으로 한 고성능 고효율의 물고기 로봇 관련 연구가 적다. 또한, 물고기의 생물학적 특성을 기계시스템으로 구현하는데 한계가 있으며, 이를 극복하기 위해서는 FMR이 작동할 때 발생하는 유체력에 대한 이해를 바탕으로 비선형 제어기법을 구현할 수 있어야 할 것이다.

본 연구에서는 고등어를 모사한 3 자유도의 FMR 을 제작하고 FMR 의 운동변수의 변화에 따

[†] 책임저자, 정회원, 충주대학교 항공기계설계학과
E-mail : chhan@cjnu.ac.kr
TEL : (043)820-5379 FAX : (043)820-5370

^{*} 한양대학교 대학원 기계공학과

^{**} 한양대학교 기계공학부

른 FMR 에서 발생하는 힘의 특성을 밝히고자 하였다.

2. FMR 및 실험장치 제작

Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 제작된 FMR 은 3 개의 DC 서보모터와 꼬리로 이루어져 있다. 사용된 모터의 사양은 Table 1과 같다. 표에 표시된 최대 속도는 부하가 없는 상태에서 측정된 것이므로 FMR 로 만들어진 상태에서는 사양에 비해 더 작은 최대 속도를 갖게 되며 실험을 통해 각 모터의 최대 가능 속도를 측정하여 실험 범위에 적용해야 한다.

FMR 내부의 모터 및 전자장치는 습기에 취약하므로 방수를 위해 늘어날 때 저항이 적으면서 물의 침투를 효과적으로 막을 수 있는 라텍스 필름으로 방수처리 한 후 고등어의 형상에 맞추어 실리콘으로 외형을 성형하였다. 실리콘의 선정기준은 링크와 링크 사이의 연결부위에서 실리콘이 늘어남으로 인한 에너지 손실을 최소화 하기 위해 신률(원형상태에서 최대로 늘어나는 비율)을 중요한 요소로 고려하였으며 내구성 및 비중 또한 고려하여 선정하였다. 선정된 실리콘의 신률은 1000%이다. FMR 이 구속되지 않은 상태에서는 물이 FMR 에 가하는 힘을 측정하기 어렵다. 본 연구에서는 FMR 이 받는 힘과 토크를 측정하기 위해 FMR 머리부분에 고정부를 두고 이 고정부에 알루미늄 막대를 부착하여 물고기가 수중에서 움직일 때 발생하는 힘을 측정하였다. 머리에서 받는 힘이 센서에 도달하기 전에 생길 수 있는 왜곡이 최소화 되도록 알루미늄 막대의 두께를 30mm로 하였다. 실험을 통해 FMR 의 움직임과 외력과의 상관관계를 찾기 위해서는 FMR 이 받는 모든 방향의 힘과 모멘트를 알아야 한다. 이중 필요한

Table 1 Motor specification

Weight	Gear Reduction	Maximum holding torque	Sec/60degree
66(g)	192.6	10.2(Kgf · cm)	0.15

Table 2 Force/torque sensor specification

Fx, Fy	Fz	Tx, Ty, Tz
59(kgf)	118(kgf)	2(Nm)
Resolution	Resolution	Resolution
0.003	0.006	0.0001



Fig. 1 Fish Mimetic Robot(FMR)

주된 힘은 FMR 의 앞 방향으로의 힘(F_x), 옆 방향으로의 힘 (F_y) 와 수직 토크(T_z)이다. 힘 정보를 최소한의 왜곡으로 획득하기 위해서는 6축 힘/토크 센서를 사용하는 것이 중요하다. 본 연구에서 선행실험으로 x 방향과 y 방향의 힘을 측정하기 위한 2 개의 로드셀과 수직토크 측정을 위한 하나의 토크센서를 사용하였는데, 로드셀의 연결 구조와 보정과정이 복잡하고, 변형이 일어나지 않아야 하는 방향으로 로드셀의 변형이 일어나 힘의 측정 결과가 큰 의미를 갖지 못하였다. 본 연구에 사용된 6축 힘/토크 센서의 사양은 Table 2 와 같다. 힘/토크 센서는 Fig. 2 와 같이 FMR 머리에 고정된 알루미늄 막대와 연결한 후 관성이 큰 알루미늄 판과 체결하였다. 꼬리는 1mm 두께의 유연한 금속판을 고등어의 꼬리와 유사한 형상으로 절단하고 몸통과 같은 재료의 실리콘으로 성형하여 꼬리 링크에 고정하였다. 꼬리의 높이는 추력을 크게 하기 위해 몸통높이(50mm)의 두 배로 설계되었다. 제작된 꼬리의 면적은 2398 mm^2 이며, 이는 전체면적의 17%정도가 된다.



Fig. 2 6-axis force/torque sensor

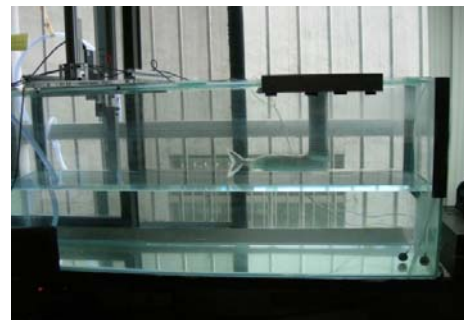


Fig. 3 Experimental Setup

FMR 의 전체 길이는 330mm 이며, 중량은 0.53kg 이다. 실험은 Fig. 3 와 같이 수조에서 진행되었는데, 제작된 수조의 크기는 1350×420×600(mm)이며, FMR 의 중심과 수조 바닥까지의 거리는 300mm 이다. 수조에는 물은 500mm 의 높이로 채웠으며, FMR 의 머리끝에서 수조 앞면까지의 거리는 300mm 이다.

3. FMR 에서 발생하는 유체력 해석

FMR 의 운동학

Fig. 4 에 물고기 고정 좌표계를 나타내었다. 실험에 사용될 FMR 은 실제 진행이나 회전이 존재하지 않으므로 FMR 의 머리에 고정된 좌표계 (body-fixed coordinate)를 이용하여 표현했다. 이후에 표현되는 모든 좌표는 물고기 고정 좌표계를 기준으로 한다. Table 3 에는 각 링크의 실제 길이 정보를 표시하였으며, 여기서 l_{3f} 는 링크 2 의 끝단에서 꼬리의 1/2c(quarter-chord point)까지의 거리이다. Fig. 4 에서 P_p' 는 꼬리의 quarter-chord point 이고, 식(1)로 표현된다. 유체 내부에서 동작하는 강체와 유체 사이의 힘의 대부분은 유체와 강체 사이의 상대 속도의 함수이므로 P_p' 의 속도를 필요로 하며 이는 식(2)로 표현된다.

FMR 의 BSF(Body Shape Function)

진행파형으로 undulation motion 을 하는 물고기의 몸의 시간과 거리에 따른 형상은 Lighthill⁽¹⁾이 제안한 함수를 사용하였다.

$$y(x,t) = (C_1x + C_2x^2)\sin(\omega t + \phi x) \quad (3)$$

식(3)에서 x 와 y 는 머리에 고정된 좌표계에서 정의된 바와 같으며, C_1 은 선형 증가 항에 대한 계수, C_2 는 2 차 증가 항에 대한 계수, ω 는 파동 운동의 각속도, ϕ 는 파동차수를 나타낸다. 식(3) 이 물고기의 운동을 세세한 부분까지 표현하지는 못하지만, 적은 계수의 수로 파동운동을 효과적으로 표현할 수 있으므로 유용하다. FMR 을 사용한 실험은 식(3)으로 표현되는 BSF 의 계수값들을 변

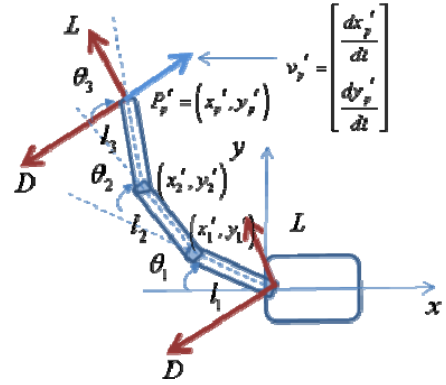


Fig. 4 Nomenclature of the robot fish kinematics.

Table 3 FMR link specification

l_0	l_1	l_2	l_3	l_{3f}
65	57	57	105	81

화시켜 이들 계수값들의 변화에 따른 힘의 변화를 측정하였다. 링크나 꼬리의 강성을 고려하지 않은 경우, 제작된 로봇은 3 자유도를 가지며, $y(x,t)$ 에 대한 각 링크의 각도와 각속도는 다음의 식으로 나타난다.

$$\theta_1(t) = \text{atan2}(y(l_1,t), l_1) \quad (4)$$

$$\theta_2(t) = \text{atan2}(y(l_2,t) - y(l_1,t), l_2) - \theta_1(t) \quad (5)$$

$$\theta_3(t) = \text{atan2}(y(l_3,t) - y(l_2,t), l_3) - \theta_2(t) \quad (6)$$

식(3)의 BSF 를 FMR 에 적용할 경우 직진의 특성만을 관찰할 수 있다. 그러나, 실제 물고기는 파동 중심각의 이동, 근육의 이완 및 강직, 가슴지느러미 등을 이용하여 회전 및 조향을 한다. 조향을 할 경우 파동운동의 편향 보다는 근육의 이완이 에너지 효율면에서 유리할 것으로 판단되나, 모터의 제어에 한계가 있고, 그에 따른 BSF 를 찾는 것도 매우 어려운 문제이다. 본 연구에서는 조향 특성을 알아보기 위해 BSF 의 중심 각도를 변화시키는 방법을 제안하였다. Jenhwa 등⁽⁵⁾은 BSF 의 식에 편향을 주는 방법을 사용하였으나, 이는 모터 각도로 변환되었을 때 결과를 예측하기 어려우

$$P_p' = \begin{bmatrix} x_p' \\ y_p' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 c(\theta_1) - l_2 c(\theta_1 + \theta_2) - l_{3f} c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_1 s(\theta_1) + l_2 s(\theta_1 + \theta_2) + l_{3f} s(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$v_p' = \begin{bmatrix} \dot{x}_p' \\ \dot{y}_p' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \dot{\theta}_1 s(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) s(\theta_1 + \theta_2) + l_{3f} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) s(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_1 \dot{\theta}_1 c(\theta_1) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) c(\theta_1 + \theta_2) + l_{3f} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 다음의 식을 통해 θ 에 대한 선형적인 편향을 주는 방법을 고안했다.

$$\theta_3(t) = \text{atan2}(y(l_3, t) - y(l_2, t), l_3) - \theta_2(t) + \theta \quad (7)$$

여기서, θ 는 파동운동의 편심 각도이다.

외력 계산

힘/토크 센서에 고정되어 있는 FMR 의 파동운동과 FMR 의 운동으로 인해 발생하는 힘 사이의 관계를 사용하여 진행되는 FMR 의 제어에 확장 적용하기 위해서는 FMR 의 운동과 힘 사이의 관계를 규정하고 그에 따른 계수를 결정해야 한다. 꼬리가 머리에 전달하는 주된 힘은 꼬리에 대한 물의 상대속도 방향에 평행한 힘인 항력(drag force: D_f)과 직각인 양력(lift force: L_f)이다. 본 연구에서는 물의 흐름이 없고 FMR 이 진행하지 않으므로 물과 꼬리의 상대속도는 꼬리의 속도와 같다고 가정한다. Mason⁽³⁾과 Junzhi⁽⁴⁾의 결과를 응용하면 꼬리에 가해지는 항력과 양력은 다음의 식으로 유도된다.

$$D_f = -2\pi\rho_f l_f^2 \frac{\|\vec{v}_p'\|^2 - (\vec{v}_p' \cdot \vec{l}_e)^2}{\|\vec{v}_p'\|} \quad (8)$$

$$L_f = \pi\rho_f l_f d (\vec{v}_p' \times \vec{l}_e) \times \vec{v}_p' \quad (9)$$

여기서 ρ_f 는 유체의 밀도, l_f 는 꼬리의 chord, d 는 꼬리의 높이, \vec{l}_e 는 꼬리의 단위 벡터이다. 식(8)에서 D_f 는 꼬리와 물의 상대속도 중 꼬리의 직각 방향의 속도의 제곱에 비례하는 힘이 \vec{v}_p' 의 방향으로 가해진다는 것이며, 식(9)는 꼬리와 물의 상대속도 중 꼬리의 수평방향의 속도의 제곱에 비례하는 힘이 \vec{v}_p' 에 수직인 방향으로 가해진다는 것이다. FMR 이 진행하지 않은 경우 몸통의 물에 대한 상대속도가 매우 작으므로 대부분의 항력과 양력은 꼬리로부터 생긴다. 그러나, 진행이 있을 경우 몸통에도 항력과 양력이 크게 작용하므로 이를 고려할 필요가 있다. 머리, 꼬리 및 몸통을 이루는 링크에 대한 항력과 양력은 다음의 식으로 표현된다.

$$D_i = C_{D_i} \vec{v}_i' \frac{\|\vec{v}_i'\|^2 - (\vec{v}_i' \cdot \vec{l}_{ie})^2}{\|\vec{v}_i'\|} \quad (12)$$

$$L_i = C_{L_i} (\vec{v}_i' \times \vec{l}_{ie}) \times \vec{v}_i' \quad (13)$$

여기서 l_{fi} 는 각 링크의 chord, \vec{v}_i' 는 각 링크의 quarter-chord 위치에서의 물과의 상대속도, \vec{l}_{ie} 는

각 링크의 단위 벡터를 나타내며, C_{D_i} 와 C_{L_i} 는 각 링크의 항력과 양력 계수이다.

4. 결과 및 고찰

FMR 의 움직임에 따른 양력과 항력계수값의 변화를 알아내기 위해, 꼬리 링크만을 움직여 실험을 수행하였다. BSF 를 정의하는 계수 값들의 변화와 힘의 변화 사이의 관계를 알아보았다. FMR 이 물속에서 움직일 때 링크의 유연성 및 유격에 의하여 관성력에 의한 축력과 횡력이 발생한다. FMR 에 미치는 순수한 유체의 힘을 측정하기 위해 물속에서 실험한 결과 값에서 물이 없는 상태에서 측정된 결과값을 뺀 값을 사용하였다.

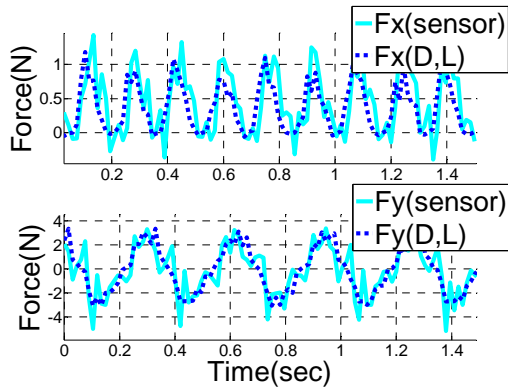
꼬리의 항력과 양력계수(C_{D_f} , C_{L_f})를 알아내기 위한 실험은 3 개의 모터 중 꼬리의 모터만을 몇 가지 주파수와 진폭으로 진동시켜 실험하였다. 꼬리의 각도인 θ_3 가 $0.1745\sin(2\pi\omega t)$ 와 $0.3491\sin(2\pi\omega t)$ 를 갖는 경우에 대하여 진행하였고, ω 는 $0.6\pi \sim 6\pi$ 를 균등히 나누어 실험하였다. 실험 결과를 토대로 식(12) 및 식(13)을 사용하여 추정된 축력 및 횡력에 대하여 측정된 힘의 오차가 최소화 되도록 C_{D_f} 와 C_{L_f} 를 정하였다(C_{D_f} : 12.267, C_{L_f} : 2.6).

Fig. 5 (a), (c)는 실험 결과로부터 얻은 F_x , F_y 그리고 계산식을 사용하여 추측한 $F_x(D, L)$, $F_y(D, L)$ 의 값과 차이를 나타낸 그림이다. 그림에서 계산식을 사용한 결과와 계측한 값이 유사함을 보이는데, 이로부터, 항력과 양력의 계수가 타당하게 정해졌음을 알 수 있다. Fig. 5 (b)는 모터의 명령위치와 실제 위치를 나타낸다. 향후 고정된 상태에서의 계측 값을 활용하여 일정속도로 움직이는 FMR 의 유체력 해석 및 제어에 적용 가능할 것이다.

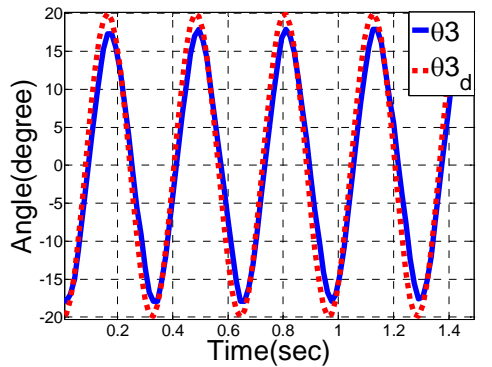
BSF 의 계수값의 변화가 축력과 횡력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 BSF 를 정의하는 5 개의 계수 값 모두를 변화시키며 실험하였다. 실험은 각 계수의 기준 값을 정하고, 변화되지 않는 계수는 기준 값을 갖도록 하였다. 실험계수의 기준 값은 C_1 : 0.1, C_2 : 1.5, ω : 1, ϕ : 0, θ : 0 이다. 5 개의 각 실험에서 계수의 범위는 Table 4 와 같다.

Table 4 Test Cases

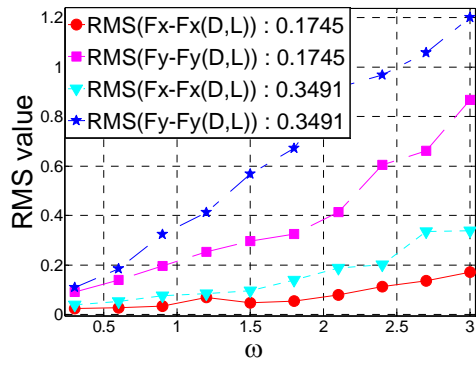
EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5
ω :	C_1 :	C_2 :	ϕ :	θ :
0.6π	0.05	0.2	0	-30 ~ 30
$\sim 3\pi$	~ 0.45	~ 2.4	~ 10	degree



(a) F_x, F_y for $\theta_3 = 0.3491\sin(6.6\pi t)$

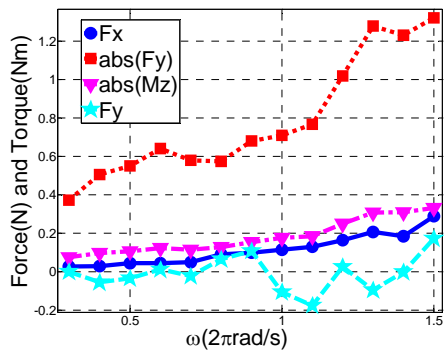


(b) Desired and actual motor angle

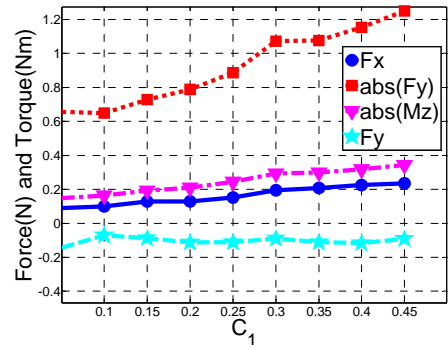


(c) Force estimation error

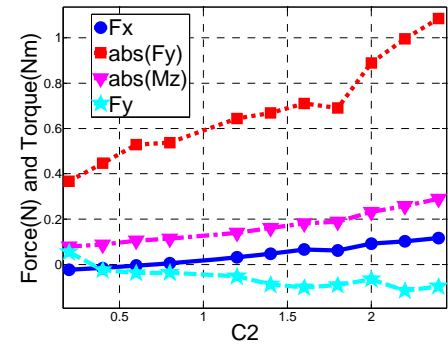
Fig. 5 Hydrodynamic forces, motor angle and force estimation error



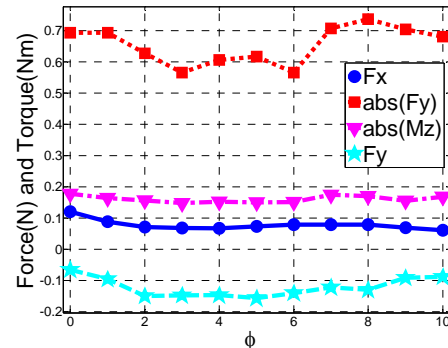
(a) Average force and torque(EXP1)



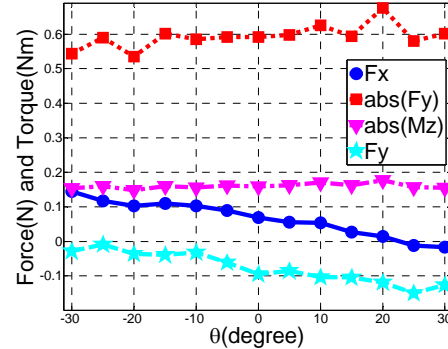
(b) Average force and torque(EXP2)



(c) Average force and torque(EXP3)



(d) Average force and torque(EXP4)



(e) Average force and torque(EXP5)

Fig. 6 Hydrodynamic forces for 5 test cases.

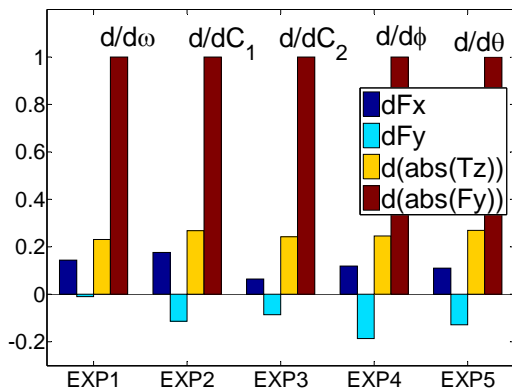


Fig. 7 Normalized force difference with respect to the change of BSF coefficients.

각 계수는 측정범위 내에서 균등하게 나누어 실험하였다.

Fig. 6 에 계수 값의 변화에 따른 평균 힘의 변화를 나타내었다. ϕ 와 θ 를 변화시킨 경우를 제외하고 나머지 계수 값들을 변화시킨 경우, 계수 값의 증가에 따라 평균 축력이 선형적으로 증가한다. Fig. 6 (e)에서 확인할 수 있듯이 BSF 를 편향시켰을 때 F_y 도 역시 편향됨을 알 수 있다. 이 결과는 제안된 확장 BSF 로 FMR 을 조향할 수 있다는 것을 의미하며, 토크의 평균이 증가하거나 감소하지 않는 것으로 보아 미끄러짐(drift) 운동이 가능하다는 것을 의미한다. 실험결과에서 축력이 매우 작게 나오는 경향이 있는데, FMR 이 진행할 경우에는 몸통의 회전이 존재하므로 횡력으로 작용하던 힘이 전역 좌표계에서는 축력으로 작용하게 되어 빠른 이동이 가능하다.

Fig. 7 은 각 실험의 결과에서 계수값의 변화에 따른 힘의 변화를 평균하여 이를 계수의 변화에 따른 $abs(F_y)$ 의 변화로 나누어 표준화 한 것이다. 표준화 결과 C_1 을 변화할 때가 다른 계수를 변화할 때보다 F_y 의 절대값이 커지는 비율에 비해 축력이 커짐을 알 수 있다. F_y 가 커지는 것은 에너지의 손실을 의미하므로, 실험의 기준 계수에서 에너지 증가에 비해 축력이 가장 커지게 하기 위해서는 C_1 을 변화하는 것이 유리하다.

5. 결론

고등어의 형상을 갖는 3 자유도의 생체 모방 로봇을 제작하였으며, 로봇의 움직임에 따른 물과의 힘 상관관계를 밝히기 위해 6 축 힘/토크 센서를 장착하였고, 로봇의 조향 능력을 알아보기 위해 확장된 파동운동 함수를 제안하였다. 물고기 로봇

의 꼬리에 가해지는 항력과 양력을 나타내는 식을 유도하였고, 꼬리의 반복운동 실험을 통해 계산식이 타당함을 입증하였다. 입증된 항력과 양력 계산식을 사용하여 고정된 물고기 로봇뿐 아니라 물고기 로봇이 이동을 하는 경우에도 계산식을 적용할 수 있다. 파동운동 함수의 계수 변화를 실험하여 계수의 변화와 축력, 횡력의 상관관계를 밝혔으며, C_1 값의 변화가 축력의 변화에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한, 기준 계수 집합에서 변화하였을 경우 효율이 높은 계수를 찾아낼 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임" (KRF-2005-206-D00007).

참고문헌

- (1) Lighthill, M. J., "Note on the Swimming of Slender Fish", *Journal of Fluid Mechanics.*, Vol. 9, 1960, pp. 305-317.
- (2) Heo S., Wiguna, T., Gu, N.S. G. and Park, H. C., "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, 2007, pp. 36-42.
- (3) Richard Mason, "Fluid Locomotion and Trajectory Planning for Shape-Changing Robots", Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 2003.
- (4) Junzhi Y., Lizhong L. and Long W., "Dynamic Modeling and Experimental Validation of Biomimetic Robotic Fish", Proc. 2006 American Control Conference, 2006, pp. 4129-4134.
- (5) Jenhwa G., Jing-F& Tsai, Fomg-Chen C., Sheng-Wen C., Ye-Sheng H., "Design of a Waypoint-tracking Controller for a Biomimetic-autonomous Underwater Vehicle," Proc. Oceans., 2003, pp. 333-339.