인조 꼬리지느러미가 압전작동기 구동형 생체모사 물고기 로봇의 성능에 미치는 영향

허석* · 박훈철† · 테디 위구나** · 구남서**

Effect of Artificial Caudal Fin on Performance of a Biomimetic Fish Robot Actuated by Piezoelectric Actuators

Seok Heo, Hoon Cheol Park, Wiguna Tedy and Nam Seo Goo

Key Words : Biomimetic(생체모사), Fish Robot(물고기 로봇), Piezoelectric actuator(압전 작동기)

Abstract

This paper presents an experimental and parametric study of a biomimetic fish robot actuated by the Lightweight Piezo-composite Actuator(LIPCA). The biomimetic aspects in this work are the oscillating tail beat motion and shape of caudal fin. Caudal fins that resemble fins of BCF(Body and Caudal fin) mode fish were made in order to perform parametric study concerning the effect of caudal fin characteristics on thrust production at an operating frequency range. The observed caudal fin characteristics are the shape, area, and aspect ratio. It was found that a high aspect ratio caudal fin contributes to high swimming speed. The fish robot was propelled by artificial caudal fins shaped after thunniform-fish and mackerel caudal fins, which have relatively high aspect ratio, produced swimming speed as high as 2.364 cm/s and 2.519 cm/s, respectively, for 300 Vpp input voltage excited at 0.9 Hz. Thrust performance of the biomimetic fish robot was examined by Strouhal number, Froude number, Reynolds number, and Net forward force.

1. 서론

이동성능에 있어서, 생물체의 움직임은 종종 인간이 만든 운송수단들을 뛰어넘는 성능을 보인다. 조류들은 빠르게 이륙하고, 뒤로 이동하거나, 옆으로 비행하고, 그리고 급하게 비행경로를 바꿀 수도 있다[1]. 인간이 만든 대부분의 지상 운행체는 원형의 타이어를 사용하고, 육상동물들보다 빠르게 이동할 수 있다. 그렇지만, 가파른 언덕을 오르거나, 옆으로 이동하는 동물들의 능력은 아직까지 흉내내기 어렵다. 또한, 잠수함은 빠르게 바다 속을 이동할 수 있지만, 물고기는 고효율의 빠른 수영[2], 조용한 추진능력, 순간적인 고속기동, 그리고 탐지되기 어려운 기동 능력이 있다[3]. 연구자들은 이러한 생명체의 장점들을 공학적으로 모방하고자 한다[1,4].

수생동물 분야에서, 연구자들은 집중적으로 물고기의 수영방법에 대한 연구를 수행해왔다[5,6]. 물고기의 수영방법은 두 가지로 분류된다. 물고기 로봇 모델의 기계적 구성뿐만 아니라, 물고기와 물 사이의 유체역학[7], 다른 하나는 물고기 로봇의 움직임 제어와 자동항법에 관한 것이다[7]. 대부분의 물고기 로봇은 모터 또는 지능재료를 작동기로 사용하고 있다[3-4,7-11].

본 논문에서는 유니모프 압전세라믹 작동기인 LIPCA(Lightweight Piezo-Composite Actuator)[12]에 의해 작동하는 생체모사 물고기 로봇의 실험적인 변수 연구에 초점을 두었다. 압전형 경량 복합재료 작동기인 LIPCA 는 전기 모터에 비해 매우 작은 소음을 발생하므로, 로봇 물고기의 작동기로 훌륭히 사용되어질 수 있다. 또한, 현재의 물고기

---

† 회원, 건국대학교 신기술융합학과
E-mail : hcpark@konkuk.ac.kr
TEL : (02)450-3531 FAX : (02)444-7091
* 건국대학교 인공근육연구센터
** 건국대학교 신기술융합학과

로봇은 LIPCA 작동기로 구성된 구동 시스템이 상대적으로 가벼워, 몸체에 더 탑재량을 늘릴 수 있고 부력을 쉽게 조절할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 인조 꼬리지느러미(caudal fin)을 물고기 로봇에 부착하여 수영 실험을 통하여 결과들을 관찰하였다. 실험적으로 계측한 물고기 로봇의 추력 성능은 스트로홀 수(Strouhal number), 프루드 수(Froude number), 레이놀즈 수(Reynolds number), 그리고 전진 방향의 전체 힘(Net forward force)를 비교함으로써 검토하였다. 물고기 로봇의 전진 방향의 전체 힘은 충격량-운동량 방정식에 의해 근사하였다.

2. 설 계

2.1 물고기 로봇의 모델 설명

생체모사 물고기 로봇은 두 개의 LIPCA 작동기, 4 바 링크시스템, 인조 꼬리지느러미, 지지대, 방수, 더미 중량, 그리고 몸체로 구성된다. 링크시스템을 연결하기 위한 지지대와 두 개의 LIPCA 작동기는 단순지지 조건으로 구성되었다. 이 작동 시스템은 방수되어진 몸체 안에 둘러싸여진다.

배지느러미(Ventral fin)은 몸체가 옆으로 기우는 현상을 줄이기 위하여 몸체의 뒤에 부착하였으며, 꼬리지느러미는 몸체의 끝부분에 조립되었다. 전체 물고기 로봇은 길이 27cm, 폭 5cm, 높이 6.5cm, 무게 550g 을 갖는다. Fig. 1 은 물고기 로봇을 보여주고 있으며, 물고기 로봇 및 작동장치에 대한 자세한 설명은 참고문헌[13]을 참고하기 바란다.

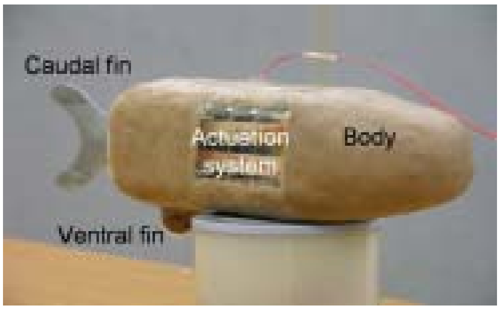

Fig. 1 Biomimetic fish robot

2.2 꼬리지느러미(Caudal fin)

본 연구에서는 BCF(Body and Caudal fin)모드를 모사한 꼬리지느러미와 Mackerel 을 모사한 꼬리지느러미 두 종류의 꼬리지느러미를 사용하였다.

BCF 모드를 모사한 꼬리지느러미들은 4 개의 다른 형태로 구성되었는데, Fig. 2 에 도시한 Ostraciiform, Subcarangiform, Carangiform, 그리고 Thunniform, 꼬리지느러미이다. 이들 인조 꼬리지느러미는 0.9mm 의 두께를 갖는 폴리프로필렌을 이용하여 제작하였다. 본 실험에서는 폭과 높이가 같은 크기를 갖는 4 가지의 인조 꼬리지느러미를 이용하여 물고기 로봇의 수영 성능을 비교하였다. 각각의 인조 꼬리지느러미는 Table 1 에 보이는 바와 같은 면적(Specific area)와 가로-세로비(Aspect ratio)를 갖는다. 가로-세로비는 꼬리지느러미 폭(Span)의 제곱 값을 면적(Area)으로 나눈 값이다.

Fig. 3 에는 실제 고등어(Mackerel) 꼬리지느러미의 형상을 모방한 인조 꼬리지느러미를 보여준다. 불균일한 꼬리지느러미(VTF)의 경우 꼬리자루(Peduncle)로부터 끝단으로 갈수록 두께가 줄어든다(Fig. 3(a)). 이러한 두께의 변화는 실제 고등어 꼬리지느러미의 두께를 계측하여 모사한 것이다. 다른 세 개의 꼬리지느러미들은 각각 동일한 두께를 갖는다(Fig. 3(b)). Table 2 는 고등어 꼬리지느러미를 모방한 인조 꼬리지느러미들의 두께, 면적, 그리고 가로-세로비를 보여준다.

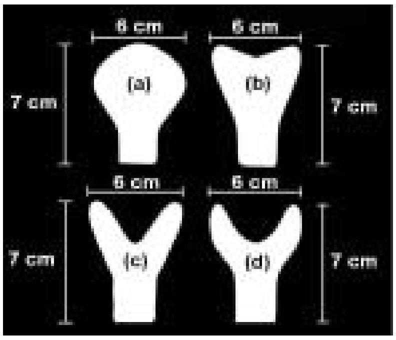

Fig. 2 BCF mode-mimicking caudal fin (a)Ostraciiform, (b)Subcarangiform, (c)Carangiform, and (d) Thunniform caudal fins

Table 1 Properties of BCF mode-mimicking caudal fins

Caudal Fin	Area (cm^2)	Aspect Ratio
Ostraciiform	22	1.64
Subcarangiform		
Carangiform	15	2.4
Thunniform		

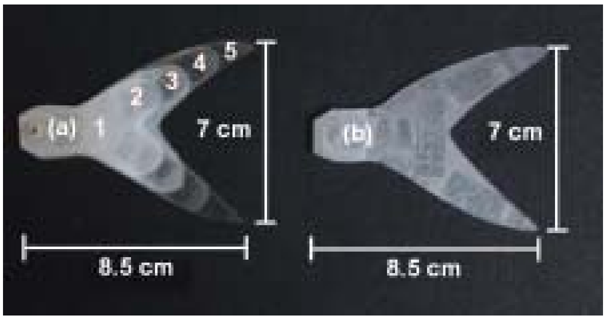

Fig. 3 Mackerel-mimicking caudal fins: with variable thickness (a) and uniform thickness (b)

Table 2 Properties of mackerel-mimicking caudal fins

Caudal fin	Thickness (mm)					Area (cm^2)	Aspect Ratio
Variable (VTF)	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 5		
	1.972	1.818	1.455	0.522	0.212	17.5	2.8
Thin (TNF)	0.7 (uniform)						
Medium (MDF)	0.955 (uniform)						
Thick (THF)	2.734 (uniform)						

3. 수영 실험

수영 실험은 크기가 100 cm×50 cm×40 cm 인 수조에 물을 15 cm 깊이로 채우고 수행되었다. 고전압 전원 공급기(Matsusada, AMT-1.5B40-LC)와 함수발생기(Protek 9205C)를 이용하여 물고기 로봇에 사각파의 구동주파수를 인가하고, 오실로스코프(Tektronics, TDS2024)를 이용하여 모니터링하였다. 모사한 물고기 로봇의 수영 성능은 스트로홀 수(Strouhal number)를 이용하여 실제 물고기와 비교할 수 있다. 스트로홀 수는 추력을 알기 위한 것으로 비정상 힘(unsteady force)와 관성력(inertial force)와의 비를 의미하며, 수식적으로는 다음과 같이 표현된다[5].

$$Strouhal\ number\ = \frac{f \cdot A}{U}, \tag{1}$$

여기서, f, A, 그리고 U 는 각각 꼬리치는 주파수, 꼬리치는 진폭, 그리고 수영 속도를 나타낸다.

프루우드 수(Froude number)는 중력(gravity force)에 대한 관성력의 비로 기동성을 알기 위한 것이다[5].

$$Froude\ Number = \frac{U}{\sqrt{gL}}, \tag{2}$$

여기서, g, L 은 중력가속도(9.8 m/s^2), 물고기 로봇의 길이를 나타낸다.

레이놀즈 수(Reynolda number)는 점성력(viscous force)에 대한 관성력의 비로 나타낸다[5].

$$Reynolds\ number = \frac{UL}{\upsilon}, \tag{3}$$

여기서 υ 는 물의 점성도(10^{-6} m^2/s)이다.

물고기 로봇을 구동하기 위하여, 두 개의 LIPCA 작동기에 300 Vpp 를 사각파형으로 인가하였다. 주파수는 0.6 Hz~1.2 Hz 사이에 7 종류의 주파수를 선정하였다. 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위하여 하나의 구동주파수마다 10 번의 시험을 수행하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 수영 속도

대부분의 실험에서, 수영속도는 인가된 구동주파수가 0.9 Hz 에 이를때까지 증가하였으며, 0.9 Hz 이후에는 감소하는 경향을 보였다. Ostraciiform, Subcarangiform, Carangiform, Thunniform 꼬리지느러미로 구동되는 물고기 로봇의 최고 수영속도는 각각 2.079 cm/s, 2.061 cm/s, 2.352 cm/s, 그리고 2.364 cm/s 이었다(Fig. 4). 가장 빠른 수영속도는 Thunniform 과 Carangiform 꼬리지느러미에 의해 얻어졌는데, 이것은 상대적으로 작은 면적과 높은 가로-세로비를 갖는 것 이다(Table 1). 이 결과는 Ostraciiform 과 Subcarangiform 꼬리지느러미가 큰 면적과 작은 가로-세로비를 갖지만 수영속도는 더 작은것을 보여준다. 따라서, 가로-세로비가 높은 꼬리지느러미는 동일한 스팬(span)과 길이(length)를 갖는 모든 꼬리지느러미에 대하여 높은 수영속도를 발생할 수 있음을 의미한다. Thunniform 과 Carangiform 꼬리지느러미는 각각의 구동주파수에 대하여 매우 유사한 수영속도를 보였다. 이러한 결과로 미루어볼때, 수영속도는 꼬리지느러미의 형상(shape)보다 면적(area)와 가로-세로비(aspect ratio)에 더 영향을 받는것을 알 수 있다.

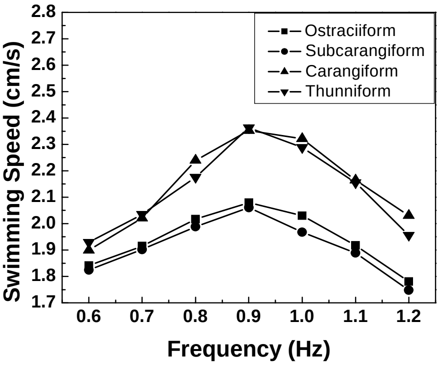

Fig. 4 Swimming speed vs. frequency for BCF mode-mimicking caudal fins

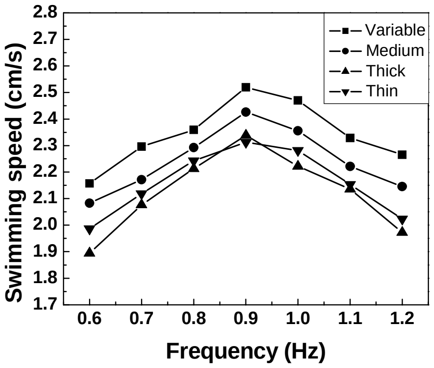

Fig. 5 Swimming speed vs. frequency For mackerel-mimicking caudal fins

고등어 모사 꼬리지느러미인 VTF, TNF, MDF 및 THF 로 추진되는 물고기 로봇의 최대 수영속도는 각각 2.519 cm/s, 2.313 cm/s, 2.426 cm/s, 2.338 cm/s 이다(Fig. 5). VTF 에 의해 추진되는 경우가 가장 빠른 수영속도를 보였고 그 뒤로 MDF, TNF, 그리고 THF 의 순서를 보였다.

4.2 스트로홀 수(Strouhal number)

스트로홀 수는 추력효율에 관한 척도로 구동주파수가 증가함에따라 줄어드는 경향을 보였다. Ostraciiform, Subcarangiform, Carangiform, 그리고 Thunniform 꼬리지느러미를 갖는 물고기 로봇의 스트로홀 수는 각각 0.607~1.140, 0.618~1.151, 0.886~1.422, 0.919~1.399 사이의 값을 보였다(Fig. 6). 고등어 모사 꼬리지느러미인 VTF, TNF, MDF, THF 의 꼬리지느러미를 갖는 물고기 로봇의 스트로홀 수는 각각 0.795~1.391, 0.890~1.511, 0.839~1.441, 0.913~1.583 사이의 값을 갖는다(Fig. 7). 이러한 결과로부터, 본 물고기 로봇의 스트로홀 수는 빠른 수영을 하는 물고기가 갖는 스트로홀 수인 0.25<St#<0.4 의 영역에는 포함되지 못하는것을 확인하였다.

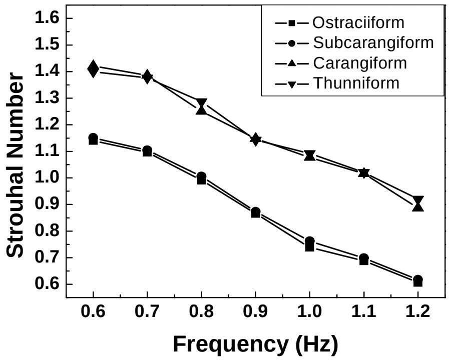

Fig. 6 Strouhal number vs. frequency For BCF mode-mimicking caudal fins

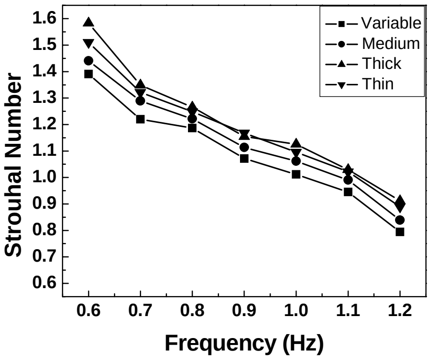

Fig. 7 Strouhal number vs. frequency For mackerel-mimicking caudal fins

4.3 프루드 수(Froude number)

프루드 수는 꼬리치는 주파수가 증가할수록 증가하고, 0.9 Hz 에서 최대값을 갖으며, 0.9 Hz 보다 커지면 그 값이 줄어들었다. Ostraciiform, Subcarangiform, Carangiform, Thunniform 꼬리지느러미를 갖는 물고기 로봇의 프루드 수는 각각 0.01094~0.01279, 0.01075~0.01267, 0.01168~0.01446, 0.01186~ 0.01453 사이의 값을 갖는다(Fig. 8). 고등어 모사 꼬리지느러미인 VTF, TNF, MDF, THF 의 꼬리지느러미를 갖는 물고기 로봇의 프루드 수는 각각 0.01326~0.01549, 0.01221~0.01422, 0.01280~ 0.1491, 0.01165~0.01437 사이의 값을 갖는다(Fig. 9). 이와 같은 작은 프루드 수로부터, 현재의 물고기 로봇의 중력은 물고기 로봇의 관성력보다 큰 영향을 준다고 말할 수 있다. VTF 의 경우에서는 0.9 Hz 의 구동주파수에서 가장 큰 프루드 수를 보이지만 여전히 1 보다 매우 작다. 따라서, 현재의 물고기 로봇은 기동성(maneuverability)이 좋지 않을 것으로 판단된다.

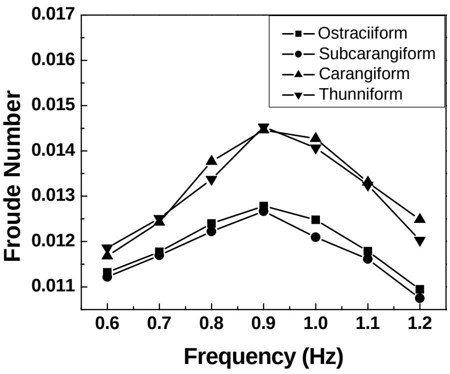

Fig. 8 Froude number vs. frequency For BCF mode-mimicking caudal fins

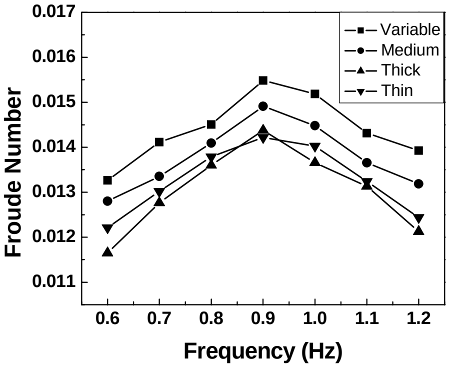

Fig. 9 Froude number vs. frequency For mackerel-mimicking caudal fins

4.4 레이놀즈 수(Reynolds number)

레이놀즈 수의 결과곡선은 앞에서 보인 수영속도와 프루드 수의 결과곡선들과 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 레이놀즈 수는 구동주파수가 증가함에따라 그 값이 증가하였고, 0.9Hz 에서 최대값에 도달하였고, 0.9Hz 이상의 구동주파수에서는 값이 감소하였다. Ostraciiform, Subcarangiform, Carangiform, 그리고 Thunniform 꼬리지느러미를 갖는 물고기 로봇의 레이놀즈 수는 각각 4806.93~5615.51, 4720.49~5564.09, 5128.54~6350.91, 5209.17~6381.26 사이의 값을 갖는다(Fig. 10). 고등어 모사 꼬리지느러미인 VTF, TNF, MDF, THF 의 꼬리지느러미를 갖는 물고기 로봇의 레이놀즈 수는 각각 5824.93~6901.58, 5362.61~6243.82, 5623.03~6549.56, 5115.64~6313.43 사이의 값을 갖는다(Fig. 11). 이 물고기 로봇의 레이놀즈 수가 $10^3<Re\#<10^5$ 의 범위 안에 놓이므로, 물고기 로봇 주위로 흐르는 물의 흐름이 층류에서 난류로 바뀌는 상태일 것으로 예상된다[5].

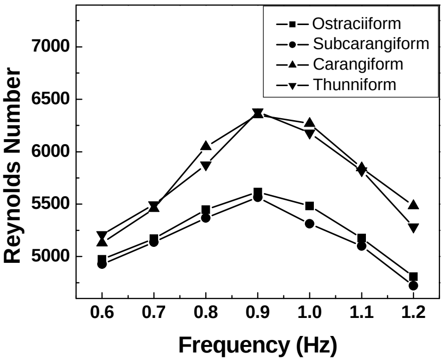

Fig. 10 Reynolds number vs. frequency For BCF mode-mimicking caudal fins

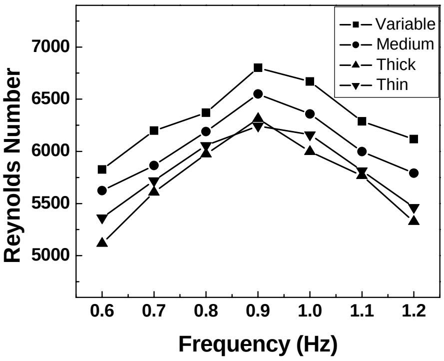

Fig. 11 Reynolds number vs. frequency For mackerel-mimicking caudal fins

4.5 전진 방향 전체 힘(Net forward force)

물고기 로봇의 전진 방향 전체 힘은 충격량-운동량 관계식인 $\int Fdt = m(\Delta U)$ 에 의해 근사되었으며, 수영 가속도는 일정한 것으로 가정하였다. Ostraciiform, Subcarangiform, Carangiform, 그리고 Thunniform 꼬리지느러미를 갖는 물고기 로봇의 최대 전진 방향 전체 힘은 각각 0.9Hz 에서 0.48657mN, 0.47769mN, 0.62221mN, 0.62826mN 의 값으로 계산되었다(Fig. 12). 고등어 모사 꼬리지느러미인 VTF, TNF, MDF, THF 의 꼬리지느러미를 갖는 물고기 로봇의 최대 전진 방향 전체 힘은 각각 0.9Hz 에서 0.71389mN, 0.60147mN, 0.66187mN, 0.61507mN 사이의 값을 갖는다(Fig. 13). 따라서, VTF 를 부착한 물고기 로봇의 경우 가장 좋은 추력결과를 보이는 것으로 나타났다.

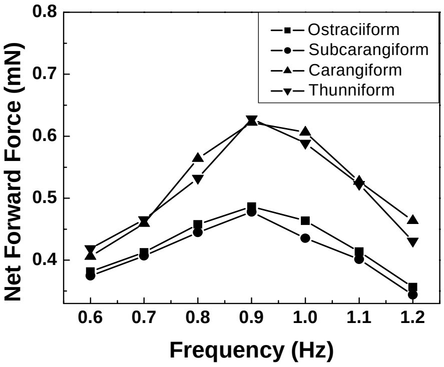

Fig. 12 Net forward force vs. frequency For BCF mode-mimicking caudal fins

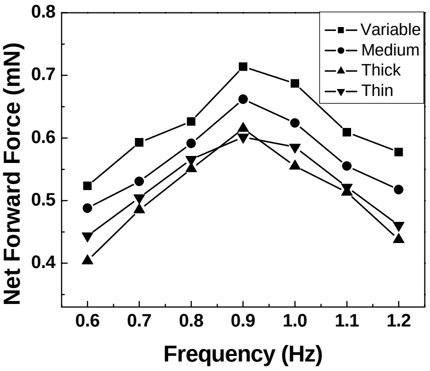

Fig. 13 Net forward force vs. frequency For mackerel-mimicking caudal fins

5. 결 론

본 연구에서는, BCF 모드 물고기의 꼬리지느러미들과 고등어(mackerel)꼬리지느러미를 모사한 인조 꼬리지느러미에 의해 추진되는 물고기 로봇의 수영속도에 대하여, 꼬리지느러미의 꼬리치기 주파수, 형상, 면적, 그리고, 가로-세로비의 영향을 실험적으로 평가하였다. 그 결과, 수영속도는 꼬리지느러미의 꼬리치기 주파수, 면적, 그리고, 가로-세로비에 크게 영향받는것을 확인하였다. 또한, 수영속도에 있어서 꼬리지느러미의 면적과 가로-세로비의 영향은 꼬리지느러미 형상의 영향보다 더 중요함을 알 수 있었다. 작은 면적과 큰 가로-세로비를 갖는 꼬리지느러미는 상대적으로 큰 추력과 빠른 속도를 발생하였다. 인조 고등어 꼬리지느러미를 부착한 물고기 로봇의 수영 실험으로부터, VTF(variable thickness caudal fin)으로 추진되는 물고기 로봇의 성능이 다른 일정한 두께를 갖는 것들보다 더 좋아짐을 확인하였다. 일정한 두께를 갖는 꼬리지느러미들을 비교해보면, MDF 의 경우가 TNF 와 THF 의 경우보다 더 낳았다. 계산된 레이놀즈 수의 결과로부터, 물속에서 물고기 로봇 주위의 물의 흐름은 층류에서 난류로 바뀌는것을 알 수 있었다. 낮은 프루드 수로 본 물고기 로봇은 낮은 기동성을 가짐을 예상할 수 있었다. 스트로홀 수와 전진 방향의 전체 힘의 계산으로부터, 현재의 물고기 로봇이 추력과 속도에 관하여 아직 최적화되지 못하였음을 보여준다.

후 기

본 연구는 한국학술재단(KRF-2006-005-J03301)의 지원을 받아 수행되었다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) M.H. Dickinson, F.O. Lehmann, and S.P. Sane, 1999, "Wing rotation and the aerodynamics basis of insect flight," *Science*, Vol. 284, pp. 1954~1960.

(2) S. Guo, T. Fukuda, and K. Asaka, 2003, "A new type of fish-like underwater microrobot," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 8, pp. 136~141.

(3) M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and J.B.C Davies, 1999, "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 24, pp. 237~252.

(4) M. G. Borgen, G. N. Washington, and G. L. Kinzel, 2003, "Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicles," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 8, pp. 66~76.

(5) P. R. Bandyopadhyay, 2004, "Trends in biorobotic autonomous undersea vehicles," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 29, pp. 1~32.

(6) F. E. Fish, G. V. Lauder, R. Mittal, A. H. Techet, M. S. Triantafyllou, J. A. Walker, and P. W. Webb, 2003, "Conceptual design for the construction of a biorobotic AUV based on biological hydrodynamics," *Proc. 13th Intl. Symp. Unmanned Untethered Submersible Tech.*, Durham, NH, USA.

(7) J. Liu, and H. Hu, 2004, "A 3D simulator for autonomous robotic fish," *Intl. J. Auto. Comp.*, Vol. 1, pp. 42~50.

(8) D. S. Barrett, M.S. Triantafyllou, D.K.P. Yue, M.A. Grosenbaugh, and M.J. Wolfgang, 1999, "Drag reduction in fish-like locomotions," *J. Fluid Mech.*, Vol. 392, pp. 183~212.

(9) J.M. Anderson, and P. A. Kerrebrock, 1999, "The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV): an autonomous robot tuna," *Proc 11th Intl. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Tech.*, Durham, NH, USA.

(10) S. Balakrishnan, and C. Niezrecki, 2002, "Investigation of THUNDER actuators as underwater propulsors," *J. Intel. Mat. Sys. Struc.*, Vol. 13, pp. 193~207.

(11) J. Ayers, C. Wilbur, and C. Olcott, 2000, "Lamprey Robots," *Proc. Intl. Symp. Aqua Biomech.*, Tokyo, Japan.

(12) K.J. Yoon, K.H. Park, S.K. Lee, N.S. Goo, and H.C. Park, 2004, "Analytical design model for a piezo-composite unimorph actuator and its verification using lightweight piezo-composite actuators," *Smart Mat. Struc.*, Vol. 13, pp. 459~467.

(13) 허석, 테디 위구나, 구남서, 박훈철, 2007, "인공근육형 LIPCA 를 이용한 물고기 모방 로봇의 설계, 제작 및 실험," *대한기계학회논문집*, 제 31 권, 제 1 호, pp. 36~42.