

< 논문 >

인공근육형 LIPCA를 이용한 물고기 모방 로봇의 설계, 제작 및 실험

허 석* · 테디 위구나** · 구남서** · 박훈철†
(2006년 5월 30일 접수, 2006년 12월 5일 심사완료)

Mechanical Design, Fabrication and Test of a Biomimetic Fish Robot Using LIPCA as an Artificial Muscle

Seok Heo, T. Wiguna, Nam Seo Goo and Hoon Cheol Park

Key Words: LIPCA(곡면을 갖는 경량형 압전작동기), Biomimetic Fish Robot(물고기 모방 로봇), Caudal Fin(꼬리지느러미), Artificial Muscle(인공근육).

Abstract

This paper presents mechanical design, fabrication and test of a biomimetic fish robot actuated by a unimorph piezoceramic actuator, LIPCA(Lightweight Piezo-Composite curved Actuator.) We have designed a linkage mechanism that can convert bending motion of the LIPCA into the caudal fin movement. This linkage system consists of a rack-pinion system and four-bar linkage. Four types of artificial caudal fins that resemble caudal fin shapes of ostraciiform, subcarangiform, carangiform, and thunniform fish, respectively, are attached to the posterior part of the robotic fish. The swimming test under 300 V_{pp} input with 0.6 Hz to 1.2 Hz frequency was conducted to investigate effect of tail beat frequency and shape of caudal fin on the swimming speed of the robotic fish. At the frequency of 0.9 Hz, the maximum swimming speeds of 1.632 cm/s, 1.776 cm/s, 1.612 cm/s and 1.51 cm/s were reached for fish robots with ostraciiform, subcarangiform, carangiform and thunniform caudal fins, respectively. The Strouhal number, which means the ratio between unsteady force and inertia force, or a measure of thrust efficiency, was calculated in order to examine thrust performance of the present biomimetic fish robot. The calculated Strouhal numbers show that the present robotic fish does not fall into the performance range of a fast swimming robot.

1. 서 론

생물체를 모방하는 연구자들에게 생물체는 단순하지만 의미 있는 움직임을 보여준다. 물속에서 헤엄치는 물고기는 하나의 예이다. 특히, 물고기가 사용하는 최적화된 지느러미는 고효율의 수

영과 조용한 추진운동을 가능하게 할 뿐 아니라 급격하고도 폭발적인 동작도 할 수 있게 한다.⁽¹⁾ 이러한 점은 인공적인 수중체가 가진 추진기 능력을 뛰어넘는 장점이라 말할 수 있다. 이로 인하여 연구자들은 물고기를 모방한 수중체를 제작하기 위하여 물고기의 운동을 관찰하고, 이를 모사하는데 열정을 보이고 있다.⁽²⁾

물고기의 수영에는 BCF (Body and/or Caudal Fin) 운동과 MPF (Median and/or Paired Fin) 운동이 있다. BCF 운동을 하는 물고기는 큰 추진력을 발생하여 빠르게 추진과 가속을 할 수 있으며, MPF 운동을 하는 물고기는 유영하는 능력이 우

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

* 회원, 건국대학교 인공근육연구센터
** 건국대학교 대학원 신기술융합학과

수하다.⁽¹⁾

이제까지 이루어진 물고기 모방 로봇에 대한 연구를 보면, 가장 많이 알려진 MIT의 로보 튜나 (RoboTuna)⁽³⁾와 Draper Lab의 수력(hydraulic actuated)으로 작동되는 VCUUV(Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle)⁽⁴⁾가 있다. 이들 대부분은 모터로 구동되는데, 모터를 구동기로 사용하는 경우에는 전체 무게가 무거워진다. 로봇 물고기 내부에는, 임무수행을 하기 위한 추가적인 장비를 탑재하여야 하는데, 이 경우, 부력과 중력의 균형을 맞추기 위해서는 로봇 물고기의 크기가 커져야 하는 문제가 있다. 또한, 모터는 소음이 커서 수중 피탐지 가능성이 커지고, 전력소모가 상대적으로 큰 것이 또 다른 문제이다.

이로 인하여, 일부 연구자들은 물고기 모방 로봇에 지능재료를 이용하기도 하였다. Borgen 등⁽²⁾은 압전작동기인 THUNDER를 이용하여 소형 수중 운행체를 제작하였고, Ayers 등⁽⁵⁾은 SMA를 이용한 장어류 로봇을 제작하였으며, Guo 등⁽⁶⁾은 ICPF 작동기를 이용한 소형 물고기 로봇을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 단일층 압전 작동기인 LIPCA⁽⁷⁾ (Lightweight Piezo-Composite curved Actuator)를 이용한 물고기 모방 로봇의 설계, 제작 및 실험에 대하여 설명하였다. 압전 작동기를 사용하면, 모터로 구동하는 로봇 물고기에 비하여, 소음발생이 적어 수중 피탐지 가능성이 줄어들고, 무게를 가볍게 할 수 있어서, 여러 가지 목적에 맞는 탑재체를 상대적으로 크기가 작은 로봇 물고기 내부에 장착하여 부력과 균형을 맞추는데 유리한 점이 있다. 개발된 로봇 물고기는 압전 작동기로 구동되는 동력장치와 연결된 꼬리지느러미의 운동에 의하여 추력을 발생한다. 여기서는 주로 꼬리지느러미의 구동주파수와 지느러미의 형상이 추력 및 수중속도에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

2. 설 계(Design)

2.1 로봇 물고기 모델 설계

본 연구에서 개발한 로봇 물고기는 크게 작동기, 기구 시스템, 그리고 꼬리지느러미로 이루어진다. 로봇 플랫폼은 두 개의 LIPCA 작동기를 발사 나무로 제작된 구조물에 단순지지 조건으로

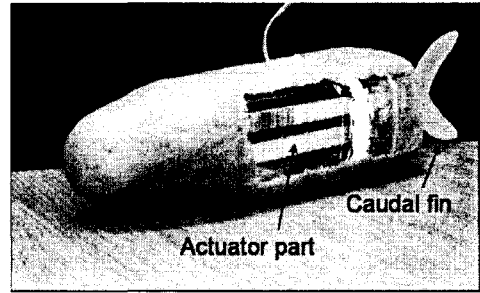


Fig. 1 Biomimetic fish robot

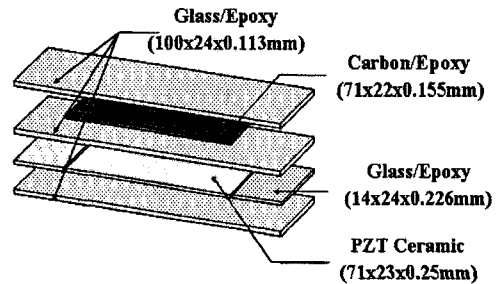


Fig. 2 Configuration and dimension of LIPCA

고정하여 모듈화 하였다. LIPCA 작동기는 랙-피니언 시스템과 4바 링크로 구성된 기구시스템에 연결되어 있으며, 랙-피니언 시스템은 LIPCA 작동기의 굽힘운동을 회전운동으로 바꾸는 역할을 하고, 4바 링크는 회전운동을 이용하여 꼬리지느러미의 운동을 일으킨다.

로봇 플랫폼과 더미중량은 중공의 튜브 안에 넣어 몸체의 안쪽에 위치시켰으며, 더미중량을 이용하여 부력을 조절하였다. 이후의 연구에서 더미중량은 회로시스템과 전원시스템으로 대체될 예정이다. 몸체의 후부위는 유연고무와 실리콘으로 방수하여 물이 스며들지 않도록 하였다. 몸체는 플라스틱 용기 외부에 기름성분이 있는 찰흙을 덮어서 만들었고, 크기는 길이 27cm, 폭 5cm, 그리고 높이 6.5cm 이며 총중량은 550g이다. Fig. 1은 제작된 형상을 보여준다.

2.2 작동기(Actuator)

유리/에폭시 및 탄소/에폭시 층을 갖는 단일층 압전세라믹 작동기, LIPCA⁽⁷⁾는 전기를 인가하여

굽힘운동을 발생할 수 있는 작동기이다. LIPCA의 구조는 Fig. 2에 도시하였다. 두 개의 LIPCA는 Fig. 3과 같이 나란히 단순지지 조건으로 설치하였고, 300V_{pp}의 입력전압을 인가하여 구동한다.

2.3 기구 시스템(Linkage system)

LIPCA의 상하 굽힘운동을 꼬리지느러미 운동으로 변환하는데 사용된 기구 시스템은 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 랙(rack)-피니언(pinion) 시스템과 4바 링크로 구성되어 있다. 랙-피니언 시스템은 두 개의 랙과 하나의 피니언으로 구성되었다. 두 개의 커플러는 철로 된 봉 구조물이며, 짧은 거나 긴 크랭크(long crank)에 연결되어 있다. 이것 중에 짧은 크랭크(short crank)에 꼬리지느러미가 연결된다. 이 작동 시스템에서는 두 개의 LIPCA 작동기가 동일한 동작을 한다. 예를 들면, Fig. 3(a)에서와 같이, 두 개의 LIPCA가 하향 굽힘운동을 하면, LIPCA 작동기에 부착된 랙은 수직 선형운동을 발생하며, 이 운동으로 인하여 두 개의 랙과 접촉하고 있는 피니언은 반시계 방향으로 회전하게 된다. 이때에, 피니언에 부착된 긴 크랭크는 점선으로 도시한 것과 같은 회전운동을 하게 되는데, 이 운동으로 인하여, 긴 크랭크에 부착된 위쪽의 커플러(coupler)는 왼쪽으로 밀리고, 아래의 커플러는 오른쪽으로 밀리게 된다. 이 커플러의 운동은 두 커플러에 부착된 짧은 크랭크의 회전운동을 일으키고, 점선으로 도시한 꼬리지느러미 부착점(caudal fin attachment)의 운동을 발생한다. 두 LIPCA 작동기가 Fig. 3(a)의 화살표 반대 방향으로 작동하면, Fig. 3(a)에 점선으로 도시한 꼬리지느러미 부착점의 운동과 정반대로 움직이게 되므로, 최종적으로는 여기에 부착될 꼬리지느러미는 꼬리치는 반복운동이 가능하게 된다.

랙의 길이는 1.6cm, 기어는 11개의 이를 가지며, 피니언은 8개의 이를 갖고 지름이 4.65mm이다. 긴 크랭크, 짧은 크랭크, 고정 링크와 커플러의 길이는 각각 7.26, 4.85, 54.5, 그리고 55.44mm이다.

2.4 꼬리지느러미(Caudal fin)

BCF 운동을 하는 꼬리지느러미의 수영성능을 비교하기 위해 꼬리지느러미는 Fig. 4와 같이 ostraciiform, subcarangiform, carangiform, 및 thunniform

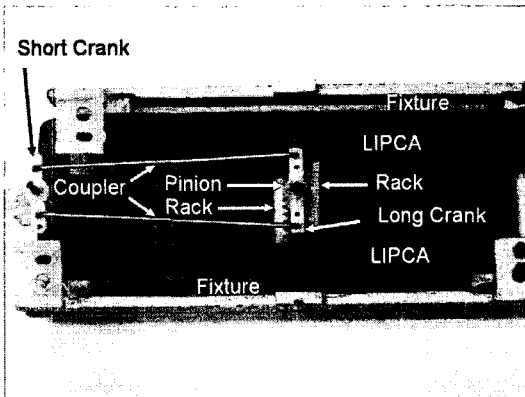
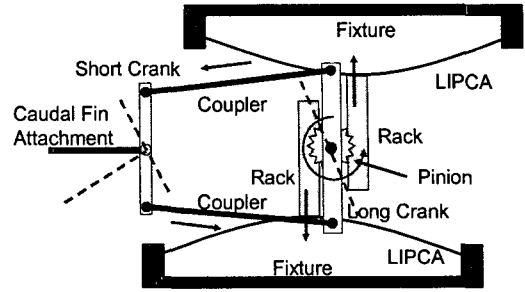


Fig. 3 Linkage system of biomimetic fish robot

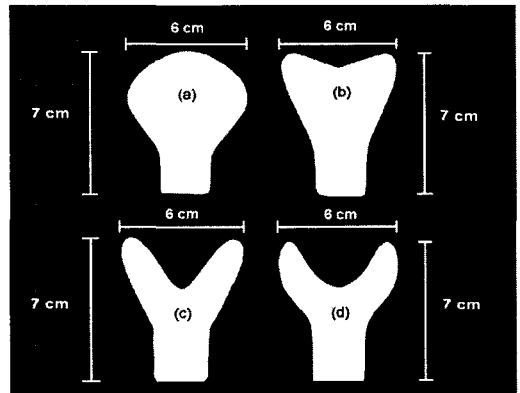


Fig. 4 Shapes of artificial caudal fins: (a) Ostraciiform fin, (b) Subcarangiform fin, (c) Carangiform fin (d) Thunniform fin

물고기의 꼬리지느러미 모양을 모방하고, 0.5mm의 일정한 두께를 갖는 폴리프로필렌 판재를 이용하여 인공 꼬리지느러미를 제작하였다.

각 인공 꼬리지느러미의 면적과 가로세로비

Table 1 Area and aspect ratio of caudal fins

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

($AR = width^2 / Area$)는 Table 1에 나타내었는데, Fig. 4와 같이 꼬리지느러미의 폭과 길이를 각각 6cm와 7cm로 고정시키고 각 경우의 수영성능을 비교하였다.

꼬리지느러미의 형상이 추력발생의 영향에 미치는 영향을 알기 위해서는 모든 경우에 면적과 가로세로비가 같아야 한다. 그러나, 모든 경우에 각각의 형상을 유지하면서 면적과 가로세로비를 일치시키기가 불가능하여, 형상이 서로 유사한 (a)와 (b), 그리고 (c)와 (d)만 면적과 가로세로비를 일치시켰다.

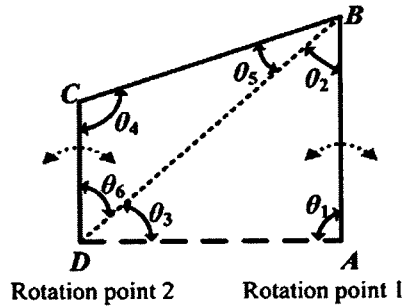
3. 링크의 기구학적 해석

Fig. 5는 Fig. 3의 링크 중 위쪽 절반을 나타낸 개념도이다. 4바 링크는 긴 크랭크 AB, 짧은 크랭크 CD, 커플러 BC로 구성된다. 피니언은 A 지점에 위치하며, 꼬리지느러미는 D 지점에 부착된다. AD는 피니언 중심과 꼬리지느러미 부착점을 연결한 가상선이다. 두 LIPCA 작동기의 굽힘 운동은 각각의 중앙에 부착된 랙의 선형운동을 일으키고, 이 랙의 선형운동은 두 랙에 접촉된 피니언의 회전을 발생한다. 긴 크랭크 AB는 피니언과 함께 조립되어 있으므로, 피니언의 회전은 긴 크랭크의 회전운동을 유발한다. 커플러 BC에 의해 이 운동은 짧은 크랭크 CD로 전달된다. 각 크랭크의 길이는 작은 LIPCA 작동기의 작동변위를 증폭하여, 꼬리지느러미가 큰 각도로 꼬리치기운동을 할 수 있도록 결정하였다.

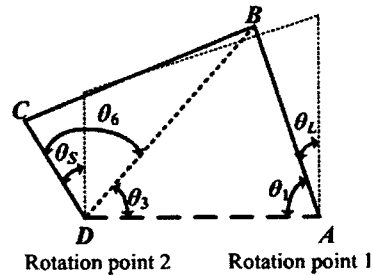
각도 증폭률은

$$Amplification = \frac{\theta_S}{\theta_L} \tag{1}$$

로 표현되며, 이것은 벡터계산법⁽⁸⁾에 의해 계산할 수 있다. 본 논문에서는 자세한 계산을 생략



Rotation point 2 Rotation point 1



Rotation point 2 Rotation point 1

Fig. 5 Diagram of four-bar linkage system

하므로, 관심있는 독자는 참고문헌 [9]를 참고하기 바란다.

4. 실험 방법

수영 실험은 50cm × 35cm × 24cm의 수조에서 깊이 15cm의 물을 채우고 이루어졌다. 4가지 꼬리지느러미를 갖는 로봇 물고기를 물에 넣고, 구동주파수를 변화시키며, 각 로봇 물고기가 발생하는 속도를 관찰하였다. 실험에서는 고전압 전원공급기(Matsusada AMT 1.5 B40LC)와 함수발생기(Protek 9205C)를 이용하여 LIPCA에 300V_{pp}의 사각파형으로 구동 주파수를 조정하고, 오실로스코프(Tektronics TDS2024)를 이용하여 인가된 전압과 주파수를 확인하였다.

구동주파수 변화에 따른 로봇 물고기의 수영 속도를 조사하기 위하여, 로봇 물고기가 일정 거리를 수영하는데 걸리는 시간을 스톱워치를 이용하여 측정하고, 수영거리를 수영시간으로 나누어 속도를 계산하였다.

로봇 물고기의 수영 효율은 비정상 힘(unsteady force)과 관성력(inertia force)의 비인 스트로홀 수(Strouhal number)를 계산하여 실제 물고기와 비교

하였다. 스트로홀 수는 꼬리가 치는 주파수(f)와 꼬리가 치는 진폭(A)에 대한 수영속도(U)의 비로 정의된다.

$$\text{Strouhal Number} = \frac{f \cdot A}{U} \quad (2)$$

여기에서, 스트로홀 수를 계산하기 위하여, 각 구동주파수에 대하여 꼬리지느러미가 수중에서 발생하는 진폭(A)을 자를 이용하여 측정하였다.

수영을 하는 방향으로 작용하는 힘(net forward force, F)는 수영하는 동안 가속도가 일정하다는 가정 하에 다음의 운동량 보존법칙을 이용하여 계산하였다.

$$\int F dt = \int (T - D) dt = m(v_2 - v_1) \quad (3)$$

여기서, v_2 는 로봇 물고기의 최종 속도, v_1 은 로봇 물고기의 초기 속도, 그리고 m 은 로봇 물고기의 질량이다. T 는 로봇 물고기가 수중에서 발생하는 추력, D 는 항력이다.

하나의 입력 주파수에 대한 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위하여 10번의 실험을 수행하고 분석하였다. 이와 같은 방법으로, 한 종류의 꼬리지느러미에 대하여 5종류의 다른 구동주파수를 인가하여 데이터를 얻었다.

5. 결과 및 토의

5.1 수영 속도(Swimming speed)

4가지 꼬리지느러미를 갖는 로봇 물고기는 0.6~1.2 Hz의 서로 다른 7개의 구동주파수를 인가하여 수영속도를 측정하였다. 실험하는 동안, 로봇 물고기가 최대 꼬리지느러미 진폭을 발생하는 최대진폭주파수가 0.9Hz 임을 관찰하였으며, 꼬리가 치는 각도가 17° 임을 측정하였다. 최대 속도는 최대진폭주파수에 도달하였을 때 발생하였으며, 주파수가 조금 더 증가하면 수영속도가 줄어드는 것을 Fig. 6으로부터 알 수 있다.

구동주파수가 최대진폭주파수보다 증가하면, 꼬리지느러미의 운동속도가 빨라지고, 이로 인하여 꼬리지느러미의 수중 저항(속도의 제곱에 비례)이 급격히 증가하여, 압전작동기에 부하중을 전달한다. 이로 인하여 작동기의 성능이 저하되고, 이에 따라서 꼬리지느러미의 진폭이 줄어들어 로봇

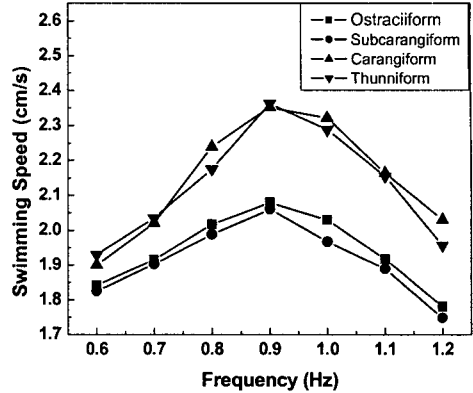


Fig. 6 Speed vs. frequency

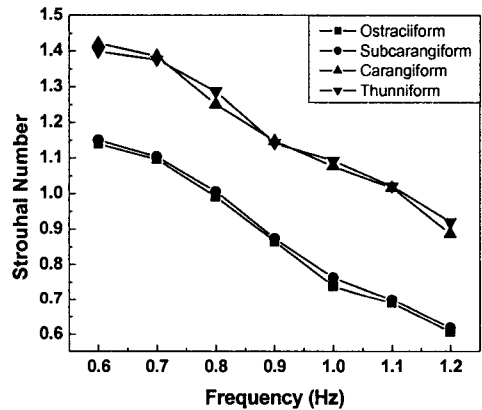


Fig. 7 Strouhal number vs. frequency

물고기의 수영속도가 줄어들게 된다.

가장 빠른 수영속도를 발생한 경우는 로봇 물고기에 thunniiform 꼬리지느러미를 부착한 것으로서, 0.9 Hz의 구동주파수에서 2.38cm/s의 수영속도를 보였으며, 가장 속도가 느린 것은 subcarangiform 꼬리지느러미를 부착한 것으로 0.9 Hz의 구동주파수에서 1.98cm/s의 수영속도를 보였다.

5.2 스트로홀 수(Strouhal number)

로봇 물고기의 스트로홀 수는 모든 경우에서 인가 주파수가 증가하면 감소하였는데, Fig. 7에서 이를 확인할 수 있다.

가장 낮은 스트로홀 수는 ostraciiform 꼬리지느러미를 갖는 경우였으며, subcarangiform 꼬리지느

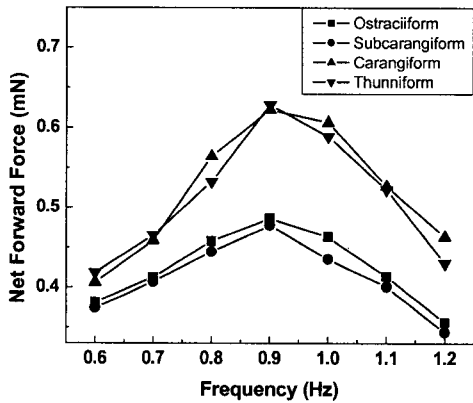


Fig. 8 Net forward force vs. frequency

러미를 갖는 경우에는 이와 비슷한 결과를 보였다. 이 두 경우와는 다르게, carangiform과 thunniform 꼬리지느러미를 갖는 경우에는 스트로홀 수가 다소 증가하였다. LIPCA 작동기에 300V_{pp}를 0.6~1.2 Hz 사이의 주파수를 갖는 사각파를 인가하였을 때, ostraciiform과 subcarangiform 꼬리지느러미를 갖는 경우의 스트로홀 수는 각각 0.65~1.12와 0.67~1.16의 범위로 계산되었으며, carangiform과 thunniform 형태의 꼬리지느러미를 갖는 경우의 스트로홀 수는 각각 0.94~1.45와 0.98~1.4의 범위를 보였다.

빠른 수영을 하는 물고기들의 스트로홀 수는 $0.25 < \text{스트로홀 수} < 0.4$ 에 놓인다.⁽²⁾ 따라서, 본 로봇 물고기의 경우에는 어떤 형태의 꼬리지느러미를 부착해도 빠른 수영을 하는 로봇 물고기 범위에 들지 못함을 알 수 있다.

이상의 결과에서, 꼬리지느러미의 면적과 가로세로비가 같으면, 그 형상이 다르더라도 추력발생 특성이 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

5.3 전진방향의 전체 힘(Net forward force)

Fig. 8에서 각기 다른 주파수에서 발생한 수영 방향의 전체 힘을 보여준다. Ostraciiform과 subcarangiform 꼬리지느러미를 갖는 로봇 물고기는 각각 0.34~0.485mN과 0.33~0.48mN의 힘을 발생하였고, carangiform과 thunniform의 꼬리지느러미를 갖는 로봇 물고기는 각기 다른 구동 주파수에 대하여 각각 0.41~0.62mN과 0.415~0.628mN의 힘을 발생하였다. Fig. 8의 결과를 보면, 전체 힘의 계산에 식 (3)에서와 같이, 수영속도가 계산에

사용되었으므로, Fig. 8의 형태와 매우 유사함을 보이는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는, 단일층 압전 작동기인 LIPCA를 이용하여 구동되는 생체모방 로봇 물고기의 설계, 제작 및 실험에 대하여 소개하였다. LIPCA에서 발생하는 굽힘운동은 액-피니언 시스템과 4바 링크구조를 통하여 꼬리지느러미의 꼬리치기 운동으로 전환하였다. 개발한 로봇 물고기에 다양한 인공 꼬리지느러미를 부착하고 수행한 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

Ostraciiform, subcarangiform, carangiform 및 thunniform 물고기의 꼬리지느러미를 닮은 인공 꼬리지느러미를 로봇 물고기에 부착하여 수영속도, 스트로홀 수, 전진방향의 힘을 측정한 결과, 동일한 면적과 가로세로비를 갖는 인공 꼬리지느러미는 그 추력 발생 특성이 매우 유사함을 알 수 있었다.

또한, 본 연구로부터, 면적이 작지만 가로세로비가 큰 carangiform과 thunniform 꼬리지느러미가 상대적으로 면적이 크고 가로세로비가 작은 ostraciiform과 subcarangiform 꼬리지느러미 보다 더 우수한 수영 성능을 발휘함도 확인할 수 있었다. 종합적으로는 꼬리지느러미의 형상과 구동주파수가 로봇 물고기의 성능에 지대한 영향을 미침을 정량 및 정성적으로 확인할 수 있었다.

본 로봇 물고기는 thunniform의 인공 꼬리지느러미를 부착하여 0.9Hz의 구동주파수로 구동하였을 때에 가장 빠른 수영속도를 얻을 수 있었다. 스트로홀 수를 확인한 결과, 본 로봇 물고기는 모든 인공 꼬리지느러미에 대해서 빠른 수영영역인 $0.25 < \text{스트로홀 수} < 0.4$ 에는 못 미치는 것으로 판단된다. 하지만, 인공근육형 작동기인 LIPCA를 생체모방 로봇 물고기를 구동하는데 사용할 수 있음을 입증하였음에 그 의미가 있다. 차후에 보다 최적화되고 개량된 꼬리지느러미를 이용한 로봇 물고기를 선보일 예정이다.

후 기

본 연구는 2005년 한국학술진흥재단의 중점연구소사업(KRF-2004-005-D00045)에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Sfakiotakis, M., Lane, 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.
- (2) Borgen, M. G., Washington, G. N. and Kinzel, G. L. 2003, "Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8, pp. 66~76.
- (3) Barrett, D. S. et al, 1999, "Drag Reduction in Fish-like Locomotion," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 392, pp. 183~212.
- (4) Anderson, J. M. and Kerrebrock, P. A. 1999, "The Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle (VCUUV): An Autonomous Robot Tuna," *11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham.
- (5) Ayers, J., Wilbur, C. and Olcott, C. 2000, "Lamprey Robots," *Proceeding of the International Symposium on Aqua Biomechanisms*.
- (6) Guo, S. et al, 1997, "An Artificial Fish Robot using ICPF Actuator," *International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, Vol. 6, pp. 205~210.
- (7) Yoon, K. J. et al, 2004, "Analytical Design Model for a Piezo-composite Unimorph Actuator and Its Verification using Lightweight Piezo-composite Curved Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 459~467.
- (8) Myszka, D.H., 1999, *Machines and Mechanisms- Applied Kinematics Analysis*, Prentice-Hall.
- (9) Wiguna, T., Syaifuddin, M., Park, Hoon C. and Heo, S., 2006, "Mechanical Design, Fabrication and Test of Biomimetic Fish Robot Using LIPCA as Artificial Muscle," *SPIE's International Conference on Smart structures and Materials*, 6173-42, San Diego, USA.