물고기 로봇 개발을 위한 유연한 꼬리 지느러미 관절의 강성에 따른 최대 추력 조건 연구

Maximum Thrust Condition by Compliant Joint of a Caudal Fin for Developing a Robotic Fish

박 용 재, 정 우 석, 이 정 수, 권 석 령, 김 호 영, 조 규 진*
(Yong-Jai Park¹, Useok Jeong¹, Jeongsu Lee¹, Seok-Ryung Kwon¹, Ho-Young Kim¹, and Kyu-Jin Cho¹)

¹Seoul National University

Abstract: Fish generates large thrust through an oscillating motion with a compliant joint of caudal fin. The compliance of caudal fin affects the thrust generated by the fish. Due to the flexibility of the fish, the fish can generate a travelling wave motion which is known to increase the efficiency of the fish. However, a detailed research on the relationship between the flexible joint and the thrust generation is needed. In this paper, the compliant joint of a caudal fin is implemented in the driving mechanism of a robotic fish. By varying the driving frequency and stiffness of the compliant joint, the relationship between the thrust generation and the stiffness of the flexible joint is investigated. In general, as the frequency increases, the thrust increases. When higher driving frequency is applied, higher stiffness of the flexible joint is needed to maximize the thrust. The bending angles between the compliant joint and the caudal fin are compared with the changes of the thrust in one cycle. This result can be used to design the robotic fish which can be operated at the maximum thrust condition using the appropriate stiffness of the compliant joint.

Keywords: robotic fish, compliance, maximum thrust, flapping

1. 서론

수중로봇에 대한 연구는 어류와 돌고래와 같은 수중동물들의 몸체 움직임과 꼬리 지느러미의 움직임을 모사하는 것에 중점을 두어 진행되어 왔다. 특히 이러한 수중동물들의 수영 능력은 생물학자들이 예측한 것 보다 높은 추력을 발생시킬 수 있다는 것을 확인하면서[1] 이러한 움직임을 수중로봇에 적용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 기존의 프로펠러를 이용한 수중로봇보다 수중동물의 움직임을 이용하는 것이 효율적인 측면에서 더 좋다는 것이 연구를 통하여 확인되고 있다[2].

수중동물들이 수영하는 방법은 몸체와 꼬리 지느러미를 주로 이용하는 BCF (Body and/or Caudal Fin) 운동과 중간이나 옆지느러미를 주로 이용하는 MPF (Median and/or Paired Fin) 운동으로 구분할 수 있다[3]. 특히 빠른 수영을 위해서는 BCF 운동이 중요하며, 이를 위해서는 몸체나 꼬리 지느러미의 역할이 큰 영향을 미친다. 특히 몸체와 꼬리 지느러미가 수중동물의 머리 쪽에서 꼬리 쪽으로 움직여지면서 만들어내는 진행파는 수중동물의 수영의 효율과 추력에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 진행파를 만들기 위해

많은 로봇 물고기들이 여러 개의 링크와 관절, 액추에이터를 이용하여 제작되고 있다[4,5].

그러나 실제 수중동물의 움직임과 유사하게 진행파를 만들기 위해서는 보다 많은 수의 링크와 관절, 액추에이터가 필요하다. 따라서 적은 수의 링크와 관절, 액추에이터를 사용하면서도 진행파를 만들기 위해서는 유연한 재료를 사용하는 등 새로운 접근 방식이 필요하였다. Alvarado 등은 유연한 몸체를 실리콘으로 제작함으로써 간단하고 튼튼한 로봇 물고기를 제작하였다[6,7]. 이 로봇 물고기는 물고기가 진동하여 만드는 진행파를 하나의 액추에이터를 이용하여 완벽하게 구사할 수 있었다. Tangorra 등은 옆지느러미와 꼬리 지느러미에 유연한 재료를 이용하여 그 움직임에 변화를 주었다. 즉, 지느러미에 평평한 운동, 톨링 운동, 파도 모양 운동, 컵 모양 운동 등을 형성하면서 이 변화에 따른 추력의 변화를 확인하였다[8]. 이와 같이 로봇 물고기를 제작함에 있어서 기존에 알루미늄, 철과 같은 강성 재료에 실리콘과 우레탄과 같은 연성 재료를 함께 적용함으로써 추력을 증진시키고 실제 수중동물과 유사한 움직임을 구현하려는 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 몸체와 꼬리 지느러미의 강성변화에 따른 추력의 변화에 대한 실험적인 연구가 로봇 물고기 연구분야에서 진행되어 왔다. Low 등은 주파수, 꼬리 지느러미의 가로세로비, 스프링 계수 등을 변화시키면서 발생하는 추력을 측정하였으며, 실험을 통한 식을 생성하였다[9]. 지느러미의 유연성 변화에 따른 효율과 최대추력의 변화를 측정한 실험결과에서는 연성 재질을 이용한 지느러미가 강성 재질을 이용한 지느러미보다 27% 이상 효율적인 것으로 나타났다[10]. 또 다른 연구로는 오스트라키폴 물고기 로봇의 움직임을 해석하

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 15., 수정: 2011. 12. 5., 채택확정: 2011. 12. 20.
박용재, 정우석, 권석령, 조규진: 서울대학교 기계항공공학부 바이오로보틱스 실험실/서울대학교 정밀기계설계공동연구소(IAMD)
(yj1one76@snu.ac.kr/snopyy@snu.ac.kr/lowerkwon@hanmail.net/kjcho@snu.ac.kr)

이정수, 김호영: 서울대학교 기계항공공학부 마이크로 유체역학 실험실/서울대학교 정밀기계설계공동연구소(IAMD)
(sabaham1@snu.ac.kr/hyk@snu.ac.kr)

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2009-0087640).

고 이것에 대한 조인트 위치 변화에 따른 추력이 변화하는 것을 확인한 것이 있다. 이 연구는 탄성 조인트 위치 변화로 인하여 추력이 변화하는 경향성을 보여주고 있다[11]. 강성 변화에 따른 이론적인 연구로는 꼬리 지느러미의 움직임을 액추에이터에 스프링을 장착한 모델로 분석한 것이 있다. 이 연구에서는 주어진 환경 조건에서 최적화된 탄성 계수를 적용하면 꼬리 지느러미를 동작하는데 필요한 에너지를 줄일 수 있다는 것을 이론적으로 보여주고 있다[12].

본 연구에서는 주파수와 유연한 재료를 적용한 관절에 따라 로봇 물고기의 추력이 변화하는 것을 살펴보고 이를 실제 로봇 물고기 설계에 적용하고자 한다. 기존의 연구에서 이론적으로 탄성 계수에 따라 최적화된 에너지 비용을 산출하는 결과가 나왔으나, 실질적으로 탄성 관절의 영향에 대한 실험으로 검증하는 것이 필요하다. 또한 실제 로봇 물고기 설계를 하기 위해서는 모터에서 꼬리 지느러미로 전달되는 힘을 계산하고 이를 통하여 어느 정도의 속도로 로봇 물고기가 진행한다는 것을 계산 및 예측하여야 하는데, 실질적으로 기존에 사용되는 이론을 이용하려면 유체의 속도가 반드시 필요하다. 이는 유속이 없는 잔잔한 물 속에서 물고기가 정지한 상태에서 전진을 시작하는 경우에는 적용하기 어려운 점이 있다. 따라서 기존에 제작했던 유연한 몸체를 적용한 로봇 물고기의 성능을 보다 정확히 확인하고[13] 실제 로봇 물고기 설계에 있어서 구동 주파수에 따른 최대 추력을 낼 수 있는 유연한 관절의 강성을 파악하는 실험을 수행하였다[14]. 수직으로 제작된 실험장치를 이용하여 유효한 추력을 측정하였으며 이를 초고속 카메라 영상 분석을 통하여 측정한 수동적인 유연한 관절의 움직임으로 발생하는 구부러지는 각도와 비교 분석하였다. 이러한 수동적인 유연한 관절을 로봇 물고기에 적용함으로써 이의 효율을 증가시키고 사용 주파수에 맞는 추력을 확인하고자 하였으며 이를 실제 로봇 물고기 설계에 적용하였다.

II. 유연한 관절을 이용한 로봇물고기 개념

유연한 관절을 이용한 로봇물고기의 움직임은 실제 수중 동물의 움직임에서 모사한 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 로봇 물고기에 유연한 움직임을 구현하는 방법은 많은 수의 강성 링크, 관절과 액추에이터를 이용하는 방법과 연성 재료

그림 1. 관절에 사용된 재질에 따른 로봇물고기의 움직임 모식도.

Fig. 1. The concept motion of robotic fish depending on rigid or compliant materials.

그림 2. (a) 유연한 로봇물고기 제작 순서도, (b) 유연한 로봇 물고기 움직임.

Fig. 2 (a) Manufacturing process of the compliant robotic fish, (b) Motion of the compliant robotic fish.

를 이용하여 수동적인 유연한 관절을 만드는 방법이 있다.

그림 1과 같이 철이나 알루미늄과 같은 강성 재질을 이용하여 유연한 움직임을 구현하기 위해서는 많은 수의 링크, 관절과 액추에이터를 이용할수록 보다 부드러운 곡선의 움직임을 구현할 수 있다. 이에 비하여 그림 1의 오른쪽에서와 같이 연성 재질을 이용하여 로봇 물고기의 관절을 구현하면 간단히 유연하고 부드러운 곡선의 움직임을 재현할 수 있는 장점이 있다.

이러한 유연한 움직임을 구현하기 위하여 본 연구실에서는 기존에 그림 2와 같은 로봇 물고기를 제작하여 실험하였다[14]. 유연한 몸체를 가진 로봇 물고기를 제작하기 위하여 SDM (Shape Deposition Manufacturing) 프로세스를 이용하여 로봇 물고기 몸체를 제작하였다[15,16]. 이러한 방식으로 제작된 로봇 물고기의 움직임은 그림 2(b)와 같이 나타난다. 하나의 액추에이터를 이용하여 부드러운 곡선의 움직임을 구현하는 로봇 물고기를 제작한 것이다. 이렇게 제작된 로봇 물고기는 기존의 강성 링크와 관절 등으로 구현된 로봇 물고기보다 실제 물고기와 유사한 움직임을 구현할 수 있었으며, 구조가 간단하고 제작하기 용이한 것을 확인할 수 있었다.

그러나 이렇게 제작한 유연한 로봇 물고기가 최대한 효율적이고 추력을 높이기 위한 최적의 강성을 갖게 하기 위해서는 또 다른 연구가 필요하였다. 로봇 물고기의 구동 주파수, 수영 속도 등에 따라 최대의 효율과 추력을 발생시킬 수 있는 연성 재료의 강성에 변화가 필요하며, 이에 대한 정확한 실험 결과가 필요하였다. 따라서 로봇 물고기의 구동 주파수에 따른 최적의 연성 재료의 강성을 경향을 파악하여 이를 실제 로봇 물고기 설계에 적용할 수 있어야 한다.

III. 실험장치

유연한 재질로 이루어진 관절의 강성 변화에 따른 추력의 변화를 확인하기 위하여 로봇 물고기의 구동장치만 실험장치에 구현하였다.

표 1. 실험장치 사양.

Table 1. Specification of the propulsion system.

Mass	Approx. 900 g
Dimension	310 mm x 60 mm x 160 mm
Actuator	Maxon DC Motor(RE35) with Encoder
Driver	Maxon ADS50/5 Speed Controller
Power source	350W Power Supply
Materials	Astite, Acryl

그림 3. Scotch-yoke 시스템을 적용한 구동장치 설계도.

Fig. 3. Design of the driving mechanism with scotch yoke system.

그림 4. 다른 재질을 적용한 관절이 있는 꼬리 지느러미 도안.

Fig. 4. Design of the caudal fin with joint.

표 1의 사양에서와 같이 로봇 물고기를 구현하는 데 브러시리스 모터를 사용하였다. 일반적으로 로봇 물고기를 제작하는데 사용하는 서보모터는 로봇 물고기의 가동 주파수가 높아질수록 반응하는 시간에 따른 한계로 움직임에 문제가 발생하였다. 즉 서보모터를 이용할 경우에 2.5 Hz 이상의 구동에서 진폭이 줄어드는 현상이 발생했다. 따라서 브러시리스 모터를 사용하여 진폭이 줄어드는 현상을 방지하였다. 이러한 브러시리스 모터를 이용하여 왕복운동을 구현하기 위하여 그림 3과 같이 Scotch-yoke 메커니즘을 사용하였다[17]. 이 메커니즘을 사용함으로써 구동 주파수가 모터 자체의 반응속도가 아니라 회전속도에 제한되기 때문에 구동 주파수에 맞추어 회전 수를 제어하면 원하는 구동 주파수에서 실험이 가능해진다.

로봇 물고기 꼬리는 그림 4와 같이 관절의 강성 변화를 주기 위하여 교체할 수 있도록 제작하였다. 꼬리의 모양은 실

그림 5. 실험장치 배치 및 유연한 관절을 적용한 꼬리 지느러미를 부착한 구동장치 [14].

Fig. 5. The layout of the experimental setup and the driving device with the caudal fin [14].

제 물고기 꼬리 지느러미의 모양을 본 때 실제 모양을 축소하여 제작하였으며, 다양한 강성을 실험하기 위하여 9가지 조건을 구성하여 강성의 변화를 주었다. 강성 재료는 아크릴 1.7 mm를 이용하여 구현하였으며, 폴리염화비닐(polyvinyl chloride)과 폴리프로필렌(polypropylene)의 두께를 변화시켜 꼬리 지느러미 관절의 강성이 변화할 수 있도록 하였다. 꼬리 지느러미 재질 자체는 아크릴로 고정함으로써 꼬리 지느러미관절의 영향만 확인할 수 있도록 하였다.

로봇 물고기 구동부의 추력을 측정하기 위하여 두 개의 힘 센서를 그림 5와 같이 수직 방향의 힘을 측정할 수 있도록 부착하였다. 꼬리 지느러미가 움직일 경우에 발생하는 유체의 흐름이 수조의 벽에 반사되어 다시 꼬리 지느러미에 미치는 영향을 줄이기 위하여 수조의 깊이를 꼬리 지느러미 길이의 5배가 될 수 있도록 고려하였다. 또한 수조의 옆면에는 반사파의 영향을 줄이기 위하여 스펀지를 설치하여 최대한 반사되는 유체의 흐름의 영향을 최소화 하였다.

로봇 물고기 구동부의 움직임과 힘 센서 데이터는 National Instrument사의 CompactRIO를 이용하여 제어하고 분석·처리하였다. 유연한 관절의 움직임을 확인하기 위하여 Photron FASTCAM-APX RS 초고속카메라를 이용하여 촬영하였다. 유연한 관절의 움직임과 추력 데이터를 실시간으로 측정 저장하여 동기화 하였다. 또한 추력 데이터를 Savitzky-Golay 평활 필터를 이용하여 처리하였다[18]. 이 필터는 시간에 따라 평균을 구하는 time-averaging 방법과 비교하여 기본 데이터의 피크와 폭을 보존하면서 노이즈를 제거하는 장점이 있다.

실험의 제어변수는 표 2에서와 같이 주파수를 0.5 Hz에서 3.2 Hz까지 6단계로 변화시켰으며, 꼬리 지느러미 관절의 재질은 9 가지 조건으로 변화를 주었다. 주파수는 수조의 길이와 모양에 따라 발생하는 정상파 효과를 줄이기 위하여 주파수를 동일하게 증가하지 않았다. 따라서 표 2에서와 같이 0.5 Hz, 1.0 Hz, 1.6 Hz, 2.2 Hz, 2.7 Hz, 3.2 Hz로 변화를 주어 수조에 의한 효과를 최소화하였다.

각 주파수마다 9가지의 재질 조건을 실험함으로써 총 54가지의 실험을 수행하였다. 각 재질의 강성은 인장기를 이용하여 측정하였으며, 그 결과는 표 2와 그림 6에 표시되어 있

표 2. 제어 변수.

Table 2. Control parameter.

Frequency (Hz)	Material of Joint	Stiffness (N/m)
0.5	Polyvinyl chloride (0.4 mm)	J1 102
1.0	Polypropylene (0.5 mm)	J2 171
1.6	Polyvinyl chloride (0.55 mm)	J3 236
2.2	Polypropylene (0.7 mm)	J4 292
2.7	Polyvinyl chloride (0.75 mm)	J5 775
3.2	Polypropylene (1.0 mm)	J6 803
	Polyvinyl chloride (1.0 mm)	J7 1666
	Polypropylene (1.3 mm)	J8 1950
	Acryl (1.7 mm)	J9 8780

그림 6. 재료의 강성 실험 결과.

Fig. 6. The stiffness of the materials.

다. 유연한 관절에 사용한 재료는 최대한 고르게 강성 분포를 가질 수 있도록 선정하였다.

IV. 유연한 관절을 적용한 추력 실험 결과 및 적용

1. 유연한 관절의 기하학적 정의

유연한 관절의 기하학적인 움직임을 확인하기 위하여 앞에서 초고속카메라로 촬영한 동영상상을 Xcites사의 동영상 분석 프로그램인 ProAnalyst를 이용하여 분석하였다. 이 프로그램은 각 지점 사이의 거리, 속도, 각도 등을 자동적으로 분석할 수 있다. 이 프로그램을 통하여 연성 재질로 이루어진 관절로 인하여 구부러지는 각도를 측정하였다.

그림 7에서와 같이 연성관절에 의하여 구부러지는 각도를 Scotch-yoke 메커니즘이 움직이는 중심점을 기준으로 아래로 내려온 수직선을 영점으로 잡고 시계방향으로 구부러지는 각도를 음으로 하였고, 반시계방향으로 구부러지는 경우는 양의 값을 갖도록 정의하였다. 구부러지는 각도는 꼬리 지느러미가 한 주기를 돌아서 제자리에 돌아올 때까지를 측정하였다.

2. 추력 실험 결과

그림 8에서와 같이 일반적으로 주파수가 증가하면 추력이 대체적으로 증가하는 경향을 보인다. 그러나 관절의 강성이 감소함에 따라 추력이 증가하는 비율이 점차 줄어든다. 이는 가동 주파수가 증가할수록 강성이 큰 관절을 사용하면 같은

그림 7. 꼬리 지느러미와 유연한 관절의 움직임 도해.

Fig. 7. Schematic drawing of the caudal fin and compliant joint.

그림 8. 주파수 증가에 따른 추력을 변화 그래프.

Fig. 8. Variation of the thrust with the frequency.

주파수 내에서 최대의 강성을 나타내는 결과가 나타난다. 또한 같은 연성 재질 내에서 주파수가 증가할수록 최대 추력이 나타나는 주파수가 존재한다는 것을 J1(1.6 Hz)와 J3(2.2 Hz)의 경우에서 확인할 수 있다.

이러한 결과는 표 3에서 확인할 수 있다. 주파수가 증가할수록 최대 추력이 나타나는 강성이 지속적으로 증가한다. 최소 추력은 주파수가 증가하면 강성이 낮은 곳에서 나타난다. 주파수가 0.5 Hz에서 최대 추력은 J1에서 나타나는 반면에 주파수가 3.2 Hz로 변경되었을 때 J7에서 최대 추력이 발생한다. 즉, 주파수가 증가할수록 강성이 높은 재질을 이용하여 꼬리 지느러미의 관절을 구성할 경우 보다 높은 추력을 발생시킬 수 있다. 따라서 로봇 물고기 설계를 할 경우에는 이 로봇 물고기의 가동 주파수를 고려하여 그 주파수에 맞추어 꼬리 지느러미 관절의 재질을 결정하여야 최대 추력을 내는 로봇 물고기를 설계할 수 있다.

그림 9는 추력과 유연한 관절로 인하여 꼬리 지느러미가 구부러지는 각도를 비교한 그래프이다. 두 그래프 모두 2.2 Hz에서 구동하였으며, (a)의 유연한 관절에 사용한 재질은 J7, (b)에 사용한 재질은 J1이다. 2.2 Hz 결과에서 J7, 그림 9(a)에 최대추력이 나타나며, 그림 9(b)에서 최소추력이 나타난다. 꼬리 지느러미가 오른쪽에서 왼쪽으로 움직일 때, 최대추력

표 3. 주파수 별 최대 · 최소 추력 결과.

Table 3. Maximum thrust and minimum thrust data with the frequency.

mN		Hz	0.5	1.0	1.6	2.2	2.7	3.2
MAX	재질	J1	J3	J5	J7	J7	J7	J7
	추력	45.1	191.9	507.6	892.9	1152	1349	
min	재질	J9	J9	J1	J1	J1	J1	J1
	추력	19.3	93.6	181.7	180.4	172.9	161.8

(a) J7 at 2.2 Hz.

(b) J1 at 2.2 Hz.

그림 9. 추력 결과와 유연한 관절로 인하여 꼬리 지느러미가 구부러지는 각도 비교.

Fig. 9. Mapping with the thrust data and motion of the compliant joint.

이 나타나는 경우 추력이 영점 이하로 내려가는 경우가 발생하지 않는 반면, 최소추력이 나타나는 경우 추력이 영점 이하로 내려가는 구간이 나타난다. 또한 순간적으로 최대 추력이 나타나는 지점과 꼬리 지느러미의 관절이 최대 각도로 구부러지는 지점이 최대 추력의 경우인 J7에서는 일치하지만, 그 반대의 경우에는 일치하지 않는다. 따라서 최대 추력이 발생할 수 있는 꼬리 지느러미 관절의 강성의 조건은 구부러지는 각도의 최대 혹은 최소값이 나타나는 점과 추력의 순간 최대값이 나타나는 점이 일치해야 한다고 할 수 있다.

결론적으로 꼬리 지느러미의 동작 주파수가 증가하면 일반적으로 추력은 증가한다. 다만, 동일 주파수 내에서 꼬리 지느러미 관절의 강성에 따라서 최대추력이 나타나는 경향이 변화하게 된다. 일반적으로 주파수가 낮으면 관절의 강성이 낮은 꼬리 지느러미에서 최대추력이 나타나게 되며, 동작 주파수가 높으면 관절의 강성이 높은 꼬리 지느러미에서 최대추력이 나타난다. 동일 주파수에서 나타나는 최대추력은 주파수가 증가할수록 꼬리 지느러미의 강성이 높아질수록 증가하는 경향을 나타낸다. 즉, 동일 주파수에서 최대추력이 나타나는 최적화된 꼬리 지느러미 강성값이 존재한다. 이러한 관점에서 볼 때 이 결과는 기존 연구 중에 꼬리 지느러미에 스프링을 부착하고 이를 액추에이터로 가진하는 경우 최적화된 탄성계수는 이론적으로 에너지 비용을 줄일 수 있다는 결론과 전체적인 연구 방향에서 일치하는 것을 확인할 수가 있다.

3. 실험 결과 적용

앞의 실험을 통하여 사용 주파수에 따른 꼬리 지느러미 관절의 강성은 추력을 발생시키는데 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 로봇 물고기의 꼬리 지느러미를 설계할 때 가동 주파수에 따른 강성을 실험적으로 확인하여 적용할 수 있다. 다만, 꼬리 지느러미의 모양과 두께 등의 변수는 고정하여 적용하였다. 따라서 보다 정확한 결과를 도출하기 위해서는 꼬리 지느러미의 기하학적 형상과 그에 따른 추력의 변화도 같이 고려되어야 한다. 위와 같은 실험 결과를 응용하여 실제 로봇 물고기 제작에 이용하였다. 그림 10은 실제 로봇 물고기 제작에 응용한 모습이다. 유연한 재질을 꼬리 지느러미 관절에 적용하고 이를 제작 완성하였다.

그림 10. 유연한 재질을 관절에 적용한 제작중인 로봇 물고기의 꼬리 지느러미 모습.

Fig. 10. Caudal fin joint of robotic fish with compliant material in process.

V. 결론

연성 재질을 적용한 꼬리 지느러미 관절은 실제 수중동물의 꼬리 지느러미의 움직임에서 착안하여 적용하였다. 유연한 움직임은 진행파를 생성함으로써 효율적인 운동을 가능하게 한다. 또한 연성 재질을 이용하면, 액추에이터를 증가시키지 않고도 로봇 물고기의 자유도를 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 이러한 유연한 재질을 이용한 꼬리 지느러미 관절이 꼬리 지느러미의 모양이나 크기가 일정할 경우에 구동 주파수의 변화에 따라 추력이 변화하는 경향을 확인하였다. 일반적으로 주파수가 증가하면 꼬리 지느러미의 관절에 사용한 연성 재질의 강성이 높아져야 최대추력이 발생하게 된다는 경향을 확인하였다. 단, 구동 주파수에 따라 최대추력을 발생시킬 수 있는 최적 강성이 존재한다는 경향도 확인할 수 있었다.

꼬리 지느러미 관절이 구부러지는 각도와 추력간의 관계에서 꼬리 지느러미 관절이 최대 혹은 최소로 구부러지는 시간에 동시에 순간 최대 추력에 도달할 경우, 해당 구동 주파수에서 최대 추력이 발생하는 조건이라 할 수 있으며, 이때의 강성을 적용하면 로봇 물고기가 최대 추력 조건으로 구동할 수 있다.

이러한 결과를 이용하면 로봇 물고기를 설계할 때 구동 주파수가 결정되면 최대 추력을 낼 수 있는 꼬리 지느러미 관절의 강성을 결정할 수 있다. 향후에는 꼬리 지느러미의 모양과 크기 등의 변수를 이용하여 보다 광범위하게 위의 결과를 사용할 수 있도록 실험을 보완 검증할 것이다.

참고문헌

- [1] J. GRAY, "Studies in animal locomotion: VI. The propulsive powers of the dolphin," *J Exp Biol*, vol. 13, pp. 192-199, 1939.
- [2] J. Liang, T. Wang, and L. Wen, "Development of a two-joint robotic fish for real-world exploration," *Journal of Field Robotics*, vol. 28, no. 1, pp. 70-79, 2011.
- [3] M. Sfakiotakis, D. Lane, and J. Davies, "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 24, pp. 237-252, 1999.
- [4] D. S. Barrett, "Propulsive efficiency of a flexible hull underwater vehicle," Ph.D. Thesis, Dept. of Ocean Eng., Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, 1996.
- [5] H. Morikawa, S. Nakao, S.-I. Kobayashi, and H. Wada, "Experimental study on oscillating wing for propulsor with bending mechanism modeled on caudal muscle-skeletal structure of tuna," *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, vol. 44, no. 4, pp. 1117-1124, 2001.
- [6] P. V. y Alvarado and K. Youcef-Toumi, "Design of machines with compliant bodies for biomimetic locomotion in liquid environments," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 128, no. 1, pp. 3-13, Mar. 2006.
- [7] P. Valdivia, Y. Alvarado, and K. Youcef-Toumi, "Performance of machines with flexible bodies designed for biomimetic locomotion in liquid environments," *Proc. of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3324-3329, 2005.

- [8] J. L. Tangorra, C. J. Esposito, and G. V. Lauder, "Biorobotic fins for investigations of fish locomotion," in *IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 2120-2125, 2009.
- [9] K. H. Low and C. W. Chong, "Parametric study of the swimming performance of a fish robot propelled by a flexible caudal fin," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 5, no. 4, p. 046002, 2010.
- [10] I. Yamamoto, Y. Terada, T. Nagamatu, and Y. Imaizumi, "Propulsion system with flexible/rigid oscillating fin," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 23-30, Jan. 1995.
- [11] I. Kang, "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," *The Journal of Korea Robotics Society (in Korean)*, vol. 6, no. 3, pp. 274-282, 2011.
- [12] K. A. Harper, M. D. Berkemeier, and S. Grace, "Modeling the dynamics of spring-driven oscillating-foil propulsion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 285-296, Jul. 1998.
- [13] Y.-J. Park and K.-J. Cho, "Design and fabrication of a propulsion mechanism for a robotic fish using shape deposition manufacturing," *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering 2009 Spring Conference (in Korean)*, pp. 321-322, 2009.
- [14] Y.-J. Park, U. Jeong, J. S. Lee, H.-Y. Kim, and K.-J. Cho, "The effect of compliant joint and caudal fin in thrust generation for robotic fish," *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on*, pp. 528-533, 2010.
- [15] R. Merz, "Shape deposition manufacturing," Technical University of Vienna, Ph. D. Thesis, 1994.
- [16] M. Binnard and M. R. Cutkosky, "Design by composition for layered manufacturing," *Journal of Mechanical Design*, vol. 122, no. 1, pp. 91-101, 2000.
- [17] J. Yu, Y. Hu, J. Huo, and L. Wang, "Dolphin-like propulsive mechanism based on an adjustable Scotch yoke," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, pp. 603-614, Mar. 2009.
- [18] A. Savitzky and M. J. E. Golay, "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures," *Analytical Chemistry*, vol. 36, pp. 1627-1639, Jul. 1964.

박용재

2004년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2005년~현재 서울대학교 기계항공공학부 석·박사통합과정 재학중. 관심분야는 생체모사로봇, 의료용 로봇, 새로운 메커니즘.

정우석

2010년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2010년~현재 서울대학교 기계항공공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 생체모사로봇, 의료용 로봇, HRI.

이 정 수

2009년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2009년~현재 서울대학교 기계항공공학부 석·박사통합과정 재학중. 관심분야는 biofluidynamics.

권 석 령

2010년 한국교육기술대학교 메카트로닉스공학부 졸업. 2011년~현재 서울대학교 기계항공공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 생체모사로봇, 의료용 로봇, 휴머노이드 로봇.

김 호 영

1994년 서울대학교 학사 졸업. 1996, 1999년 MIT 석·박사 졸업. 1999년~2004 한국과학기술연구원 선임연구원. 2004년~현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수.

조 규 진

1998, 2000년 서울대학교 기계설계학과 학·석사. 2007년 MIT 기계공학박사. 2008년 하버드 박사후연구원 2008년~현재 서울대학교 기계항공공학부 조교수. 관심분야는 생체모사로봇, 의료용 로봇, Smart 액추에이터, 의료보조로봇.