

# 로봇 물고기의 유연한 꼬리에 관한 최대 추력 조건 연구

## Maximum Thrust Condition in a Compliant Robotic Fish

\*박용재<sup>1</sup>, 정우석<sup>1</sup>, 권석범<sup>1</sup>, #조규진<sup>1</sup>

\*Y. J. Park<sup>1</sup>, U. S. Jeong<sup>1</sup>, S. R. Kwon<sup>1</sup>, #K. J. Cho(kjcho@snu.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 기계항공공학부

Key words : Compliant fin, Robotic fish, Maximized thrust, Flapping

### 1. 서론

물고기 유연운동을 모사하여 무인 잠수정을 개발하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 물고기의 유연운동은 일반적으로 무인잠수정에서 사용하는 프로펠러 구동 방식보다 동력 에너지 측면에서 효율성이 높으며, 방향을 바꾸는 조종성적인 측면에서도 높은 이점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다 [1].

이러한 물고기 유연운동은 최초 로봇물고기인 RoboTuna 에서부터 여섯 개의 서보모터와 여덟 개의 링크를 통하여 구현되었다 [2]. 강체 링크를 이용하여 물고기의 유연운동을 구현하기 위해서는 많은 수의 자유도가 필요하게 된다. 그러나 유연한 재료를 이용하여 물고기 몸체나 꼬리를 제작한다면 보다 쉽게 높은 자유도를 가진 유연운동을 구현할 수 있다. Alvarado 는 유연한 재료를 이용하여 단순하고 튼튼한 로봇 물고기를 제작하였으며, 이렇게 제작한 로봇 물고기가 실제 물고기의 유연운동과 유사한 움직임을 구현한다는 것을 보여주었다 [3]. 이외에도 로봇 물고기의 유연운동에 유연한 꼬리지느러미를 이용하면 단단한 꼬리지느러미를 이용한 경우보다 추력의 발생과 에너지 효율 측면에서 유리하다는 연구결과가 있다 [4], [5].

본 연구에서는 꼬리 지느러미의 탄성계수를 변화함으로써 각 주파수에 따라 최대 추력이 나오는 조건을 확인하였다. 그리고 탄성계수에 따라 변화하는 꼬리 지느러미의 움직임을 초고속 카메라로 확인함으로써 단단한 꼬리지느러미와 유연한 꼬리지느러미가 로봇 물고기 추력 발생에 미치는 영향을 분석하고 이를 통하여 최대 추력을 발생할 수 있는 조건을 찾아 보았다.

Table 1 Control Parameter

Frequency (Hz)	Material of Tail	Stiffness (N/m)
0.5	Polyvinyl chloride (0.4 mm)	T1 102
1.0	Polypropylene (0.5 mm)	T2 171
1.6	Polyvinyl chloride (0.55 mm)	T3 236
2.2	Polypropylene (0.7 mm)	T4 292
2.7	Polyvinyl chloride (0.75 mm)	T5 775
3.2	Polypropylene (1.0 mm)	T6 803
	Polyvinyl chloride (1.0 mm)	T7 1666
	Polypropylene (1.3 mm)	T8 1950
	Acryl (1.7 mm)	T9 8780

### 2. 유연한 꼬리 지느러미의 움직임

꼬리 지느러미와 구동 주파수 변화에 따른 추력의 변화를 살펴보기 위하여 Table 1 과 같은 제어 변수를 선정하였다. 탄성계수의 변화에 따른 꼬리 지느러미의 움직임은 Fig. 1 과 같이 단순화하여 나타낼 수 있다. 이러한 움직임은 꼬리 지느러미의 탄성계수에 따라 구부러지는 정도가 변화하며, 이는 주파수가 증가함에 따라 증가하는 현상을 보이게 된다.

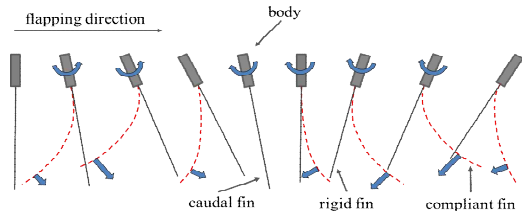


Fig. 1 This schematic drawing depicts the concept of compliant caudal fin motion. The dotted line and gray straight lines show the changes in motion due to the difference in stiffness.

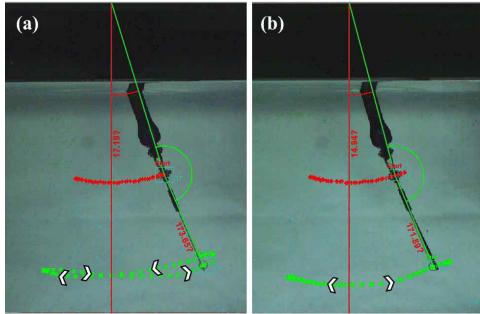


Fig. 2 The results of caudal fin tracking in one cycle at 1.0 Hz (a) Maximum thrust (T1), (b) Minimum thrust (T9). The case of maximum thrust features more motion compared to that of minimum thrust.

### 3. 실험결과

구동 주파수 및 꼬리 지느러미의 탄성변화에 따른 추력 및 꼬리 지느러미의 움직임을 측정하였다. 꼬리 지느러미의 움직임을 관찰해보면, Fig. 2 와 같이 구동 주파수가 일정할 경우에 최대 추력과 최소 추력에 따른 꼬리 움직임의 궤적이 다르게 나타난다. 최대추력이 나타나는 경우, 숫자 8 을 옆으로 누인 모양이 나타나지만, 최소추력은 단순한 진자 운동과 같은 움직임을 보인다.

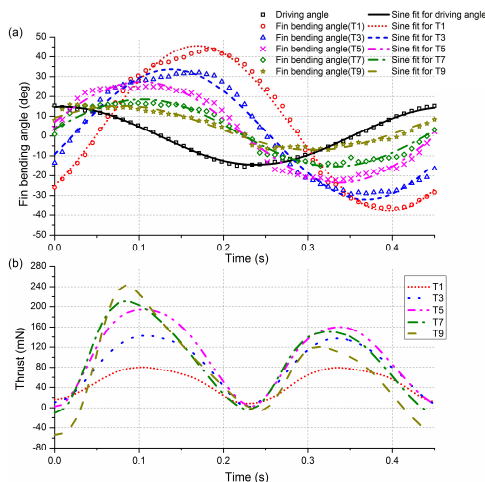


Fig. 3 The results for the fin bending angle, driving angle and thrust at 2.2 Hz., (a) The driving angle and the fin bending angle, (b) The measured thrust.

구동 주파수가 일정한 경우에 탄성 계수 변화에 따라 꼬리 지느러미의 움직임에 변화가 나타난다. Fig. 3 은 꼬리 지느러미의 구부러지는 각도와 구동하는 몸체의 움직이는 각도 사이의 차이와 추력과의 관계를 나타낸다. 유연한 꼬리 지느러미일수록 구동하는 물고기 몸체의 움직임보다 최대 각도에 늦게 도달하는 현상을 보인다. 최대 평균 추력은 꼬리 지느러미가 구부러지는 움직임이 추력이 발생하는 현상과 비슷한 경향을 보일 때 나타난다.

### 4. 결론

구동 주파수와 꼬리 지느러미의 변화에 따라 추력이 변화하며 이러한 추력의 변화는 꼬리 지느러미의 움직임을 통하여 확인할 수 있다. 꼬리 지느러미의 움직임이 숫자 8 을 옆으로 누인 모양이 나타날 경우에 최대 추력이 나타나며, 이 모양이 더 커지면 추력이 줄어드는 현상이 발생한다. 또한, 꼬리 지느러미의 구부러지는 각도를 통하여 최대 추력이 나타나는 조건을 찾아낼 수 있다.

### 참고문헌

1. 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.
2. D. S. Barrett, "Propulsive efficiency of a flexible hull underwater vehicle," Ph.D. Thesis, Dept. of Ocean Eng., MIT, Boston, USA, 1996.
3. 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, 2006.
4. 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, 1995.
5. B. Ahlborn, S. Chapman, R. Stafford, and R. Harper, "Experimental simulation of the thrust phases of fast-start swimming of fish," *J Exp Biol*, vol. 200, no. 17, pp. 2301-2312, 1997.