

물고기 수영운동의 파라미터가 추력에 미치는 영향에 관한 연구 The Effect of Swimming Parameters for Fish in Thrust Generation

*박용재¹, 정우석¹, #조규진¹

*Y. J. Park¹, U. S. Jeong¹, #K. J. Cho(kjcho@snu.ac.kr)¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Fish swimming motion, thrust, robotic fish

1. 서론

인간에 의해 개발된 수중 및 수상 운용체와 비교해 보았을 때, 어류와 고래를 비롯한 수중생물들은 빠른 속도와 높은 기동성을 가지고 있다. 최근 이러한 수중생물의 기동성을 얻기 위해 물고기의 움직임을 모사한 생체모방형 무인 잠수정(Bio-robotic AUVs)을 개발하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 연구 방향은 수중저항을 줄이려는 연구에서부터 기동성과 추력을 높이려는 방향으로 진행되어 왔지만[1], 로봇 물고기의 성능은 아직 실제 수중생물의 능력을 따라가지 못하고 있다.

대부분의 수중생물 중 몸을 이용하여 수영하는 동물들은 크게 두 가지의 수영 방법을 이용한다[2]. BCF(Body and Caudal Fin) 영법은 몸통과 지느러미의 파동으로 수영을 하며 높은 속도로 순항할 경우 이용된다. 반면 MPF(Median and Paired Fin) 영법은 몸통 옆에 달려있는 지느러미로 수영을 하는데 이러한 수영 특성으로 인하여 높은 기동성을 나타낸다. 물고기는 이 두 가지 영법을 상황에 따라 적절하게 혼용함으로써 효율적인 수영을 할 수 있다.

수중생물에 대한 추력을 정확하게 예측하려는 연구는 오래 전부터 지속적으로 이루어져 왔다. Gray 는 1936 년에 포유류의 근육이 낼 수 있는 힘을 이용하여 돌고래의 추진력을 계산하였다. 그러나 이 과정에서 항력에 의한 효과를 난류로 고려하지 않고 층류로 고려하여 실제 돌고래의 추진력보다 낮은 결과가 도출되었다[3]. 이외에도 수중생물의 추력을 예측하기 위한 다양한 모델과 실험이 수행되어 왔다[4,5]. 이러한 연구들은 주로 항력계수와 같은 수력학의 변수를 수중생물의 속도 데이터를 통하여 구하고 이를 이용하여 추력을 계산하는 방법을 취하고 있어서 로봇물고기의 설계변수 변경에 따른 추력을 예측하기에는 어려움이 따른다.

일반적으로 추력은 물고기의 지느러미와 물의 입사방향 사이의 반응각에 의해 결정된다. 고래목 동물의 경우 유연한 꼬리로 수동적인 움직임을 구현하여 효율적인 반응각을 만들어 낸다[6]. 유연한 꼬리는 고래가 실속하지 않고 지속적으로 양력을 만들어 낼 수 있도록 하여 높은 추진력의 주된 요소가 된다. 수영 시 꼬리 지느러미의 움직임(cupping motion, flat motion, rolling motion, undulation) 또한 어류의 추력에 있어서 중요한 요소가 된다[7]. 그리고 움직임의 진동수, 진폭, 꼬리의 스프링 상수, 모양 등도 로봇 물고기의 추력에 영향을 미치는 요소들이다[8].

현재까지 다양한 로봇 물고기들이 연구 제작되고 있다. 그러나 대부분의 로봇 물고기는 물고기의 파동 움직임을 모사하기 위해 모터와 같은 많은 수의 액추에이터를 사용함으로써 무게와 부피가 커지고 효율이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 반면 로봇 물고기 지느러미의 유연성을 이용하면, 액추에이터의 수를 늘리지 않으면서 자유도를 높여 위의 문제들을 해결할 수 있다.

본 연구에서는 꼬리 지느러미와 꼬리와 몸을 연결하는 관절의 탄성계수 및 운동 진동수가 로봇 물고기의 추력에 미치는 영향에 대하여 실험하고 분석하였다. 실험을 위해 물고기 로봇의 구동부를 제작하여 수조에 수직으로 설치하였으며, 꼬리 지느러미와 관절의 탄성계수를 바꾸기 위해

다양한 재료들을 사용하였다. 힘 센서를 통해 물고기 로봇의 추력을 측정하였다.

2. 파라미터 선정 및 실험 구성

꼬리 지느러미와 관절의 탄성 변화와 구동 주파수 변화에 따른 추력의 변화를 살펴보기 위하여 Table 1 과 같은 제어 변수를 선정하였다. 탄성과 주파수가 추력 발생에 미치는 영향에 대한 정확한 상관관계를 알기 위하여 꼬리 지느러미의 크기와 모양, 진폭, 그리고 사용한 모터의 입력전압 등의 변수를 일정하게 유지하였다.

Table 1 Control Parameter

Frequency (Hz)	Materials of Tail and Joint	Tail	Joint
1	Acryl (2.8 mm)	T1	J1
2	Polyvinyl chloride (3.0 mm)	T2	J2
3	Polyvinyl chloride (2.0 mm)	T3	J3
4	Polyvinyl chloride (1.0 mm)	T4	J4
5	Polypropylene (1.0 mm)	T5	J5
6	Polypropylene (0.6 mm)	T6	J6
7	-	-	-
8	-	-	-

꼬리 지느러미와 관절로 사용된 재질은 탄성을 고려하여 선정하였으며, 각 재질 별 탄성은 Fig. 1 과 같다. 가장 단단한 재질로는 아크릴을 사용하였으며, 가장 부드러운 재질로 폴리프로필렌을 사용하였다. 탄성의 변화를 고르게 주기 위하여 같은 재료임에도 두께가 다른 재료를 사용하여 꼬리 지느러미와 관절을 제작하였다.

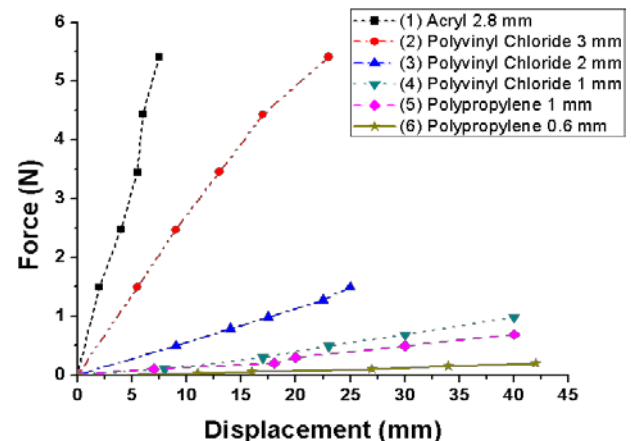


Fig. 1 The stiffness of the materials

실험은 수조에 수직으로 설치된 로봇 물고기 구동부를 이용하여 수행되었다. 로봇 물고기 구동부는 모터와 기어를 이용하여 꼬리 지느러미를 진동하게 설계되었으며, Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 수조에 설치된 지지대와 힘 센서로 연결하여 수직방향으로 힘을 측정할 수 있게 설치되었고, 중력의 반대 방향을 추력이 생성되는 방향으로 설정하였다. 추력은 National Instrument 사의 DAQ 와 LabVIEW 를 이용하

여 측정하였으며, 힘 센서 데이터의 노이즈는 저주파 통과 필터와 평탄화 필터를 이용하여 제거되었다.

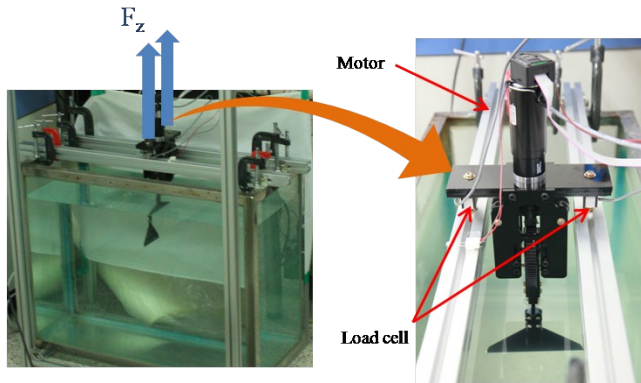


Fig. 2 The experimental setup and the driving device with the caudal fin

3. 실험 결과

주파수 및 꼬리 지느러미와 관절의 탄성 변화에 따라 추력을 측정하는 실험을 수행하였다. 그러나 실험 수행과정에서 일부 관절이 물의 저항을 이겨내지 못하고 부러지는 문제가 발생하였다. 이러한 결과로 Fig. 3 (b)와 (d)를 보면 T3J3의 경우 실험결과값이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 부러지는 경우를 제외하고 전체 경향을 확인해보면 T3J2의 8Hz 결과에서 최대 추력이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 (a), (b)에서 볼 수 있듯이, 각 주파수에 따라 최대추력의 위치가 변화함을 알 수 있다. 이는 주파수 변화에 따라 꼬리 지느러미와 관절의 최적화된 탄성값이 존재한다는 것을 의미한다.

Fig. 3의 (c), (d)는 추력 최대값과 최소값의 절대값 비를 나타낸다. 피크 비율의 변화는 최대 추력값의 변화와 유사한 경향을 보인다. 이는 음의 추력으로 인한 손실이 양의 추력으로 보상되는 효과가 나타난다는 것을 의미한다.

$$Peak\ ratio \equiv \frac{Max\ Peak}{Min\ Peak} \quad (1)$$

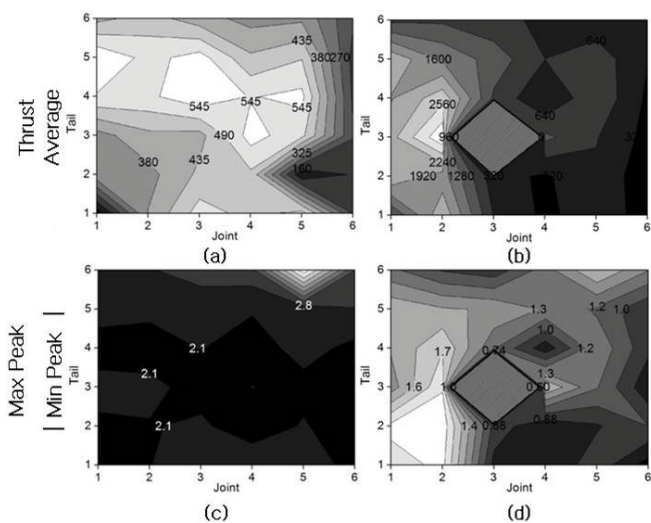


Fig. 3 The average thrust and the ratio of the absolute value of the maximum peak to that of the minimum peak for all cases (T1J1 through T6J6). (a) Average thrust at 2 Hz (b) Average thrust at 8 Hz (c) Peak ratio at 2 Hz (d) Peak ratio at 8 Hz

Fig. 4를 보면 관절이 일정한 경우에 꼬리 지느러미의 탄성 변화가 추력에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 주파수가 변화함에 따라 최대 추력값이 나타나는 꼬리 지느러미의 탄성값이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 주파

수가 증가함에 따라 꼬리 지느러미의 탄성이 큰 경우가 더 높은 추력값을 나타내는 현상을 보인다.

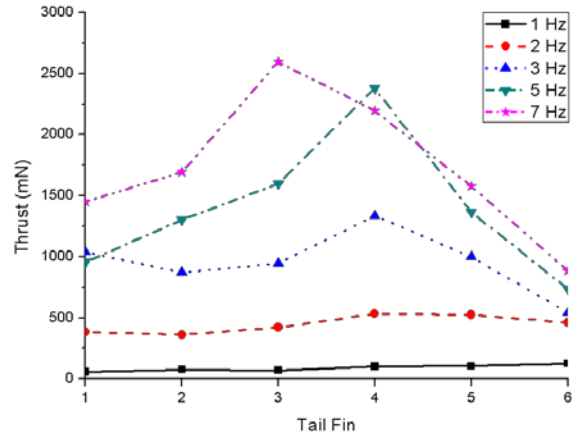


Fig. 4 Variation of the thrust with the tail fin at J2 case

4. 결론

꼬리 지느러미 및 관절의 탄성과 구동 주파수의 변화에 따라 추력이 변화하는 것을 확인하였다. 탄성의 변화를 크게 하기 위하여 다양한 재료를 사용하였으며, 같은 재료의 두께를 변화시켜 실험에 적용하였다. 정확한 실험값을 얻기 위하여 저주파 통과필터와 평탄화 필터를 사용하였다.

이러한 실험의 결과로 구동 주파수에 따라서 최대 추력값이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 주파수가 증가하면 꼬리 지느러미와 관절의 탄성이 클 때 최대 추력을 나타내는 경향을 보였다. 또한 관절의 탄성을 일정하게 유지하고 꼬리 지느러미의 탄성을 변화시켰을 경우의 최대 추력값의 변화도 앞의 결과와 유사한 경향을 보였다.

향후에는 물고기 유영에 영향을 미치는 다른 인자들에 대한 연구와 그에 따른 이론적 모델링 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

1. Bandyopadhyay, P., "Trends in biorobotic autonomous undersea vehicles," IEEE Journal of Oceanic Engineering, **30**, 109-139, 2005.
2. Sfakiotakis, M., Lane, D., and Davies, J., "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion," IEEE Journal of Oceanic Engineering, **24**, 237-252, 1999.
3. Fish, F.E., "The myth and reality of Gray's paradox: implication of dolphin drag reduction for technology," Bioinspiration & Biomimetics, **1**, 17-25, 2006.
4. Zhong, Y., Chong, C., Zhou, C., Seet, G., and Low, K., "Performance predict model for a body and caudal fin (BCF) biomimetics fish robot," Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference on, 1230-1235, 2009.
5. Triantafyllou, G.S., Triantafyllou, M.S., and Grosenbaugh, M.A., "Optimal Thrust Development in Oscillating Foils with Application to Fish Propulsion," Journal of Fluids and Structures, **7**, 205-224, 1993.
6. Fish, F.E., Nusbaum, M.K., Beneski, J.T., and Ketten, D.R., "Passive cambering and flexible propulsors: cetacean flukes," Bioinspiration & Biomimetics, **1**, 42-48, 2006.
7. Tangorra, J., Esposito, C., and Lauder, G., "Biorobotic fins for investigations of fish locomotion," Intelligent Robots and Systems, 2120-2125, 2009.
8. Chong, C., Zhong, Y., Zhou, C., Low, K., Seet, G., and Lim, H., "Can the swimming thrust of BCF biomimetics fish be enhanced?," IEEE Robotics and Biomimetics, 437-442, 2009.