

꼬리 지느러미의 유연성을 이용한 로봇 돌고래의 성능 향상

Improving the Performance of a Robotic Dolphin with a Compliant Caudal Fin

박 용 재¹, 조 규 진[†]

Yong-Jai Park¹, Kyu-Jin Cho[†]

Abstract Fish generates thrust with a compliant fin which is known to increase the efficiency. In this paper, the performance of a robotic dolphin, the velocity and the stability, was improved using an optimal compliant caudal fin under certain oscillating frequency. Optimal compliance of the caudal fin exists that maximizes the thrust at a certain oscillating frequency. Four different compliant fins were used to find the optimal compliance of the caudal fin at a certain frequency using the half-pi phase delay condition. The swimming results show that the optimal compliant fin increases the velocity of the robotic fish. The compliance of the caudal fin was also shown to improve the stability of the robotic fish. A reactive motion at the head of the robotic dolphin causes fluctuation of the caudal fin. This phenomenon increases with the oscillating frequency. However, compliant fin reduced this fluctuation and increased the stability.

Keywords: Robotic Fish, Underwater Robot, Compliant Fin, Stabilization, Thrust Maximization.

1. 서 론

해양광물자원, 해양환경탐사, 어군탐지 등 다양한 해양 환경 및 자원에 대한 관심이 높아지면서 수중 유영 로봇에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 수압이 높고 어두운 환경으로 가시거리가 짧으며, 어려운 통신 환경과 지상에서와 달리 높은 수중 저항으로 인하여 연구에 어려움을 겪고 있다. 따라서 이러한 연구에 필요한 다양한 수중 로봇에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다^[1-3].

그중에서도 특히, 수중에서는 지상에서와 같이 연료를 간단히 주입하기에는 많은 어려움이 존재하기 때문에 효율이 높은 유영 로봇이 필요하다. 따라서 기존에 주로 사

용하던 프로펠러를 장착한 수중 유영체보다 효율성이 높은 물고기의 움직임을 모사한 수중 로봇에 대한 연구에 관심을 기울이고 있다^[4].

지느러미를 이용한 물고기의 움직임은 프로펠러를 이용한 수중 유영 로봇보다 효율성에서 앞선 성능을 보일 뿐만 아니라 산호초나 수초가 많은 환경에서도 안정적으로 움직일 수 있는 장점이 있다. 프로펠러를 이용한 수중 유영 로봇은 프로펠러에 수초가 걸려서 좌초하는 문제가 발생할 수 있으나, 지느러미를 이용한 로봇 물고기는 수초에 걸리는 문제가 발생하지 않아서 복잡한 환경에서 자유롭게 유영할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 물고기의 이점을 고려하여 꼬리 지느러미를 장착한 수중 로봇을 다양한 연구기관에서 제작하고 있으며, 로봇에 대한 성능을 높이기 위한 연구를 수행하고 있다^[5-8]. 기존의 연구들은 부드러운 지느러미의 움직임을 모사하기 위하여 다수의 관절을 이용하였고, 각 관절마다 모터를 장착하는 방법을 사용하였다. 그러나 다관절 지느러미를 이용하여 로봇물고기

Received : Aug. 18, 2014; Reviewed : Sep. 20, 2014; Accepted : Oct. 22, 2014

※ This work was supported by Priority Research Centers Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2014048162)

¹ Mechanical Engineering, Sunmoon University (yjpark@sunmoon.ac.kr)

[†] Corresponding author: Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Sillim-Dong, Gwanak-Gu, Seoul, Korea (kjcho@snu.ac.kr)

를 구동할 경우, 부드러운 움직임을 위해서 많은 수의 관절이 필요하고 그에 따라 사용되는 부품의 수도 증가하는 문제가 발생한다.

이러한 문제점을 줄이고 유연한 움직임을 구현하기 위하여 물고기 꼬리지느러미의 유연성에 관심을 두는 연구들이 진행되기 시작하였다. 로봇 물고기의 구동 조건에 따라 유연한 재료를 이용한 꼬리지느러미가 로봇 물고기의 추력에 도움이 된다는 연구 결과도 도출되고 있다^[9-12].

그러나 구동조건에 맞는 꼬리 지느러미의 강성조건에 대하여는 제시하지 못하는 단점을 보이고 있다. 특히 유속이 빠른 유역에서 로봇 물고기를 구동하기 위해서는 로봇 물고기가 빠르게 유연할 수 있어야 한다. 따라서 빠른 속도를 내기 위해서는 물의 저항을 줄이는 디자인과 더불어 필요한 것이 로봇 물고기의 추력을 증진하는 것이다. 다만, 추력을 증진하기 위하여 보다 강한 액추에이터를 사용하는 것이 좋은 해결책이지만 로봇 물고기의 설계상 부피의 제약이 존재한다. 따라서 일정한 부피에서 동일한 액추에이터를 사용하여 최대 추력을 낼 수 있는 방법을 찾는 것이 중요하다. 이를 위하여 유연한 꼬리 지느러미를 사용하였고, 운영 조건에 따라 어느 정도의 강성이 적절한지에 대한 가이드라인이 필요하였다. 따라서 최대 추력을 발생시킬 수 있는 적절한 강성을 찾기 위한 조건에 대한 연구를 수행하였다. 그 연구 결과로 최대 추력을 생성하기 위한 유연한 꼬리 지느러미의 기하학적 조건을 도출하였다^[13]. 또한 꼬리 지느러미의 강성의 변화에 따라 로봇 물고기의 움직임의 안정성이 변화하게 된다. 강성이 강한 경우에는 로봇 물고기가 강하게 흔들리게 되어 안정성에 문제가 발생한다. 그러나, 유연한 꼬리 지느러미를 사용하게 되면 로봇 물고기가 안정적으로 움직이게 되는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다^[14].

본 논문에서는 위의 연구조건을 적용할 수 있는 로봇 돌고래를 구현하였다. 다양한 꼬리 지느러미를 제작하고 이를 로봇 돌고래에 장착하여 실험을 진행하였다. 유연한 꼬리 지느러미의 성능을 확인하기 위하여 로봇 돌고래의 속도를 측정하였고, 움직임의 안정성을 확인하기 위하여 로봇 돌고래 머리 부분의 흔들림을 측정하여 안정성을 파악하였다.

2. 유연성을 이용한 로봇물고기

2.1 유연한 꼬리 지느러미

물고기의 꼬리 지느러미는 주위 환경과 유영상황에 맞추어 자연스럽게 구부러지는 특징이 있다. 물고기의 꼬리 지느러미와 유사한 움직임을 구현하기 위하여 기존의 로봇 물고기들은 많은 수의 단단한 링크 구조를 이용하여 꼬리 지느러미를 제작하였다. Fig. 1과 같이 자유도가 높은 꼬리 지느러미를 구현하기 위해서는 강성 관절의 수가 증가하는 문제점이 나타난다. 또한 강성 관절의 증가로 꼬리 지느러미 자체의 무게가 증가하는 단점도 있다. 그러나 꼬리 지느러미 전체가 유연하게 구부러질 수 있도록 제작하면, 높은 자유도를 가진 유연한 꼬리 지느러미를 구현할 수 있다.

유연한 재질을 이용한 꼬리 지느러미의 강성이 변화하면 꼬리 지느러미가 구부러지는 각도가 변화하게 된다. 강성이 약해질 경우 구동 시에 꼬리 지느러미 구부러지는 각도는 증가하는 현상이 발생한다. Fig. 1의 예에서 볼 수 있듯이, 강성이 상대적으로 약한 꼬리 지느러미의 경우 실선의 움직임을 보이게 되고, 강성이 크면 점선의 움직임을 보이게 된다. 이러한 꼬리 지느러미의 움직임은 반발력으로 로봇 돌고래의 움직임에 영향을 미칠 수 있다.

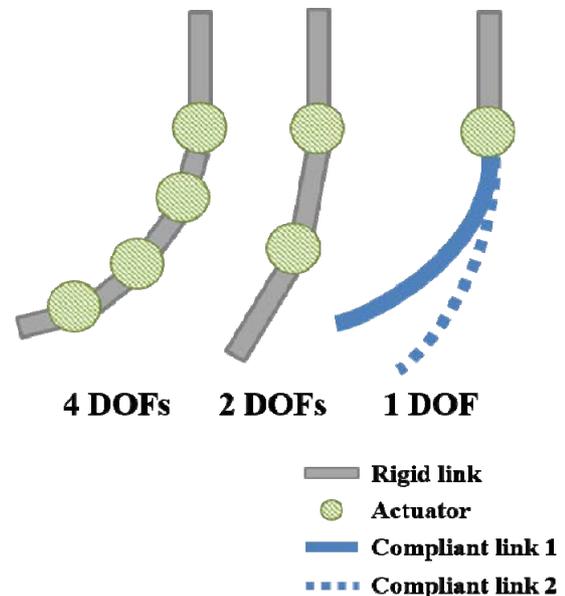


Fig. 1. Caudal fin with joints and rigid links and caudal fin with various stiffness materials^[14].

2.2 로봇 돌고래 제작 및 실험과정

다양한 강성을 가진 꼬리 지느러미를 구현하고 재질에 따른 움직임 변화가 없도록 하기 위하여 탄소 섬유를 이용한 꼬리 지느러미를 제작하였다. 적층하는 탄소섬유 (Carbon fiber-reinforced plastics)의 수를 달리하여 꼬리 지느러미의 강성을 변화하였다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 9겹 (Fin 1), 13겹 (Fin 2), 15겹 (Fin 3), 19겹 (Fin 4)의 꼬리 지느러미를 제작하였다. 측정된 각 꼬리 지느러미의 값에서 볼 수 있듯이, Fin 1에서 Fin 4로 갈수록 꼬리 지느러미의 강성이 증가한다.

Fig. 2와 같이 꼬리 지느러미의 모양을 실제 돌고래 모양과 비슷하게 제작하였다. 또한 꼬리 지느러미의 면적, 가로세로비, 모양을 동일하게 유지함으로써 강성만 변수로 확인할 수 있도록 하였다. 로봇의 몸통과 연결되는 부분은 탄소섬유를 뼈대로 외부에는 실리콘으로 제작하였다. 실리콘

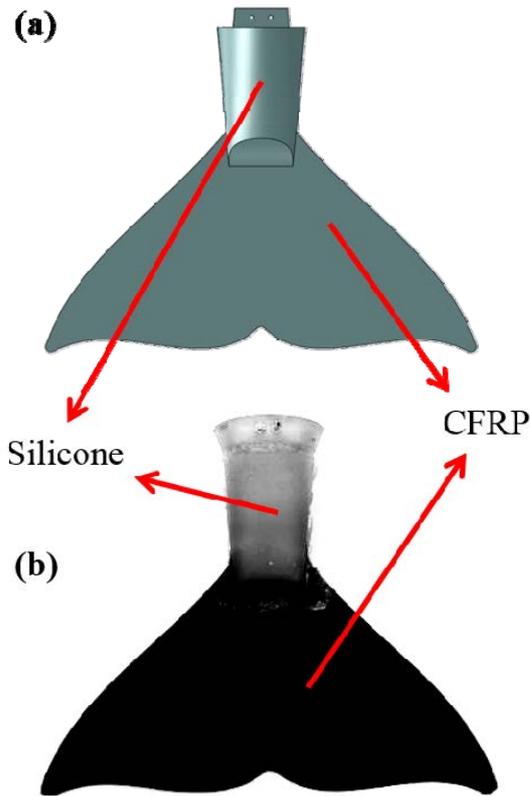


Fig. 2. (a) CAD design of a fluke, (b) Fluke which is made by CFRP laminate^[15]

Table 1. Four Caudal fins

	Fin 1	Fin 2	Fin 3	Fin 4
Layers	CFRP 9 layers	CFRP 13 layers	CFRP 15 layers	CFRP 19 layers
Stiffness (N/m)	65.0	143.8	158.2	268.5

큰 부분은 몰드를 이용하여 형상을 생성하였다. 또한 꼬리 지느러미가 로봇 돌고래에 탈부착이 쉽도록 설계를 하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 로봇 돌고래는 실제 큰돌고래의 모양과 유사하게 설계를 하였다. 로봇 돌고래의 등지느러미는 고정된 상태로 제작되었고, 두 개의 옆지느러미는 회전할 수 있게 제작되어 상하의 움직임을 구현할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 옆지느러미의 움직임을 고정함으로써 꼬리 지느러미의 강성 변화에 따른 로봇 돌고래의 움직임을 확인하고자 하였다. 꼬리 지느러미는 회전운동을 상하 운동으로 변환시켜주는 Scotch-Yoke 메커니즘을 사용하여 로봇 돌고래를 구동할 수 있게 하였다^[16]. Table 2에 로봇 돌고래에 대한 사양을 설명하였다.

Table 2. Specification of robotic dolphin

	Specification
Length	888 mm (with caudal fin)
Diameter (Max)	About 170 mm
Maneuvering	Pitch and Yaw
Actuator	Two Pectoral fins: Two servo motor (Hitec HS7890TH) One Caudal fin: One motor (Faulhaber 32682G 024BX4)
Material	Body: Acrylic Plastic, Surface: Water proof fabric Peduncle: Silicone, Caudal fin: CFRP



Fig. 3. Robotic dolphin



Fig. 4. Swimming motion of the robotic dolphin (a) rigid caudal fin case, (b) compliant caudal fin case^[11].

2.3 실험과정

로봇 돌고래의 실험은 수조에서 진행되었으며, 움직임을 초고속카메라(FASTCAM-APX RS)로 초당 500 프레임의 속도로 측정하였다. 촬영된 영상으로부터 로봇 돌고래의 속도를 측정하고 머리 부분의 흔들림을 분석하기 위하여, 동영상 분석 프로그램인 ProAnalyst를 사용하였다. 이 영상 분석 프로그램을 통하여 꼬리 지느러미의 기하학적인 움직임에 대한 결과도 분석하였다. Fig. 4는 실제 수조 안에서 움직이는 로봇 돌고래의 영상을 일정한 프레임으로 촬영한 것을 나타낸다.

2.4 실험결과

꼬리 지느러미의 강성 변화에 따라서 로봇 돌고래의 움직임에 미치는 영향을 확인하기 위하여 실험을 실시하였다. 첫째는 강성변화에 따른 로봇 돌고래의 추력 변화, 둘째는 흔들림 변화에 대한 실험 및 분석을 하였다.

2.4.1 동적성능 실험결과

기존 연구에 따르면 꼬리 지느러미가 적절한 강성을 가질 경우, 동일한 구동 조건에서 로봇 물고기의 추력이 증가한다는 결과가 있다. 특히, 꼬리 지느러미의 구동 각도와 꼬리 지느러미가 구동함에 따라 구부러지는 각도 사이에 위상차가 90도(0.5π)일 경우에 최대 추력이 발생한다는 연구를 기존에 수행한 바가 있다^[13] Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 로봇 물고기 구동부의 왕복 운동에 따른 각도변화와 꼬리 지느러미의 구부러지는 각도 사이에 위상차가 발생한다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 기존에 제작한 네 개

의 꼬리 지느러미에 대한 로봇 돌고래의 추력 변화를 확인해 보았다. 우선 추력의 변화를 확인하기에 앞서 영상 분석을 통하여 꼬리 지느러미의 각도에 변화에 따른 위상차를 확인하였다.

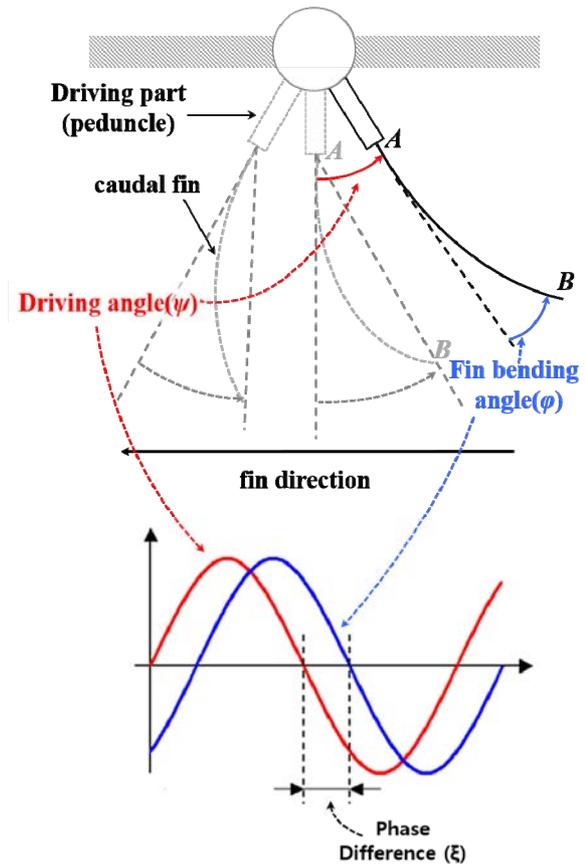


Fig. 5. The concept of the Phase difference between a driving angle and a fin-bending angle. (modified from [13])

Fig. 6에서와 같이 꼬리 지느러미의 강성이 증가할수록 위상차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 기존의 연구 결과에 따르면, Fin 2의 경우에 위상차가 90도에 가까운 값을 가지게 됨으로 최대 추력이 Fin 2의 경우에서 발생된다고 예측할 수 있다.

실제로 로봇 돌고래의 추력을 확인하기 위한 속도 실험 결과인 Fig. 7을 보면, Fin 2의 경우에 속도가 1.7 m/s로 다른 꼬리 지느러미를 장착할 경우보다 빠르게 유연하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 꼬리 지느러미의 구동 각도와 꼬리 지느러미가 구부러지는 각도를 이용한 위상차가 90도에 가까울수록 로봇 돌고래의 최대 추력이 발생한다는 것 (Half-pi phase delay condition)을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 이용하면, 물고기와 같이 유연하는 수중 로봇의 경우, 위상차를 측정함으로써 최대 추력에 도달했는지에 대한 여부를 판단할 수 있다.

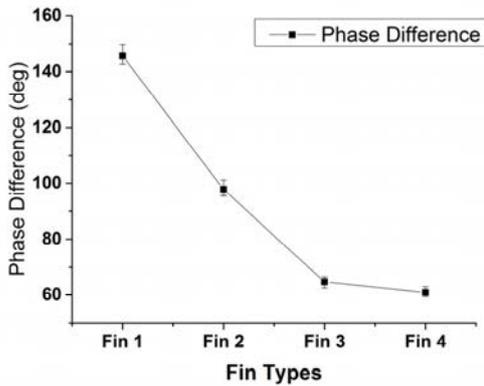


Fig. 6. Experimental results: Phase difference^[15].

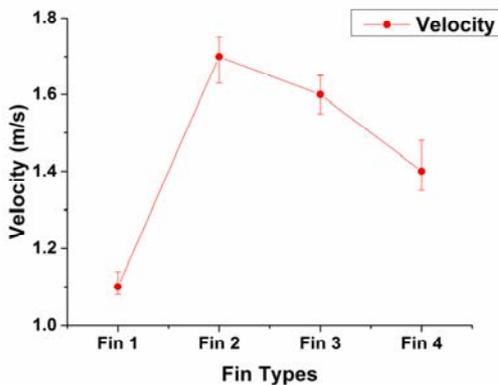


Fig. 7. Experimental results: Velocity of robotic dolphin^[15].

2.4.2 안정성 실험결과

강성이 강한 꼬리 지느러미가 구동할 경우 로봇 돌고래의 머리도 반발력에 의해 흔들리게 되며, 꼬리 지느러미의 강성에 따라 로봇 돌고래 머리가 흔들리는 정도도 변화하게 된다. 이러한 움직임은 로봇 돌고래의 구동 안정성에 영향을 미칠 수 있으며, 로봇 돌고래의 효율을 저하시킬 수 있다. 꼬리 지느러미 강성 변화에 따른 로봇 돌고래의 흔들림을 확인할 수 있도록 머리 부분에 Fig. 8과 같이 원점과 x축, y축을 정의하였다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 로봇 돌고래의 머리 Y축 방향 움직임이 시간에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 꼬리 지느러미의 강성이 증가할수록 머리의 Y축 방향 흔들림이 점차적으로 커지는 것을 볼 수 있다. 특히, Fin 1의 경우에, 머리의 움직임은 가장 작은 것을 확인할 수 있으며, 이는 Fin 1의 강성이 다른 꼬리 지느러미보다 작기 때문에 발생하는 현상이라고 할 수 있다.

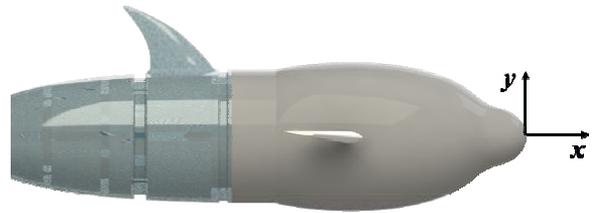


Fig. 8. Description of original axis and head position^[14].

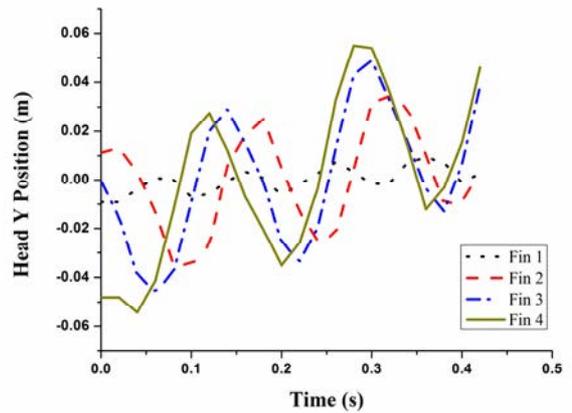


Fig. 9. Head Y position with varying the stiffness of the caudal fins^[14].

앞의 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 꼬리 지느러미의 강성에 따라서 로봇 돌고래의 머리가 흔들리는 정도를 확인할 수 있다. 강성이 큰 꼬리 지느러미를 장착한 로봇 돌고래의 경우, 머리 부분의 움직임이 큰 것을 볼 수 있으며, 이러한 움직임으로 인하여 로봇 돌고래 자체가 불안정한 모습을 보이게 된다. 또한 큰 흔들림으로 인하여 로봇 돌고래 머리 부분에 공기 방울이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 방울은 로봇 돌고래의 구동을 방해하는 저항으로 작용할 수 있으므로, 이를 줄이는 것이 중요하다.

결론적으로 로봇 돌고래의 안정성을 높이기 위해서는 꼬리 지느러미의 강성을 낮추는 것이 필요하다고 할 수 있다. 그러나, 앞의 결과에서 나타난 것과 같이 꼬리 지느러미의 강성이 낮아질 경우, 로봇 돌고래의 구동조건에 따라서 추력이 낮아지는 현상이 발생할 수 있다. 따라서, 안정성과 동적 성능을 고려하여 꼬리 지느러미의 강성을 선정하는 것이 중요하다.

3. 결 론

본 논문에서는 로봇 돌고래에 강성이 다른 꼬리 지느러미를 장착하여 실험함으로써 동적 성능 및 안정성에 대하여 확인해 보았다. 유연한 꼬리 지느러미를 통하여 로봇 돌고래를 구현함으로써 구동 조건에 따라 최대 추력을 달성하고, 이와 더불어 안정성도 확보할 수 있었다.

기존 연구 결과인 최대 추력을 위해서는 꼬리 지느러미의 구동 각도와 꼬리 지느러미의 구부러지는 각도 사이에 90도의 위상차가 발생해야 한다는 결과(Half-pi phase delay condition)를 통하여 로봇 돌고래의 구동조건에 적합한 꼬리 지느러미의 강성을 확인하였다. 최적의 꼬리 지느러미를 장착한 로봇 돌고래를 실험한 결과 다른 꼬리 지느러미를 장착하였을 경우에 비하여 속도 측면에서 빠른 것을 확인할 수 있었다.

또 다른 측면으로는 꼬리 지느러미 강성에 따른 로봇 돌고래의 안정성 변화를 확인하였다. 꼬리 지느러미의 강성이 낮아질수록 로봇 돌고래의 머리 부분의 흔들림이 적게 되어 안정성이 높아지게 된다. 그러나 꼬리 지느러미의 강성을 낮추게 되면 구동 조건에 따라서 로봇 돌고래의 속도가 저하되는 문제점이 나타난다. 그러므로, 로봇 돌고

래의 안정성과 동적 성능을 유지하기 위해서는 구동 상황에 따라 적절한 꼬리 지느러미의 강성을 사용하는 것이 중요하다. 따라서 향후에는 구동 조건에 따라 꼬리 지느러미의 강성이 능동적으로 변할 수 있는 메커니즘을 장착한 로봇 물고기에 대한 연구를 진행하여 로봇 돌고래의 성능을 높이고자 한다.

References

- [1] United States. Naval Meteorology and Oceanography Command and Naval Research Laboratory (U. S.), *Review of autonomous underwater vehicle (AUV) developments*. Stennis Space Center, Miss.: Naval Oceanographic and Atmospheric Research Laboratory, 2001.
- [2] J. Kim and J. Kim, "Development of a Pool Cleaning Robot and its Cleaning Performance Evaluation," *J. Korea Robot. Soc.*, vol. 7, no. 4, pp. 243–251, Dec. 2012.
- [3] D. Kim and J. Lee, "Optimal Swimming Motion for Underwater Robot, Crabster," *J. Korea Robot. Soc.*, vol. 7, no. 4, pp. 284–291, Dec. 2012.
- [4] J. Liang, T. Wang, and L. Wen, "Development of a two-joint robotic fish for real-world exploration," *J. Field Robot.*, vol. 28, no. 1, pp. 70–79, Jan. 2011.
- [5] D. S. Barrett, "Propulsive efficiency of a flexible hull underwater vehicle," Ph.D. Thesis, Dept. of Ocean Eng., Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, Boston, USA, 1996.
- [6] R. Fan, J. Yu, L. Wang, G. Xie, Y. Fang, and Y. Hu, "Optimized design and implementation of biomimetic robotic dolphin," 2005, vol. 2005, pp. 484–489.
- [7] K. H. Low, "Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots," *Mech. Mach. Theory*, vol. 44, no. 3, pp. 615–632, Mar. 2009.
- [8] G.-H. Yang, K.-S. Kim, S.-H. Lee, C. Cho, and Y. Ryuh, "Design and Control of 3-DOF Robotic Fish 'ICHTHUS V5.5,'" in *Intelligent Robotics and Applications*, J. Lee, M. C. Lee, H. Liu, and J.-H. Ryu, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 310–319.
- [9] J. Tangorra, C. Phelan, C. Esposito, and G. Lauder, "Use of Biorobotic Models of Highly Deformable Fins for Studying the Mechanics and Control of Fin Forces in Fishes," *Integr. Comp. Biol.*, vol. 51, no. 1, pp. 176–189, Jul. 2011.
- [10] P. Valdivia y Alvarado and K. Youcef-Toumi,

“Performance of machines with flexible bodies designed for biomimetic locomotion in liquid environments,” 2005, vol. 2005, pp. 3324–3329.

[11] K. H. Low and C. W. Chong, “Parametric study of the swimming performance of a fish robot propelled by a flexible caudal fin,” *Bioinspir. Biomim.*, vol. 5, no. 4, p. 046002, Dec. 2010.

[12] 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, Sep. 1997.

[13] Y.-J. Park, U. Jeong, J. Lee, S.-R. Kwon, H.-Y. Kim, and K.-J. Cho, “Kinematic Condition for Maximizing the Thrust of a Robotic Fish Using a Compliant Caudal Fin,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 28, no. 6, pp. 1216–1227, 2012.

[14] Y.-J. Park and K. Cho, “Stabilizing the head motion of a robotic dolphin with varying the stiffness of a caudal fin,” in *2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2013, pp. 901–904.

[15] Y.-J. Park and K.-J. Cho, “Improving the Swimming Speed of a Robotic Dolphin with a Compliant Caudal Fin,” *8th Korea Robot. Soc. Annu. Conf.*, May 2013.

[16] J. Yu, Y. Hu, J. Huo, and L. Wang, “Dolphin-like propulsive mechanism based on an adjustable Scotch yoke,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 44, no. 3, pp. 603–614, Mar. 2009.



박용재

2004 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
 2013 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
 2013 서울대 박사후연구원

2014~현재 선문대학교 기계공학과 조교수
 관심분야 : 생체모사로봇, 소프트 로봇, 새로운 메커니즘, 의료용 로봇 등



조규진

1998 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
 2000 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
 2007 MIT 기계공학과 (공학박사)

2008 하버드 박사후연구원
 2009~현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수
 관심분야 : 생체모사로봇, 소프트로봇, 의료용로봇, Smart 액추에이터, Wearable 로봇 등