

가변강성 메커니즘을 적용한 로봇 돌고래 설계 및 제작

박용재

강원대학교 메카트로닉스공학과

Design and Manufacturing of Robotic Dolphin with Variable Stiffness Mechanism

Yong-Jai Park

Department of Mechatronics Engineering, Kangwon National University

요약 수중 로봇의 가장 기본 성능이라 할 수 있는 동적 성능인 유영속도와 동적 효율 향상을 위해 수중생물을 모사한 로봇들이 주로 연구되고 있다. 그중에서 생체모사 소프트 로봇은 유연한 꼬리지느러미를 적용함으로써 높은 자유도를 구현할 수 있다. 다만, 유연한 구동부의 효율을 높이기 위해서는 구동 주파수에 맞추어 꼬리지느러미의 강성이 바뀌어야 한다. 따라서, 연구를 통해 새로운 형태의 가변강성 메커니즘을 구현하고, 이를 연구 과정에서 검증하였다. 본 연구에서는 실제 돌고래의 해부도에서 영감을 얻어, 가변강성 메커니즘을 적용한 돌고래 로봇을 새로이 설계하고 제작하는 과정을 기술하였다. 실제 돌고래의 척추 모양을 모사하여, 절삭과 적층형 공정으로 가변강성 구동부를 제작하였다. 로봇 돌고래를 구동하기 위한 텐던도 실제 돌고래의 텐던 위치를 고려하여 배치하였으며, 추가로 강성 변화를 위한 텐던을 설치하였다. 돌고래의 유선형 외형을 모사하여 로봇 돌고래를 제작하였고, 강성 변화에 따른 로봇 돌고래의 유영속도를 측정하였다. 동일한 구동 주파수에 꼬리지느러미 구동부의 강성을 변화시켰을 때, 로봇 돌고래의 유영속도의 차이가 약 1.24배, 추력으로는 약 1.5배 변화하였다.

Abstract Bio-inspired underwater robots have been studied to improve the dynamic performance of fins, such as swimming speed and efficiency, which is the most basic performance. Among them, bio-inspired soft robots with a compliant tail fin can have high degrees of freedom. On the other hand, to improve the driving efficiency of the compliant fins, the stiffness of the tail fin should be changed with the driving frequency. Therefore, a new type of variable stiffness mechanism has been developed and verified. This study, which was inspired by the anatomy of a real dolphin, assessed a process of designing and manufacturing a robotic dolphin with a variable stiffness mechanism. By mimicking the vertebrae of a dolphin, the variable stiffness driving part was manufactured using subtractive and additive manufacturing. A driving tendon was placed considering the location of the tendon in the actual dolphin, and the additional tendon was installed to change its stiffness. A robotic dolphin was designed and manufactured in a streamlined shape, and the swimming speed was measured by varying the stiffness. When the stiffness of the tail fin was varied at the same driving frequency, the swimming speed and thrust changed by approximately 1.24 and 1.5 times, respectively.

Keywords : Bio-inspired Robot, Robotic Dolphin, Variable Stiffness, Soft Robotics, Design, Manufacturing

본 논문은 2019년도 강원대학교 대학회계 학술연구 조성비와 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(NRF-2016R1A5A1938472).

*Corresponding Author : Yong-Jai Park(Kangwon National Univ.)

email: yjpark@kangwon.ac.kr

Received February 25, 2020

Accepted May 8, 2020

Revised March 19, 2020

Published May 31, 2020

1. 서론

수중환경은 인간이 탐험하지 못한 미지의 영역이 많은 부분으로써, 많은 연구자가 수중 로봇에 대한 중요성을 인지하고 지속적으로 연구를 수행하고 있다[1-3]. 특히, 수중 로봇의 다양한 동적 성능 중에서 가장 기본이 되는 유영속도와 효율 향상에 많은 관심을 기울이고 있다[4].

수중 로봇을 구동하는 방법은 주로 프로펠러를 사용하여 회전력을 이용하는 방법과 물고기와 같이 지느러미를 왕복운동 함으로써 추력을 얻는 방법이 있다. 한정된 공간에서 추력을 최대한으로 얻기 위해서는 수중생물의 유영 방법을 모사하는 것이 좋은 방법일 수 있으며, 왕복운동으로 구동하는 시스템이 수중에서 효율 측면에서 효과적이라는 연구 결과도 있다[5]. 수중생물과 같이 왕복운동을 구현하기 위한 다양한 방법 중에 스마트 액추에이터를 사용하는 것이 가장 간단한 방법이다[6]. 그러나 수중 로봇의 크기에 따라 스마트 액추에이터를 적용하는 것에 제약이 발생할 수 있다. 스마트 액추에이터는 수중 로봇이 커지면 커질수록 상대적으로 발생하는 힘이 기존의 모터와 같은 액추에이터에 비해 작은 특징이 있다. 특히, 빠른 유속을 가르며 유영하기 위해서는 추력이 높아야 한다. 따라서, 기존의 수중 로봇은 주로 모터를 액추에이터로 많이 사용하고 있으며, 추력을 높이기 위해서는 보다 큰 모터를 사용하여 추력을 높이고 있다. 그러나, 수중생물의 움직임과 같이 유연한 움직임을 구현하기 위해서는 많은 수의 모터가 필요하게 된다. 따라서, 수중 로봇의 한정된 공간 내에서 동적 효율을 높이기 위해서는 보다 근본적인 해결책이 필요하다. 이를 위해 구동부를 연성 재질로 구성함으로써 사용하는 액추에이터의 개수를 줄이고 효율을 높이는 연구가 진행되어왔다[7-17].

Lauder는 움직이는 패턴의 변화나 지느러미의 강성 변화 등을 이용하여 꼬리지느러미나 옆 지느러미의 움직임에 관한 연구를 진행해왔다[7-8]. Alvarado 등은 실리콘으로 유연한 꼬리지느러미를 제작하고 이를 로봇 물고기에 적용함으로써 그 유용성을 확인하였다[9-10]. 다른 연구자들도 지느러미나 그 조인트에 강성 변화를 적용함으로써 로봇 물고기의 성능이 향상될 수 있도록 연구를 진행해오고 있다[11-17].

Park은 구동부가 움직이는 주파수에 따라 꼬리지느러미의 강성을 변화시키면 추력을 높일 수 있으며, 그에 따라 최적의 강성을 찾는 방법을 제시하였다[18]. 다만, 꼬리지느러미의 강성을 수동적으로 바꾸어 실험을 시행하여 한계를 보여주었다. 이에 능동적으로 꼬리지느러미의

강성을 바꾸는 메커니즘에 관한 연구를 진행하였고, 그 효율성을 확인하였다[19-20].

본 연구에서는 가변강성 메커니즘을 적용한 로봇 돌고래의 설계와 제작 및 실험 결과에 대하여 다룬다. 기존의 강성 조인트로 구성된 로봇 시스템과 달리 연성 재질로 이루어진 소프트 로봇 시스템은 설계에서부터 제작까지 새로운 방법으로 진행해야 한다. 따라서, 로봇 돌고래에 적합할 수 있도록 실제 돌고래 형상을 고려하고, 척추 모양을 본뜬 구동부 설계와 이를 바탕으로 제작하는 시스템에 대하여 정리하였다. 구동부와 외형, 제어기를 통합하여 로봇 돌고래를 제작하였고, 이를 대형수조에 넣어 구동부의 강성을 변화시킨 후, 추력을 비교하여, 구동부 강성 변화 시스템의 효율성을 확인하였다.

2. 본론

2.1 로봇 돌고래에 적용할 가변강성 구동 메커니즘 설계 및 제작

2.1.1 구동 메커니즘 개요

물고기나 돌고래 등 수중생물과 같은 구동을 얻기 위해서는 왕복 움직임을 구현하여야 한다. 이를 링크와 조인트로 이루어진 강성체로 완전한 움직임을 구현하기 위해서는 Fig. 1의 왼쪽과 같이 많은 수의 조인트가 필요하다. 조인트의 개수가 증가할수록 강성 지느러미로 유연한 움직임을 구현할 수 있다. 꼬리지느러미의 움직임을 유연하게 할수록 추력이 향상될 수 있으나, 링크와 조인트로 이루어진 강성체를 활용하려면 유연한 지느러미 구동부의 움직임을 위하여 자유도를 증가하는 것이 필요하다. 그러나, 유연한 움직임을 구현하기 위하여 지속적으로 조인트를 추가하여 자유도를 증가하는 것은 실질적인 제어와 시스템 구조상 어려운 점이 있다.

이러한 이유로, 꼬리지느러미의 유연한 움직임을 자연스럽게 구현하고 자유도를 높이는 방안으로 연성체로 이루어진 꼬리지느러미 구동부를 고안하였다. 이렇게 고안된 연성 꼬리지느러미를 이용한 구동부는 Fig. 1의 오른쪽과 같이 자연스럽게 유연한 움직임을 구현할 수 있으며, 자유도도 높일 수 있는 장점이 있다. 다만, 꼬리지느러미를 구성하는 재질의 특성에 따라 강성이 결정되어 꼬리지느러미 구동부의 강성을 능동적으로 변화할 수 없는 문제가 있다. 꼬리지느러미 구동부에 강성 변화를 주면, 구동 조건에 맞추어 추력을 효율적으로 조절할 수 있

게 된다. 따라서, 꼬리지느러미 구동부의 강성을 조절할 수 있는 메커니즘이 필요하다.

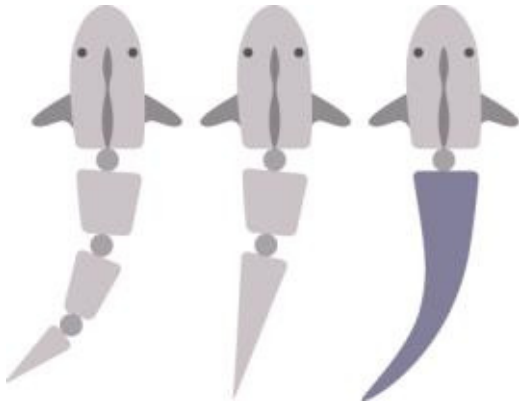


Fig. 1. Robotic fish with joints and rigid links and robotic fish with compliance. Adapted from [21]

2.1.2 가변강성 메커니즘 설계

로봇 돌고래에 필요한 가변강성 메커니즘을 구현하기 위하여 기존 연구에 연구 개발하고 있는 메커니즘을 활용하였다. 기존의 가변강성 메커니즘은 Fig. 2와 같이 척추의 구조에서 영감을 받아서 그 구조를 차용하였다. 강성 파트와 연성 파트를 교대로 배치하고 시스템의 중간에 텐션을 이용하여 이를 당김으로써 연성체가 줄어들게 된다. 이때 연성체의 영률이 비선형으로 변화하게 되어 시스템의 전체 강성이 변화하게 된다.

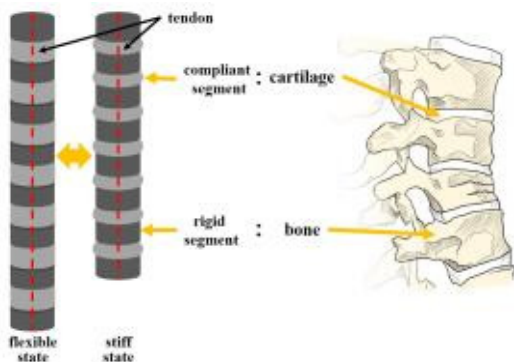


Fig. 2. Schematic drawing depicting the concept of a variable stiffness structure. Adapted and modified from [20]

이러한 가변강성 메커니즘은 실제 모사하고자 하는 돌고래의 구조와 유사하게 배치하여 적용할 수 있다. 실제

돌고래의 구조는 Fig. 3과 같이 척추동물이기 때문에 척추뼈와 연성 디스크로 구성되어 있으며, 여기에 텐션들이 배치되어있는 구조로 되어 있다. 이러한 돌고래의 내부 구조를 모사하여 실제 로봇 돌고래의 구동부를 구성하여 가변강성이 가능한 구동부를 설계하였으며, 그 유효성을 기존 연구로 검증하였다[20].

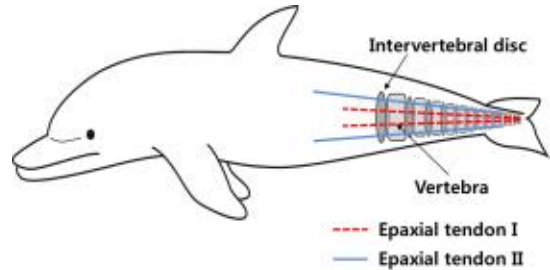


Fig. 3. Concept of the robotic dolphin adopted from the anatomy of the dolphin. Adapted from [20]

2.1.3 가변강성 메커니즘 제작

가변강성 메커니즘을 제작하기 위해서 각 부위의 크기에 맞는 몰드를 CNC 가공기를 이용하여 절삭공정으로 제작하였다. Fig. 4와 같이 돌고래 꼬리지느러미 부분을 설계하고 그것에 맞게 부위를 구분하여 왁스에 배치하여 몰드를 제작하였다. 제작한 몰드에 Smooth-On사의 실리콘 제품인 EcoFlex를 부어 적층형 공정으로 꼬리지느러미 구동부 모듈을 제작하였다. 꼬리지느러미의 상하 움

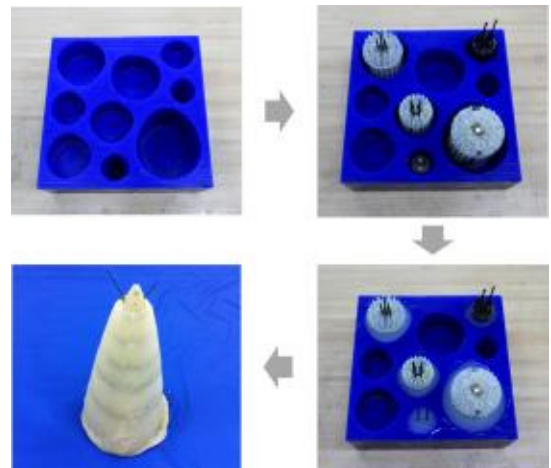


Fig. 4. Manufacturing process of the driving parts: First, mold is machined for flexible segments. Second, rigid segments are placed in the mold. Third, silicon is poured over rigid components. Finally, the produced parts are attached. Adapted from [21]

직임을 구현하고 강성의 변화를 주기 위한 텐던의 통로를 미리 확보하기 위하여 탄소봉을 몰드에 배치한 후 실리콘을 부어 꼬리지느러미를 완성하였다.

몰드를 이용하여 제작된 꼬리지느러미는 외형적으로 더욱 유연하게 구현하기 위하여 Fig. 5와 같이 두 번째 몰드에 배치한 후 실리콘을 덧씌움으로써 돌고래 꼬리지느러미 구동부 제작을 완성하였다.

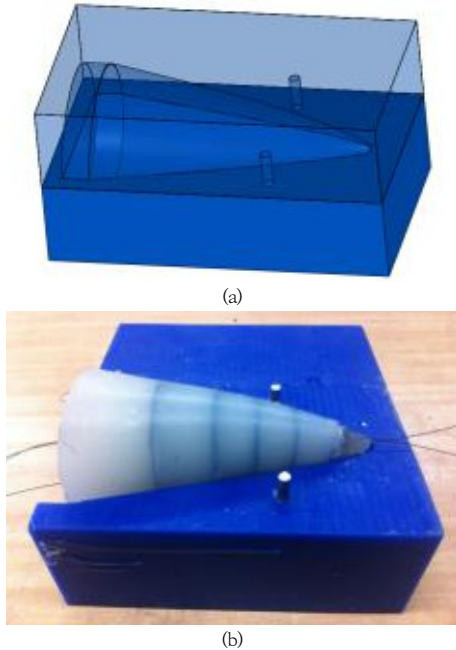


Fig. 5. Manufacturing process of the peduncle part. Adapted from [21]
(a) CAD of peduncle mold
(b) Each driving segment glued with silicone

실제 돌고래의 움직임과 모양에 영감을 받아 돌고래 형태의 생체모사로봇을 설계 및 제작하였다. 전체적인 형상은 Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 항력을 감소시키기 위해 유선형으로 전체적인 형상을 설계하였다.

로봇 돌고래의 구동부는 Fig. 7에서와 같이 상하 움직임을 위한 구동 텐던과 강성을 변화시키기 위한 텐던으로 구성하였다. 구동 텐던을 당기게 되면 꼬리지느러미의 끝부분이 당겨지게 되고, 이로 인해 자연스럽게 실리콘으로 제작된 구동부가 구부러지게 된다. 이러한 움직임을 반복하여 추력을 생성할 수 있다. 강성의 변화는 구동부 중심을 관통한 텐던을 당기게 되면, 구동부의 실리콘이 압축되면서, 물성이 비선형적으로 증가하게 된다. 이로 인하여, 구동부 자체의 강성이 높아지는 현상이 발생하여, 강성의 변화를 구현할 수 있게 된다.

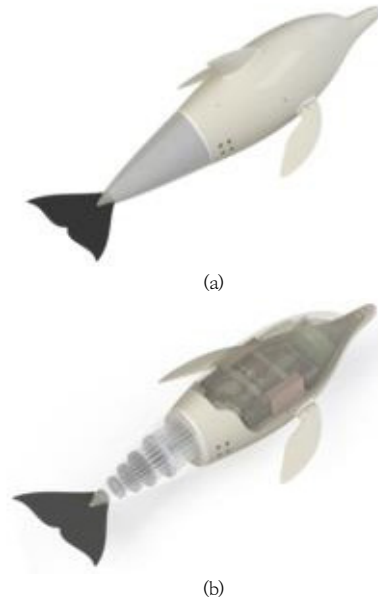


Fig. 6. Design of robotic dolphin. Adapted from [22]
(a) CAD model of the robotic dolphin
(b) CAD model of the inside of the robotic dolphin

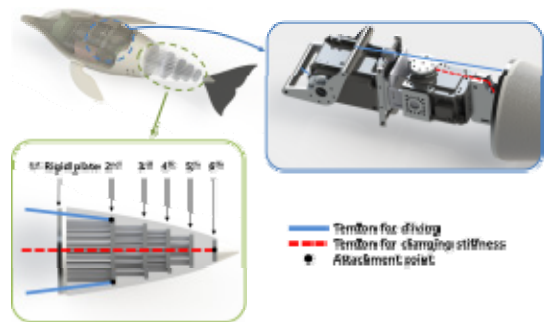


Fig. 7. Schematic design of the robotic dolphin driving system. Adapted and modified from [20]

제작된 로봇 돌고래는 Table. 1에서와 같이, 대략 2.3 kg의 질량으로 제작되었다. 구동부의 움직임과 강성 변화를 위하여 각각 한 개의 로보티즈 사의 모터가 사용되었으며, 좌우 회전 움직임을 위한 두 개의 하이텍 사의 서보모터가 장착되었다. 구동부의 경우 DC 서보모터를 장착하여 최대 3 Hz 정도의 움직임까지만 구현할 수 있게 설계되었다. 로봇 돌고래를 제어하기 위하여 ARM을 기반으로 설계된 칩을 사용하였으며, 무선으로 물속에서도 전파를 이용하여 조종하기 위해 40 MHz의 낮은 주파수를 사용하는 조종기를 선택하였다. 로봇 돌고래의 외형은 ProJet HD3000 3D프린터를 이용하여 제작하였다.

Table 1. Specification of robotic dolphin adapted from [22]

	Spec.
Mass	Approx. 2.3 kg
Dimension	520 mm × 230 mm × 160 mm
Actuator for driving	One Robotis MX106 (8.0 Nm at 11.1V)
Actuator for pectoral fin	Two Hitec HS-7980TH (3.5 Nm at 6.0V)
Actuator for changing stiffness	One Robotis MX28 (2.3 Nm at 11.1V)
Controller	STM32F10x-64 (ARM based)
Network	RF 40 MHz
Power source	One LiPo 11.1V, One NiMH 4.8V
Materials	Polycarbonate, Aluminum, Acrylic Plastic

최종적으로 제작된 로봇 돌고래는 Fig. 8과 같다. 간결하게 제작하기 위하여 내부 공간을 최대한으로 활용하였으며, 로봇 돌고래 외형 커버를 쉽게 분리하고 조립할 수 있도록 제작하였다. 방수 성능을 높이기 위하여 조립되는 부위에 실리콘을 부착하였다. 옆 지느러미와 연결되는 회전축에 방수를 위하여 그리스를 내부에 채울 수 있도록 설계 제작하였다.

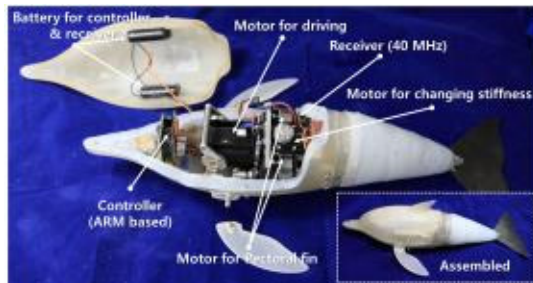


Fig. 8. Internal structure of the robotic dolphin and an assembled robotic dolphin. Adapted from [22]

로봇 돌고래의 구동부의 강성 변화는 Fig. 9와 같이 육안으로도 확인할 수 있다. 모터를 이용하여 텐션을 당기면, 실리콘이 압축되면서 강성이 커지게 된다. Fig. 10에서와 같이 실제 물에서 로봇 돌고래의 강성 변화에 따른 동적 성능 변화를 확인하기 위하여 크기 110 m x 8 m x 3.5 m인 대형수조에서 실험을 시행하였다. Fig. 10에서는 로봇 돌고래가 좌측에서 우측으로 움직이는 것을 확인할 수 있다. 강성 변화에 따른 유영속도를 확인하

기 위하여 구동 주파수를 2 Hz로 고정된 후 로봇 돌고래의 속도를 측정하였다.



(a)



(b)

Fig. 9. Robotic dolphin with a bio-inspired variable stiffness mechanism

- (a) Flexible state of the robotic dolphin
(b) Stiff state of the robotic dolphin

이렇게 측정한 로봇 돌고래의 속도를 각각 연성 상태와 강성 상태로 나누어 계산하였으며, 이를 토대로 로봇 돌고래의 추력과 스트로우홀 수를 계산하였다.

$$T = \frac{1}{2} \rho U^2 C_d A_{ref} \quad (1)$$

Where, T denotes thrust, ρ denotes density of water, U denotes the speed of robotic dolphin, C_d denotes the drag coefficient of robotic dolphin, A_{ref} denotes the cross-sectional area of robotic dolphin

$$St = \frac{f A_{mp}}{U} \quad (2)$$

Where, St denotes Strouhal number, f denotes driving frequency of robotic dolphin, A_{mp} denotes amplitude of caudal fin

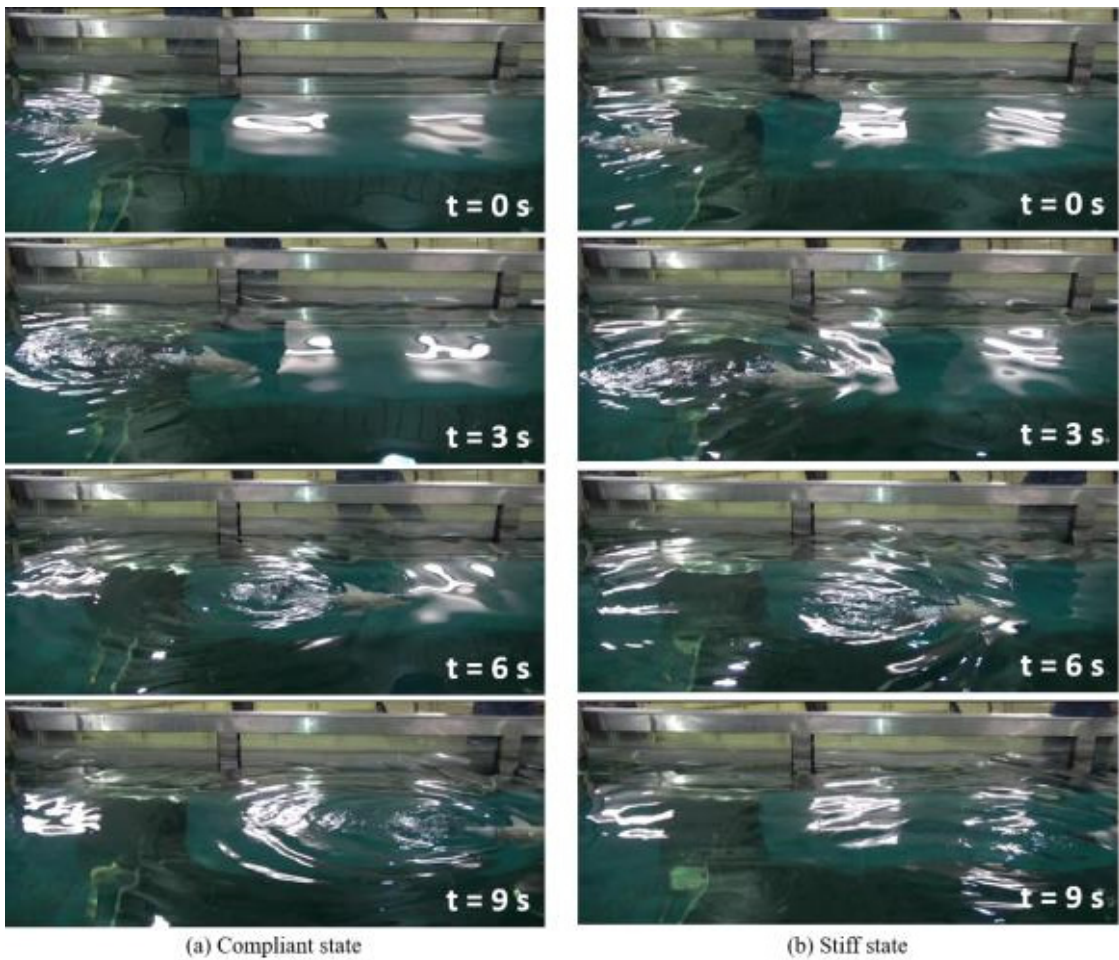


Fig. 10. Snapshot sequence of a robotic dolphin when it swims.
(a) Compliant state (b) Stiff state

스트로우홀 수는 진동운동 하는 움직임을 설명하는데 사용되는 무차원수이며, 주로 물고기와 같이 움직이는 수중 생명체를 비교하기 위하여 사용된다. 로봇 돌고래의 추력을 계산하기 위한 변수들은 Table 2와 같다.

Table 2. Parameters for thrust calculation

Parameters	Data
Frequency (f)	2 Hz
Water density (ρ)	1000 kg/m ³
Drag coefficient (C_d)	0.1
Reference area (A_{ref})	0.08 m ²
Amplitude (A_{mp})	0.07 m

로봇 돌고래 실험을 토대로 강성이 변화된 연성 상태

와 강성 상태를 비교한 결과, 구동 주파수가 일정하게 고정되어 있음에도 불구하고, 속도의 차이가 발생하는 것을 Table 3에서 확인할 수 있다. 이러한 결과는 꼬리지느러미의 강성을 변화시킴으로써 구동 주파수에 맞추어 유영 속도를 향상할 수 있다는 것을 의미한다. 구동 주파수가 낮을 경우, 강성을 낮추고, 구동 주파수가 높을 경우, 강성을 높이는 방법으로 유영속도를 향상할 수 있다.

Table 3. Experimental results

	Compliant state	Stiff state
Speed (m/s)	0.25	0.31
Body length speed (BL/s)	0.48	0.60
Thrust (mN)	250	384
Strouhal Number	0.56	0.45

로봇의 길이 대비 속도로 비교한 결과, Table 4에서와 같이 가변강성 로봇 돌고래의 유영속도가 구동부의 강성 최적화를 수행하지 않았음에도 전반적으로 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 4. Comparison of swimming speed

	Ours	A[8]	B[11]	C[13]	D[14]
Speed (BL/s)	0.60	0.68	0.35	0.50	0.40

3. 결론

본 논문은 구동부의 강성을 변화시켜 동적 성능을 향상할 수 있는 로봇 돌고래에 대한 설계와 제작 과정 및 실험 결과를 다루고 있다. 수중에서 왕복운동을 하는 구동기의 경우, 구동 주파수에 맞추어 강성을 변화시키면 추력이 증가할 수 있다.

- 1) 이러한 원리를 로봇 돌고래에 구현하기 위하여 가변강성 메커니즘을 로봇 돌고래에 맞추어 새롭게 설계하였다. 즉, 로봇 구동부에 가변강성 메커니즘과 왕복운동을 동시에 탑재하기 위한 시스템을 고려하여 설계하였다.
- 2) 로봇 돌고래 시제품은 절삭공정과 적층공정을 융합하여 제작을 진행하였다. 구동부의 강성이 있는 파트는 절삭공정으로, 실리콘으로 구성된 연성 파트는 주로 적층공정을 활용하였다.
- 3) 로봇 돌고래의 강성 변화에 따른 동적 성능을 실험한 결과, 같은 구동 주파수에서 로봇 돌고래의 유영속도의 차이가 약 1.24배, 추력으로는 약 1.5배 변화하는 것을 확인하였다.

본 연구를 보다 확장하기 위해서는 구동 주파수 상태에 맞추어 강성을 실시간으로 조절할 수 있는 제어시스템이 필요하다. 앞으로는 로봇의 움직임을 확인하여 강성을 조절할 수 있는 자동 제어시스템에 관한 연구를 수행할 계획이다.

References

- [1] A. Raj, A. Thakur, "Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy—a review of research", *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol.11, No.3, p.031001, Apr. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-3190/11/3/031001>
- [2] D. S. Barrett, *Propulsive efficiency of a flexible hull underwater vehicle*, Ph.D.'s thesis, MIT, Cambridge, MA, USA, 1996.
- [3] H. Morikawa, S. Nakao, S.-I. Kobayashi, 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, Sep. 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmec.44.1117>
- [4] D. T. Roper, S. Sharma, R. Sutton, P. Culverhouse, "A review of developments towards biologically inspired propulsion systems for autonomous underwater vehicles", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol.225, No.2, pp.77-96, May 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1475090210397438>
- [5] J. Liang, T. Wang, L. Wen, "Development of a two-joint robotic fish for real-world exploration", *Journal of Field Robotics*, Vol.28, No.1, pp.70-79, Jan. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.20363>
- [6] W.-S. Chu, K.-T. Lee, S.-H. Song, M.-W. Han, J.-Y. Lee, H.-S. Kim, M.-S. Kim, Y.-J. Park, K.-J. Cho, S.-H. Ahn, "Review of biomimetic underwater robots using smart actuators", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.13, No.7, pp.1281-1292, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0171-7>
- [7] C. J. Esposito, J. L. Tangorra, B. E. Flammang, G. V. Lauder, "A robotic fish caudal fin: effects of stiffness and motor program on locomotor performance", *Journal of Experimental Biology*, Vol.215, No.1, pp.56-67, Jan. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.062711>
- [8] A. Jusufi, D. M. Vogt, R. J. Wood, G. V. Lauder, "Undulatory Swimming Performance and Body Stiffness Modulation in a Soft Robotic Fish-Inspired Physical Model", *Soft Robotics*, Vol.4, No.3, pp.202-210, May 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1089/soro.2016.0053>
- [9] P. V. y Alvarado, K. Youcef-Toumi, "Design of Machines With Compliant Bodies for Biomimetic Locomotion in Liquid Environments", *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, Vol.128, No.1, pp.3-13, Mar. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2168476>
- [10] P. V. y Alvarado, K. Youcef-Toumi, "Performance of Machines with Flexible Bodies Designed for Biomimetic Locomotion in Liquid Environments", in

[1] A. Raj, A. Thakur, "Fish-inspired robots: design,

- Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Barcelona, Spain, pp.3324-3329, April 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570623>
- [11] B. Epps, P. Valdivia y Alvarado, K. Youcef-Toumi, A. Techet, "Swimming performance of a biomimetic compliant fish-like robot", *Experiments in Fluids*, Vol.47, No.6, pp.927-939, Dec. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0684-8>
- [12] H. El Daou, T. Salumae, A. Ristolainen, G. Toming, M. Listak, M. Kruusmaa, "A bio-mimetic design and control of a fish-like robot using compliant structures", in *2011 15th International Conference on Advanced Robotics*, IEEE, Tallinn, Estonia, pp.563-568, June 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAR.2011.6088645>
- [13] K. H. Low, 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, Dec. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-3182/5/4/046002>
- [14] R. Fan, J. Yu, L. Wang, G. Xie, Y. Fang, Y. Hu, "Optimized design and implementation of biomimetic robotic dolphin", *2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE, Shatin, China, pp.484-489, July 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2005.246315>
- [15] I. Yamamoto, Y. Terada, T. Nagamatu, Y. Imaizumi, "Propulsion system with flexible/rigid oscillating fin", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.20, No.1, pp.23-30, Jan. 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1109/48.380249>
- [16] B. Ahlborn, S. Chapman, R. Stafford, R. Harper, "Experimental simulation of the thrust phases of fast-start swimming of fish", *Journal of Experimental Biology*, Vol.200, No.17, pp.2301-2312, Sep. 1997.
- [17] S. B. Behbahani, X. Tan, "Design and dynamic modeling of electrorheological fluid-based variable-stiffness fin for robotic fish", *Smart Materials and Structures*, Vol.26, No.8, p.085014, Jul. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa7238>
- [18] Y.-J. Park, U. Jeong, J. Lee, S.-R. Kwon, H.-Y. Kim, K.-J. Cho, "Kinematic Condition for Maximizing the Thrust of a Robotic Fish Using a Compliant Caudal Fin", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.28, No.6, pp.1216-1227, Dec. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2012.2205490>
- [19] T. M. Huh, Y.-J. Park, K.-J. Cho, "Design and analysis of a stiffness adjustable structure using an endoskeleton", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.13, No.7, pp.1255-1258, Jul. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0168-2>
- [20] Y.-J. Park, T. M. Huh, D. Park, K.-J. Cho, "Design of a variable-stiffness flapping mechanism for maximizing the thrust of a bio-inspired underwater robot", *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol.9, No.3, p.036002, Sep. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-3182/9/3/036002>
- [21] Y.-J. Park, *Maximizing the thrust of a bio-inspired robotic fish with compliance*, Ph.D.'s thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, pp.4-88, 2013.
- [22] Y.-J. Park, D. Park, K.-J. Cho, "Design and manufacturing a robotic dolphin to increase dynamic performance", in *2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, IEEE, Jeju, Korea, pp.76-77, Nov. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/URAI.2013.6677475>

박 용 재(Yong-Jai Park)

[종신회원]



- 2004년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
- 2013년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 2005년 4월 : 삼성전자 반도체 총괄

- 2014년 3월 ~ 2018년 8월 : 선문대학교 기계공학과 교수
- 2018년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 메카트로닉스공학과 교수

<관심분야>

소프트 로보틱스, 메커니즘 설계, 웨어러블 디바이스