

# 단일 구동기로 수중 이동이 가능한 수중 이동체 개발

## Development of Biomimetic Underwater Vehicle using Single Actuator

전명재<sup>1,2</sup>, 김동형<sup>2</sup>, 최현석<sup>1,✉</sup>, 한창수<sup>2,✉</sup>  
Myoung Jae Jun<sup>1,2</sup>, Dong Hyung Kim<sup>2</sup>, Hyeun Seok Choi<sup>1,✉</sup>, and Chang Soo Han<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 청정생산시스템연구소 (Department of Green Materials and Process R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology)

<sup>2</sup> 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang University)

✉ Corresponding author: hchoi@kitech.re.kr, Tel: +82-41-589-8311

cshan@hanyang.ac.kr, Tel: +82-31-400-4744

Manuscript received: 2015.12.10. / Revised: 2016.3.22. / Accepted: 2016.3.28.

*In this paper, we propose a novel propulsion method for a Biomimetic underwater robot, which is a bio-inspired approach. The proposed propulsion method mimics the pectoral fins of a real fish. Pectoral fins of real fish are able to propel and change direction. We designed the propulsion mechanism of 1 D.O.F. that has two functions (propel and change direction). We named this propulsion system 'Flipper'. The proposed propulsion method can control forward, pitch and yaw motion using the Flipper. We made an experimental underwater robot system and verified the proposed propulsion method. We measured its maximum speed and turning motion using an experimental underwater robot system. We also analyzed the thrust force from the maximum speed, using the thrust equation. Experimental results showed that our propulsion method enabled the thrust system of the biomimetic robot.*

KEYWORDS: Biomimetic robot (생체모방 로봇), Underwater robot (수중로봇), Fish robot (물고기 로봇)

### 기호설명

$F_T$  = Thrust

$F_B$  = Buoyancy

$\rho$  = Water density

$C_M$  = Center of mass

$C_B$  = Center of buoyancy

$C_F$  = Center of flipper mass

$B_V$  = Body volume

$g$  = Gravity acceleration

$F_{Ds}$  = Force of restitution

$F_I$  = Rotational Inertial force

$L_R$  = Distance of the  $C_M$  from the force sensor

$L_Z$  = Distance of the  $C_M$  from the Flipper

### 1. 서론

수중로봇 기술은 해양 탐사 및 해양 자원개발의 목적으로 최근 연구 개발이 증가하고 있는 분야이다.<sup>1</sup> 해양은 인간의 접근이 어려운 환경이기 때문에 해양 탐사를 위해서는 무인 수중운동체의 사용이 필요하다.<sup>2</sup> 이러한 무인 수중운동체는 모션

에서 유선 원격제어가 가능한 ROV (Remotely Operated Vehicle)와 유선 원격제어 없이 자체적으로 자율운항이 가능하여 광대역 수중탐사가 가능한 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)가 있다.<sup>3</sup> 수중운동체의 연구분야 중 하나는 생체모방형 로봇이다. 최근에는 생체모방과 관련된 기술의 발달과 자연생물체를 모사하려는 생체모방학 (Biomimetics) 및 자연계에서 영감을 얻어 개발에 적용하는 Bio-Inspired 관련 연구들이 진행되면서 수중로봇에서도 수중생물체의 움직임을 모사한 로봇이 연구되고 있는 것이다.<sup>4</sup> 수중생물체가 사용하는 운동은 고효율의 유영과 소음이 없는 추진운동을 가능하게 할 뿐만 아니라 급선회와 폭발적인 순간 가속을 할 수 있는 장점이 있다.<sup>5</sup> 그렇기 때문에 생체모방형 수중로봇은 자율무인잠수정 (Autonomous Underwater Vehicle) 및 어뢰 개발 등에 적용되는 연구가 많이 이루어 지고 있다.<sup>6</sup> 지금까지의 생체모방형 수중로봇들의 연구는 생물체를 모방한 몸체의 움직임과 꼬리 지느러미의 움직임을 모사하는 것에 중점을 두어왔다.<sup>7-13</sup> 본 논문에서는 단일 모터를 사용한 새로운 형태의 구동방식을 제안하고 제안된 구동방식을 실험을 통하여 검증하였다.

**2. 로봇 설계 & 구동원리**

제안된 시스템은 1자유도의 시스템으로 수중에서 직진 운동과 종동요 (Pitch) 그리고 선수동요 (Yaw) 운동이 가능하기 때문에 하나의 구동기만을 사용하여 수중에서 원하는 경로를 따라 이동이 가능하다. Fig. 1은 설계된 로봇의 도면이다. 로봇은 추력을 발생시키는 부분 (Flipper)과 구동기와 전자부품을 포함하고 있는 몸통부분 (Main Body)으로 구성된다. 꼬리는 직진운동 시 로봇의 선수동요 (Yaw)를 감소 시키는 역할을 하는 수직꼬리 지느러미 (Vertical Fin) 와 횡동요 (Roll)를 감소시키는 꼬리 지느러미 (Tail Fin)로 구성되어있다. 로봇의 몸통은 전체적으로 물속에서의 저항을 최소화 할 수 있는 유선형의 형태를 취하고 있으며 몸통과 꼬리는 회전조인트 (Revolute Joint)로 연결되어 있어 구동기의 회전에 따라 몸체와 꼬리의 상대 각이 변화한다. 로봇의 추력은 Fig. 1의 Flipper에 의해서 주로 발생한다. 추력을 만들어내는 Flipper는 Fig. 2(a)에서 보이는 바와 같이 물고기의 가슴 지느러미에서 영감을 얻어 설계되었다. 물고기의 가

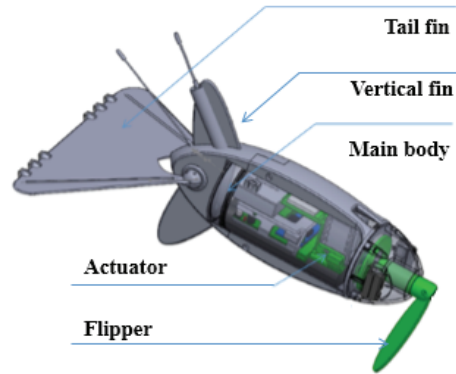


Fig. 1 Fish robot design using single actuator

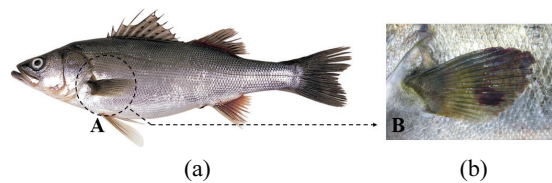


Fig. 2 The pectoral fin of fish

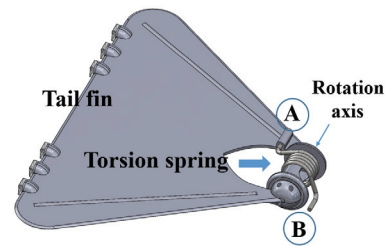


Fig. 3 The location of torsion spring

슴 지느러미는 물고기가 유속이 있는 물속에서 중심을 잡을 때 주로 사용된다. 본 논문에서는 물고기의 가슴 지느러미처럼 로봇의 추력과 방향제어의 기능을 하는 추진방식을 제안하고 이것을 Flipper Form 추진방식이라고 하였다.

꼬리의 회전축에는 구동기가 없다. 회전스프링은 꼬리의 회전축에 위치하며 Fig. 3에서 B부분이 로봇의 몸체에 고정되고 A 부분이 꼬리에 연결된다. 스프링은 물속에서 부력 조절 시 꼬리와 몸체를 수평으로 유지시키기 위한 강성조절 용도로 사용된다.

**2.1 추력 제어**

Fig. 4는 Flipper의 회전에 의한 추력 발생 과정을 순차적으로 표현한 그림이다. 몸체의 앞쪽에

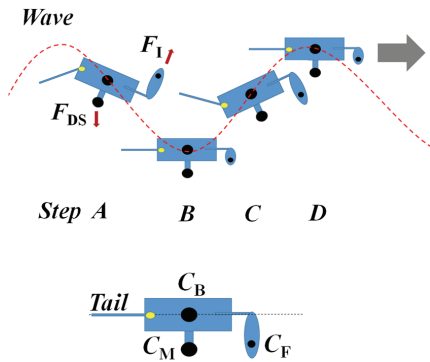


Fig. 4 Locomotion for straight propulsion

있는 단일 날개 형태의 스크류 (Flipper)가 회전을 하게 되면 일반 선박에서와 같이 추진력을 만들게 된다. 이때 Flipper의 끝단에는 무게추가 있어 Flipper의 무게 중심  $C_F$ 는 Flipper의 끝 쪽에 위치한다. Flipper가 회전하면 Fig. 4 Step A의  $F_1$ 와 같이 편심에 의한 영향으로 그림과 같이 한쪽 방향으로 원심력이 발생한다. 원심력에 의해 로봇이 진동하게 되며 좌우 방향으로의 진동의 크기는 상대적으로 상하 방향으로의 진동보다 작다. 로봇 형상 설계시 측면의 단면적을 더 크게 함으로써 좌우 진동을 억제하였다. 로봇의 몸체와 꼬리는 각기 다른 면적을 가지고 있어 물과의 저항력 차이로 움직임의 속도가 달라 상대각이 변화하게 된다. 이러한 움직임은 축편형 (Compressiform)운동을 하는 물고기의 유영 모습을 모사하는데 용이하다. 꼬리와 몸체의 부력차를 조정하기 위해 몸체와 꼬리 연결부위를 스프링으로 연결하여 강성을 조절할 수 있도록 하였다. 꼬리와 몸체의 상대각은 스프링의 강성을 조절함으로써 제어 할 수 있다.

Flipper의 회전에 의한 로봇의 움직임은 Fig. 4 Step A에서 Fig. 4 Step D로 순차적으로 진행하게 된다. 로봇이 진동하게 되면 Fig. 4 Step A에서 무게중심이 부력중심보다 밑에 있기 때문에 중력방향으로 복원력  $F_{DS}$ 가 발생하게 되고 로봇의 움직임은 Fig. 4 Step B로 변환된다. 로봇은 관성에 의해 Fig. 4 Step C까지 움직인 후 수평상태인 Fig. 4 Step D의 형태로 움직인다. 로봇은 Fig. 4 Step A에서 Fig. 4 Step D로 순차적인 움직임을 반복하며 움직인다. 이때 Flipper의 회전과 진동에 의한 로봇의 움직임은 유체의 흐름을 발생시키고 로봇 유영은 축편형 (Compressiform) 물고기의 움직임을 모사하며 전진하게 된다.

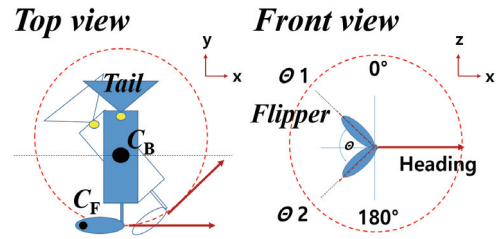


Fig. 5 Change of direction

### 2.2 방향 제어

Fig. 5는 제안한 수중 이동체에서 방향전환을 위한 Flipper의 움직임을 표현한 것이다. Flipper의 왕복 회전운동 구간에 대한 중심 각도를 제어함으로써 로봇은 원하는 방향으로 회전 할 수 있다. 로봇 앞쪽의 Flipper가 회전을 멈춘 상태로 이동하고자 하는 방향의 반대쪽에서 일정한 각을 가지고 왕복 운동을 한다. Flipper가  $\theta_1$ 에서  $\theta_2$ 까지 왕복운동을 하게 되면  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 의 중심각에서 유체의 흐름이 발생하게 되고 이때의 유체의 흐름은 로봇의 몸체를 회전하게 하는 회전력을 발생시키게 된다. 원하는 방향까지 회전 이동 후 Flipper의 구간 반복운동은 멈추고 다시 회전운동을 시작하여 목표 지점까지 이동한다.

### 2.3 유영과 Flipper의 운동 관계

제어기에는 로봇이 수중에서 유영을 할 수 있도록 유영 패턴이 Fig. 6과 같이 입력되어 있다. 외부의 조종 명령에 따라 로봇의 유영 패턴이 결정되면 각각의 유영에 따른 Flipper의 회전운동이 결정된다. 전진 시에는 Flipper가 0°부터 360°를 회전하게 되고 좌회전 시에는 215°부터 315° 구간을 반복운동을 하며 우회전 시에는 Flipper가 45°부터 135° 구간을 반복 운동을 한다.

### 3. 실험 시스템 구현

제안된 추진 방식의 실험을 위해 Fig. 7과 같이 수중 이동체를 구현하였다. 전체 길이는 350 mm, 폭은 145 mm로 전체무게는 0.134 kg으로 구현되었다.

모터제어를 위해 Arduino Nano를 사용하였으며 구동 모터는 FAULHABER사의 DC Encoder 모터를 사용하였다. 사용된 모터와 엔코더의 상세 내용은 Table 1과 2와 같다. 몸체를 구성하는 재질은 ABS로써 3D Printer를 이용하여 제작 한 후 실리콘을 사용하여 방수처리를 하였다. 제작된 수중이동

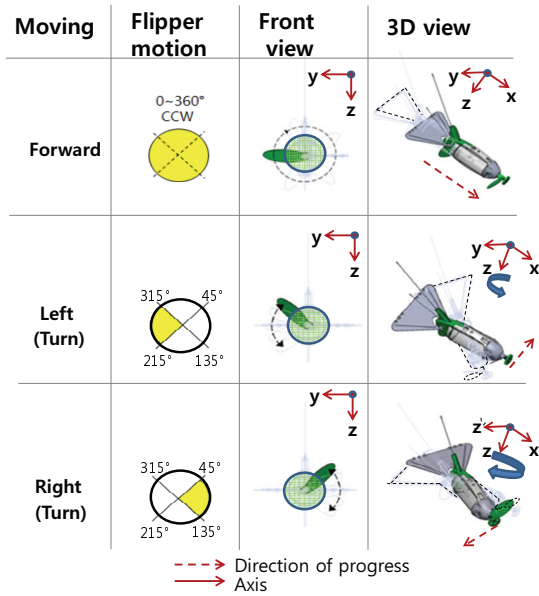


Fig. 6 Flipper control for swimming

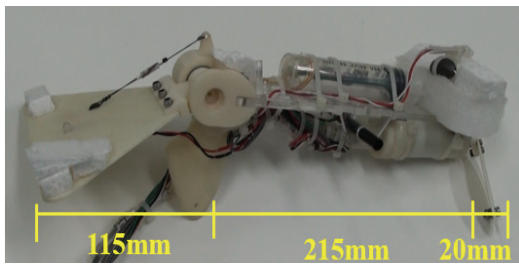


Fig. 7 Experiment robot mechanism

Table 1 Motor spec (FAULHABER 2224-006 SR)

Voltage	Power	Friction torque	Rated speed
DC 6V	4.55W	0.2mNm	6390min-1

Table 2 Encoder spec (IE2-8)

Voltage	Channel	Phase shift	Line/revolution
DC 5V	2	90°	8Pulse

체의 명령신호 전달을 위해 외부의 컴퓨터와 케이블로 연결하였다. 전원은 내부 전원으로 배터리 (DC 7.2 V 340 mA)를 사용하였다.

### 3.1 부력 설계

부력  $F_B$ 는 유체의 밀도  $\rho$ , 부피  $B_V$ , 중력가속도  $g$ 의 함수로써 식(1)과 같이 표현된다.<sup>8</sup> 수식에서도

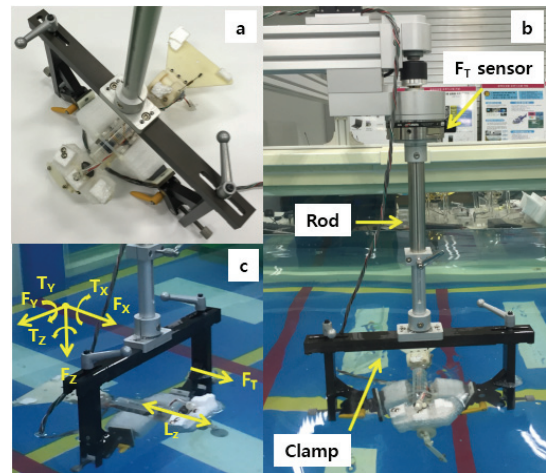


Fig. 8 Experiment of straight propulsion: (a) Clamp, (b) F/T(force) Sensor, (c) Coordinate system

알 수 있듯이 부력은 수중로봇의 부피와 밀접한 관계를 가지고 있으며 수중 시스템의 설계시 에너지 효율을 높이기 위해서 시스템은 중성부력에 최대한 근접하도록 설계된다. 설계된 수중이동체의 초기 부피값  $B_V$ 는  $0.0003743 \text{ m}^3$ 이며 질량은  $0.134 \text{ kg}$ , 유체밀도  $\rho$  값은 담수에서 사용하는 유체밀도 값인  $1002.68 \text{ kg/m}^3$  값을 사용하였다.<sup>8</sup> 제작된 수중이동체는 식(1)에 의해 부력을 조종하였다. 또한 전원이 Off된 상태에서 수면위로 서서히 부상할 수 있는 양성부력을 가지게 하고자 표면에 부력재 (스티로폼)를 추가하여 로봇이 양성부력을 가질 수 있도록 하였다.

$$F_B = \rho B_V g \tag{1}$$

### 3.2 항력과 추력

추력을 측정하기 위해서 Fig. 8에서와 같이 F/T (Force Torque)센서를 설치하였다. Flipper의 회전속도 (RPM)에 따른 각각의 추력 값을 실험적으로 측정하였다. 실험에 사용된 F/T (Force Torque) 센서는 ATI의 Omega 85 센서를 사용하였으며 Fig. 8(a)에서와 같이 클램프를 제작하여 로봇을 고정하였다. 클램프는 Fig. 8(b)에서처럼 센서와 Z축에 대하여 Rod로 연결되어 있고 Fig. 8(c)에서처럼 로봇의 추력방향과 센서의 X축 방향 (+)을 일치시켰다. Flipper의 속도 변화에 따른 각각의 추력 값은 5초 동안 획득한 데이터의 평균값으로 구하였다. 센서로부터 받은 각 축의 힘과 토크 데이터는 외팔보



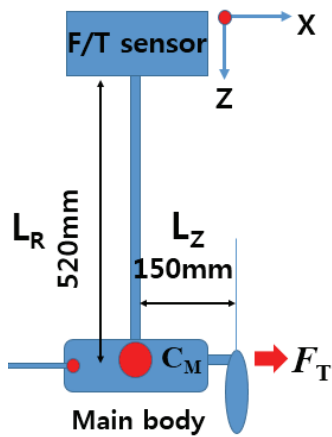


Fig. 9 6-axis force/torque sensor setup up

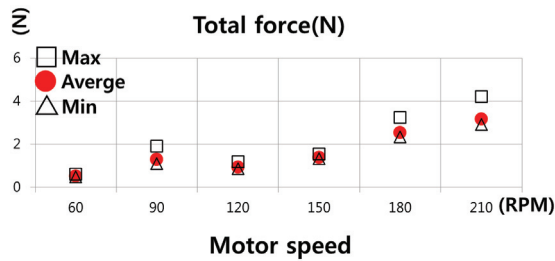


Fig. 10 RPM vs. Force

형태의 실험 시스템을 감안하여 식(2)에 의해 보정하였다.<sup>14</sup> 식(2)의  $F_x, F_y, F_z$  는 각 축에서의 축 방향의 힘 값이며  $T_x, T_y, T_z$  는 각 축에서의 토크 값이다.

$$\vec{F}_i = \vec{F}_x + \frac{\vec{T}_y}{L_R} + \vec{F}_y + \frac{\vec{T}_x}{L_R} + \vec{F}_z + \frac{\vec{T}_z}{L_Z} \quad (2)$$

Fig. 9의  $L_R$ 은 센서로부터 로봇의 무게 중심까지의 거리를 표현한 것이며 길이는 520 mm이다. Fig. 9에서의  $L_Z$ 는 추진장치 Flipper로부터 로봇의 무게 중심까지의 거리를 표현한 것이며 150 mm이다. Fig. 10은 Flipper의 RPM 변화에 따른 추력변화를 실험을 통하여 획득한 값을 보여준다. RPM 증가에 비례하여 추력이 증가됨을 볼 수 있다. 추진력을 얻기 위한 최소 RPM인 60 RPM에서의 측정된 추력 값은 0.508 N이다. 최대 추력을 얻기 위한 210 RPM에서의 측정된 추력 값은 3.1603 N 이다. 그래프를 보면 120 RPM에서 평균 추력 값이 0.16 N 줄어 들었다. 이것은 실험오차로 추정된다.

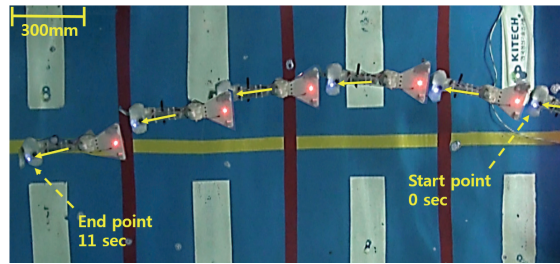


Fig. 11 Experiment of straight propulsion

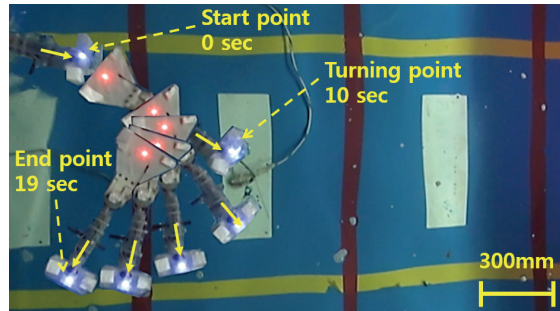


Fig. 12 Change of direction to the right

### 3.3 직진 주행과 속도 측정

속도 측정을 위해 실험은 가로 2 m, 세로 3 m, 수심 0.6 m의 수조에서 수행하였다. 영상 데이터를 획득하기 위한 카메라를 수조 위 2 m 높이에 설치하였다. 위치 추적을 위해 로봇의 앞쪽에는 청색 LED가 사용되었고 꼬리 부분에는 적색 LED가 사용되었다. 속도는 Fig. 11에서와 같이 총 이동거리를 총 이동시간으로 나누어 평균 속도를 구하였다. 총 이동거리는 영상 데이터의 적색 LED의 위치를 추적하여 구하였으며 상용 프로그램인 Image J가 사용되었다. 속도는 각각 60, 90, 120, 150, 180, 210 RPM에 대하여 10회 반복하여 측정하였다. Flipper의 회전속도가 60 RPM 일 때 로봇은 전진 추력을 나타내었다. 제안된 수중이동체는 Flipper의 최대 회전속도인 210 RPM에서 로봇의 최대속도 0.43 m/s 의 속도를 얻을 수 있었다.

### 3.4 유연 방향 전환 실험

수중 이동체의 방향 전환을 검증하기 위해 Fig. 12와 같은 실험을 실시하였다. 실험을 하는 동안 직진 구간에서 Flipper의 회전속도는 최대 추력을 낼 수 있는 210 RPM으로 고정하였다. 회전 구간에서는 Flipper가 분당 50회 반복 운동을 할 수 있도록 설정하였다. 방향전환을 위한 Flipper의 중심각

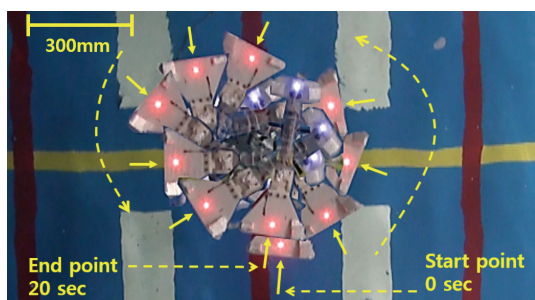


Fig. 13 Motion of spin

은 Fig. 6과 같이 45° - 135° 구간을 왕복운동 하도록 설정하였다. Fig. 12에서와 같이 수중 이동체는 10초 동안 전진 운동을 한 후 Turning Point에서 우측으로 방향전환을 시작해서 9초 후에 우측 방향으로의 방향전환이 완료되었다. 실험을 통해 Flipper의 구간 반복 운동으로 특정 방향으로의 회전이 가능함을 확인 할 수 있었다.

Fig. 13은 수중 이동체의 회전 성능을 검증하기 위해 원운동을 실험한 것이다. Flipper의 회전은 분당 50회 반복 운동을 할 수 있도록 설정하였다. 회전방향은 CCW 방향으로 Flipper의 중심각은 Fig. 6과 같이 215° - 315° 구간을 왕복운동 하도록 설정하였다. Start Point로부터 20초 후에 360°를 회전 할 수 있었고 지름 375 mm의 궤적이 생성되었다 Fig. 13에서와 같이 방향전환 시 몸통전체가 미끄러지면서 회전하기 때문에 방추형 (Fusiform) 타입의 물고기를 모사한 일반적인 물고기 로봇 보다는 회전 성능이 떨어질 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 단일 구동기로 수중 이동이 가능한 추진방식을 제안하고 추진방식을 검증하기 위해 테스트 플랫폼을 제작하여 실험을 진행하였다. 추력측정 실험장치를 제작하여 제안된 시스템의 최대 추력을 측정 하였고 전진 및 방향전환 원 운동 실험을 통해 제안된 추진 방식의 가능성을 검증하였다. 제안된 수중이동체는 하나의 구동기로 추진과 방향전환이 가능하다는 장점이 있지만 꼬리 지느러미로 추진하는 기존의 방추형 (Fusiform) 물고기 로봇보다는 추력이 떨어진다. 향후 꼬리 면적과 Flipper의 면적이 속도에 미치는 영향을 연구하여 효율성을 높일 수 있는 꼬리와 Flipper의 형상을 도출하고자 한다.

#### REFERENCES

1. Kim, D., Lee, S. S., Choi, H. S., Kim, J. Y., Lee, S., et al., "Dynamic Modeling and Motion Analysis of Unmanned Underwater Gliders with Mass Shifter Unit and Buoyancy Engine," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 28, No. 5, pp. 466-473, 2014.
2. Jee, S. C., Lee, H. J., Kim, M. H., and Moon, J. H., "Stabilization of Underwater Glider by Buoyancy and Moment Control: Feedback Linearization Approach," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 28, No. 6, pp. 546-551, 2014.
3. Jeong, S.-K., Choi, H.-S., Seo, J.-M., Tran, N. H., and Kim, J.-Y., "Design and Control of 6 D.O.F(Degrees of Freedom) Hovering AUV," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 19, No. 9, pp. 797-804, 2013.
4. Kim, D. H., Lee, S. H., Kwon, J. H., Han, C. H., and Park, J. H. "Trajectory Tracking Control of a Fish-Mimetic Robot Using CPG," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 32, No. 11, pp. 870-875, 2008.
5. Heo, S., Wiguna, T., Goo, N.-S., and Park, H.-C., "Mechanical Design, Fabrication and Test of a Biomimetic Fish Robot Using LIPCA as an Artificial Muscle," *the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 31, No. 1, pp.36-42, 2007.
6. Han, C. H., Lee, S. H., Shin, C.-R., and Park, J. H., "Hydrodynamics Analysis of Fish Locomotion Using a Biomimetic Fish Robot," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 31, No. 5, pp. 1914-1919, 2007.
7. Park, J.-H., Lee, T.-H., and Choi, Y.-K., "A Study on the Straight Cruis of Fish Robot according to Biological Mimic," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 1756-1763, 2011.
8. Antonelli, G., "Underwater Robots," Springer, 3<sup>rd</sup> Ed., pp. 37-40, 2013.
9. Moon, Y.-S., Seo, J.-N., Go, N.-Y., Kim, H.-S., and Bak, Y.-G., "Design of Mine Robot Platform," *Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 6, No. 4, pp. 064-071, 2009.
10. Zhou, C., Chong, C., Zhong, Y., and Low, K.,

- “Robust Gait Control for Steady Swimming of a Carangiform Fish Robot,” Proc. of IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 100-105, 2009.
11. Geder, J., Sandberg, W. C., and Ramamurti, R., “Multi-Camera, High-Speed Imaging System for Kinematics Data Collection,” Nabal Research Laboratory, Vol. Nrl/Mr 6401-07-9054, pp. 1-9, 2007.
  12. Geder, J. D., Palmisano, J., Ramamurti, R., Ratna, B., and Sandberg, W. C., “Fuzzy Logic PID Based Control Design and Performance for a Pectoral Fin Propelled Unmanned Underwater Vehicle,” Proc. of IEEE International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 40-46, 2008.
  13. Nguyen, Q. S., Heo, S., Park, H. C., and Byun, D., “Thrust Improvement of an Fish Robot Actuated by Compressed Unimorph Piezoelectric Composite Actuator,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1603-1608, 2009.
  14. Yang, G.-H., Kim, K.-S., Lee, S.-H., Cho, C., and Ryuh, Y. “Design and Control of 3-DOF Robotic Fish ‘ICHTHUS V5.5,’” in: Intelligent Robotics and Applications, Lee, J. M., Lee, M. C., et al., Eds. Springer-Berlin Heidelberg, pp. 310-319, 2013.