

## 전자기 구동 유영 마이크로로봇

변동학\* · 김준영\* · 백승만\* · 최현철\*\* · 박종오\* · 박석호†  
(2009년 7월 10일 접수, 2009년 9월 15일 수정, 2009년 9월 16일 심사완료)

### Swimming Microrobot Actuated by External Magnetic Field

Donghak Byun, Junyoung Kim, Seungman Baek, Hyunchul Choi, Jong-oh Park  
and Sukho Park

**Key Words:** Fish Like Mechanism(물고기모사 메커니즘), Swimming Microrobot(유영 마이크로로봇), External Magnetic Field(외부자기장), Wireless Drive(무선구동), 2-Pair Helmholtz Coil(두 쌍 헬름홀츠코일)

#### Abstract

The various electromagnetic based actuation(EMA) methods have been proposed for actuating microrobot. The advantage of EMA is that it can provide wireless driving to microrobot. In this reason a lot of researchers have been focusing on the EMA driven microrobot. This paper proposed a swimming microrobot driven by external alternating magnet field which is generated by two pairs of Helmholtz coils. The microrobot has a fish-like shape and consists of a buoyant robot body, a permanent magnet, and a fin. The fin is directly linked to the permanent magnet and the magnet is swung by the alternating magnet field, which makes the propulsion and steering power of the robot. In this paper, firstly, we designed the locomotive mechanism of the microrobot boy EMA. Secondly, we set up the control system. Finally, we demonstrated the swimming robot and evaluated the performance of the microrobot by the experiments.

#### 기호설명

$\tau$  : 토크(N·m)

$V$  : 체적(m<sup>3</sup>)

$\vec{M}$  : 자화강도(A/m)

$\vec{B}$  : 자속밀도(T)

$B_{x,y}$  : x, y 축의 자속밀도(T)

$\theta$  : 영구자석의 회전각(°)

$I_{dc}$  : 전류의 오프셋(A)

$I_m$  : 전류의 진폭(A)

$I$  : 전류의 진동(A)

$\omega$  : 전류의 각속도(rad/s)

$t$  : 시간(s)

$\phi$  : 위상각(°)

$A, B$  : y축 진동 전류의 최대, 최소(A)

$C, D$  : x축 진동 전류의 최대, 최소(A)

$I_{max}$  : 최대 전류 진폭 (A)

$n$  : 각 4 사분면 상수

$I_{dc,x}, I_{dc,y}$  : 진동 전류의 오프셋 (A)

$I_{m,x}, I_{m,y}$  : 진동 전류의 진폭 (A)

$\alpha$  : 회전각도(°)

[이 논문은 2009년도 동역학 및 제어부문 춘계학술대회 (2009. 5. 21-22, BEXCO) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : spark@jnu.ac.kr

TEL : (062)530-1687 FAX : (062)530-0267

\* 전남대학교 기계시스템공학부

\*\* 전남대학교 기계공학과

## 1. 서론

최근에 MEMS와 로봇기술의 발달은 마이크로 단위의 로봇에 대한 가능성을 키우고 있으며, 그에 따라 관련영역에 대한 관심을 키우고 있다. 이러한 마이크로로봇의 크기는 그 형태를 육안으로 겨우 확인이 가능할 정도로 작기 때문에 모터와 리튬폴리머와 같은 구동기와 축전지를 사용할 수 없다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 문제를 해결 가능한 방식의 하나로 외부자기장을 이용한 방식이 있으며, 이에 관련된 연구가 최근 들어 활발히 진행되고 있다.<sup>(2)</sup>

마이크로 로봇은 주로 인체에 적용할 수 있는 의료용으로 개발되고 있다. 특히 혈관 치료용 개발되는 로봇은 직경이 작은 실린더 내의 유체를 지나가는 유영로봇으로 구상해 볼 수 있다. 이는 공학적으로 발생하는 문제를 극복하기 위해 자연에서 모태가 있다. 이는 생체모방공학이라 불리며, 오랜 세월 동안 환경에 적응해 오면서 진화해 온 생물들의 행동 또는 모습을 모방하기 때문에 특정 문제에 대한 해결 방법을 제시하여 시행착오를 줄일 수 있다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서는 물고기의 움직임의 모사하여 혈관 내에서 이동할 수 있는 유영 마이크로로봇을 개발하고자 한다.<sup>(5)</sup>

현재 많은 연구자들에 의해 외부자기장과 생체모방공학을 이용한 유영 마이크로 로봇에 대한 연구되고 있으며, 여러 이동 방식이 알려져 있다. B.J. Nelson은 외부자기장으로 구동하며, 박테리아의 편모운동을 모사한 로봇을 제안하였다.<sup>(2)</sup> 이 로봇은 외부의 회전자계를 이용하여 나사 모양의 몸체가 회전하며 추진력을 얻는 원리를 이용하였다. S. Guo 은 물고기를 모방한 로봇을 제안하였고,<sup>(4)</sup> 이 물고기 로봇은 지름 4mm 원형자석으로 된 몸체와 얇은 필름의 지느러미로 구성되었다. 이 로봇은 외부자기장에 의해 자석을 위아래로 흔들고 이에 부착된 지느러미가 움직여 구동력을 발생시켜 유영한다. 하지만 이 방법은 코일이 감긴 축으로만 이동이 가능한 단점이 있다.

본 연구에서는 2쌍의 헬름홀츠 코일에서 발생한 자기장을 이용하여 물고기 로봇을 움직일 수 있는 방법을 제안하였다. 물고기 로봇은 영구자석으로 만들어진 몸체와 PDMS(Polydimethylsiloxane) 재질의 지느러미를 갖는다. 조이스틱을 통해 방향을 입력

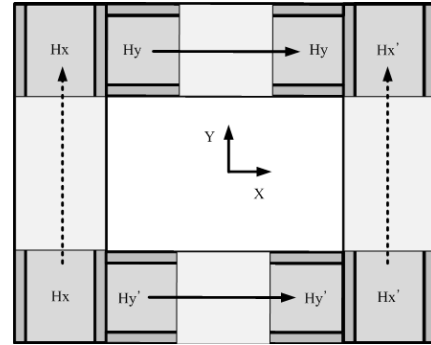


Fig. 1 Helmholtz Coil Arrangement

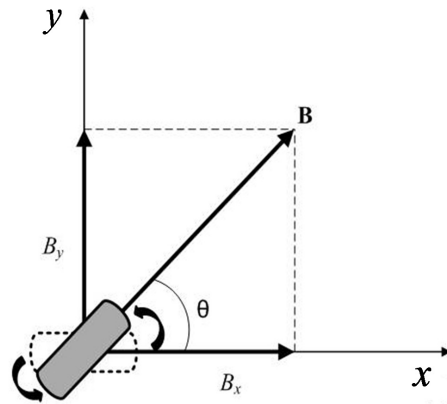


Fig. 2 Rotation of Permanent Magnet in the External Magnetic Field

하면 LabVIEW로 작성된 프로그램을 통해 헬름홀츠 코일에 흐르는 전류를 제어하여 최종적으로는 자기장 및 유영로봇을 제어한다.

실험에 앞서, 관심영역 내에서 헬름홀츠 코일에 의해 발생하는 자기장과 영구자석의 움직임을 예측하였다. 그 후, 헬름홀츠 코일과 유영 로봇을 제작하고, 이동제어 실험을 수행하였다. 마지막으로 다양한 실험을 통해 유영 로봇의 최적화된 사양을 유도하였다.

## 2. 코일 시스템 제작

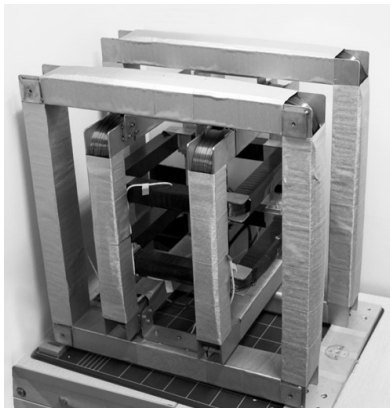
### 2.1 전자기적 분석

헬름홀츠 코일은 관심영역 내부에 균일한 자기장을 형성하기 위해 사용된다.<sup>(6)</sup> 관심영역 내에 영구자석이 있다면 식 (1)에 의해 토크가 발생된다.<sup>(7)</sup>

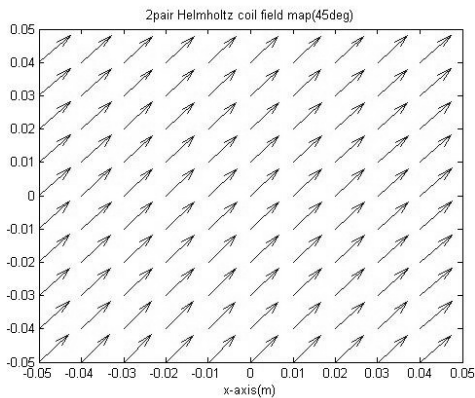
$$\tau = \vec{M} \times \vec{B} \quad (1)$$

**Table 1** Specification of Helmholtz Coil System

구분	a(mm)	d(mm)	코일두께	권선 수
X	250	272.25	2	577
Y	180	196.02	1.8	415



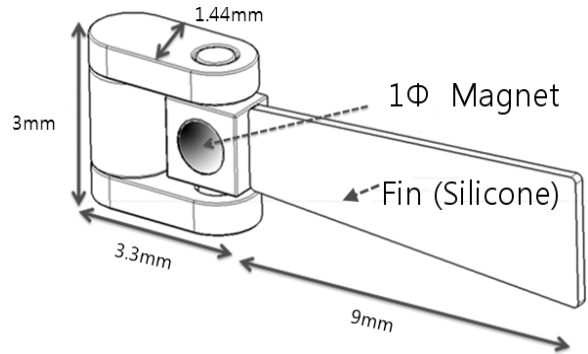
**Fig. 3** 2-Pair Helmholtz Coil



**Fig. 4** External Magnetic Field

본 연구에서 사용되는 2쌍의 헬름홀츠 코일은 Fig. 1과 같이 x축과 y축 상에 배치되고 각 코일에 의해 발생되는 자기장의 세기와 방향을 제어하면 x-y평면상의 임의의 방향으로 균일한 자기장 형성이 가능하다. 이때 발생된 자기장의 방향과 영구자석의 자화방향이 일치할 때까지 토크가 발생하며 영구자석은 자기장의 방향과 일치할 때까지 회전하게 된다.

Fig. 2에 보이는 것처럼 x축의 코일에 전류를 인가하면  $B_x$ 가 형성되고 영구자석은 x축 방향으로 정렬된다. 이때 y축에 전류를 인가하면  $B_y$ 가 추가적으로 형성되어 두 자기장 벡터의 합 방향으로 자기장  $\vec{B}$ 가 형성되고, 영구자석은 자기장 방향과 일치되기 위해  $\theta$ 만큼 회전하게 된다.



**Fig. 5** Structure of Swimming Robot

### 2.2 헬름홀츠 코일 시스템 설계

이 실험에서는 사각형태의 헬름홀츠 코일을 사용하였다.<sup>(8)</sup> 코일부 설계 시 각 코일에 흐르는 전류 값이 같으면 관심영역 내부에 같은 크기의 자기장이 형성되도록 권선수를 정하였다. 각 코일의 직경과 권선 수 및 전체 크기는 Table. 1에 나타내었고, 이러한 값에 의해 제작된 코일 시스템은 Fig. 3에 나타나 있다.

### 2.3 자기장 해석

설계된 코일 시스템을 검증하기 위해 MATLAB 프로그램을 이용하여 입력한 전류에 의해 관심영역 내에 형성되는 자기장을 분석하였다. 관심영역은 0.1×0.1m으로 설정하고, 각 코일에 흐르는 전류가 1A일 때의 자기장 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 이 때 화살표의 방향은 자기장의 방향, 길이는 자기장의 세기를 나타낸다. 여기에서 알 수 있듯이 약 45°방향으로 균일한 자기장이 형성되므로 코일 시스템은 본 연구에 적합하게 설계되었다고 할 수 있다.

## 3. 유영 마이크로로봇 제작

### 3.1 유영 로봇

일반적으로 유영 마이크로로봇은 몸체와 동력부, 구동부로 이루어져있다.<sup>(3)</sup> 기존 유영 마이크로로봇은 추진력을 발생시키기 위해 동력부에 배터리와 소형모터를 삽입하여 마이크로로봇이라는 이름에 걸맞지 않게 구조가 복잡하고 크게 제작될 수밖에 없었다. 우리는 이러한 문제점을 해결하기 위해 동력부를 제거하고 앞서 언급한 외부 자기장을 이용하여 동력 제공 시스템을 선택함에 따라 마이크로로봇의 크기를 줄일 수 있었다.

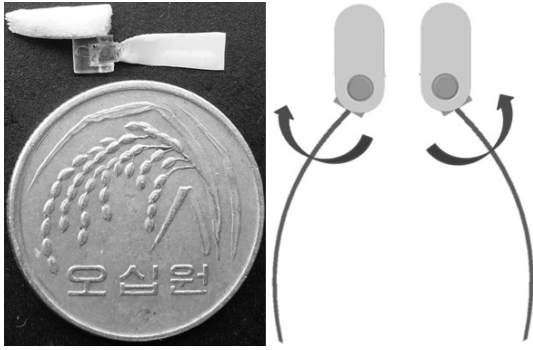


Fig. 6 Photograph of Swimming Robot and Movement

### 3.2 로봇 구성

유영 마이크로로봇은 아크릴을 이용한 몸체, 1mm 자석을 이용한 구동부, 얇은 실리콘으로 된 지느러미 부분으로 이루어져있으며 물에 띄우기 위해 몸체에 우레탄을 부착하였다. 전체 구성은 Fig. 5에 나타내었다. 로봇의 전체 크기는 1.44×12.3×3mm이다. 몸체와 구동부를 합친 길이는 3.3mm이고 지느러미 길이는 9mm이며 두께는 0.2mm이다.

### 3.3 구동원리

유영로봇은 물고기의 움직임을 모사를 했으며 자기장의 세기의 조절을 통해 구동부의 1mm 자석이 붙은 힌지를 좌우로 움직인다. 힌지에 부착된 실리콘 지느러미의 좌우 움직임으로 추진력을 발생시켜 유영을 할 수 있는 원리이다. Fig. 6에서는 유영로봇의 모습과 유영원리를 나타낸다.

## 4. 구동 이론

영구자석은 두 쌍의 헬름홀츠 코일이 생성하는 자기장의 방향과 일치할 때까지 회전한다. Fig. 7 보이는 회전각도로 자기장의 방향을 진동시키면, 유영로봇 내의 영구자석 또한 진동하게 되며 이 영구자석과 연결된 지느러미를 통해 추진력을 발생시키게 된다. 유영로봇의 자석에 토크를 유도하는 자기장은 2쌍의 헬름홀츠 코일에 인가되는 전류의 제어를 통해 변하므로 2차원 평면에서 로봇의 이동방향과 속도를 조정할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_x(t) &= I_{dc,x} + I_{m,x} \sin(\omega t + \phi) \\ I_y(t) &= I_{dc,y} + I_{m,y} \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

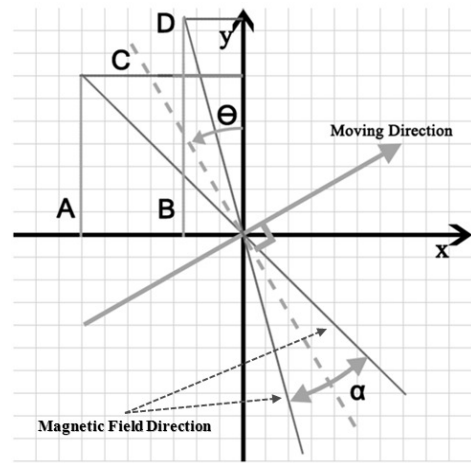


Fig. 7 Moving Direction Analysis

식 (2)는 각 쌍의 헬름홀츠 코일에 최종적으로 인가되는 전류의 함수이다. 사인함수  $I_x(t)$ ,  $I_y(t)$ 의 Offset 값인  $I_{dc,x}$ 와  $I_{dc,y}$ 는 유영로봇의 이동방향을 결정하고,  $I_{m,x}$ 와  $I_{m,y}$ 는 각 사인함수의 진폭 값으로서 유영로봇 지느러미의 회전각도에,  $\omega$ 는 유영로봇 지느러미의 진동 주파수에 영향을 준다. 두 쌍의 헬름홀츠 코일에 인가되는 전류의 위상차는 없으므로 두 함수의 위상은 모두  $\phi = 0$ 이다. 함수의  $\omega$ 는 원하는 진동주파수로 고정하며, Offset과 진폭은 이동방향의 함수이다.

$$\begin{aligned} A &= I_{\max} \cos\left(\frac{\pi}{2}n + \theta + \frac{\alpha}{2}\right) \\ B &= I_{\max} \cos\left(\frac{\pi}{2}n + \theta - \frac{\alpha}{2}\right) \\ C &= I_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{2}n + \theta + \frac{\alpha}{2}\right) \\ D &= I_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{2}n + \theta - \frac{\alpha}{2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

(n=0,1,2,3)

식 (3)의 A, B, C, D는 자기장의 세기를 결정하는 최대전류  $I_{\max}$ 를 x, y요소로 분해한 것이다. 최대전류  $I_{\max}$ 와 자기장 방향의 회전각도는 고정되어 있다. 각 4사분면 마다 결정되는 상수 n은, 유영로봇의 영구자석과 추진력의 방향이 수직을 이루므로 유영로봇의 이동방향과 조종기의 방향을 일치시키기 위해 제 4사분면에서 n=0, 제 1사분면에서 n=1, 제 2사분면에서 n=2, 제 3사분면에서 n=3을 가져야 한다.

$$I_{dc,x} = \frac{C+D}{2}, I_{dc,y} = \frac{A+B}{2} \quad (4)$$

유형로봇의 이동방향은 자기장의 진동 중심축으로 나타낼 수 있다. 그러므로 식 (4)에서 보는 것처럼 각 축의 헬름홀츠 코일이 순간적으로 발생시키는 최대, 최소전류요소의 평균으로 나타낼 수 있고, 이는 각 축의 헬름홀츠 코일에 입력되는  $I_{dc,x}$ ,  $I_{dc,y}$ 이 된다.

$$I_{m,x} = \frac{C-D}{2}, I_{m,y} = \frac{A-B}{2} \quad (5)$$

사인함수의 진폭은 함수값의 최대값과 최소값의 절반임을 알고 있다. 이와 같은 방법으로  $I_x(t)$ 과  $I_y(t)$ 의 진폭  $I_{m,x}$ ,  $I_{m,y}$ 는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

### 5. 유형 로봇 실험

#### 5.1 실험장치 구성도

Fig. 8은 실험장치의 구성을 나타낸다. 이 실험에서는 제작된 로봇이 놓인 수조가 관심영역 내부에 위치하게 된다. 로봇의 움직임을 관찰하기 위해 Camscope(Sometech Vision)를 설치하였다. 조이스틱에서 입력된 값들을 분석하고, 유형방향에 따른 자기장의 세기와 방향을 제어할 수 있도록 PXI 제어기와 LabVIEW(National Instrument), 그리고 전류의 제어가 가능한 파워 서플라이(Agilent 6652A)를 사용하였다. 이 때, 코일에 흐르는 전류의 방향을 제어하기 위해 릴레이 소자로 이루어진 회로를 이용하였다.

#### 5.2 지느러미 회전각도에 따른 속력 변화 실험

제작된 유형 마이크로로봇의 최적 성능 상태를 찾기 위해 지느러미의 회전각도의 변화에 따른 이동속도를 측정하는 실험을 하였다. 유형 마이크로로봇의 지느러미 길이는 9mm로 했으며 주파수는 0.9Hz로 하였다. 실험결과는 Fig. 9에 그래프와 같이 나타난다.

이 실험에서는 회전각도가 커질수록 속도가 증가하는 모습을 보인다. 특히 60 ~ 80°구간에서는 유형 마이크로로봇을 제어하기 쉬웠고, 지느러미가 가장 유연하게 움직이는 모습을 보였다. 60°

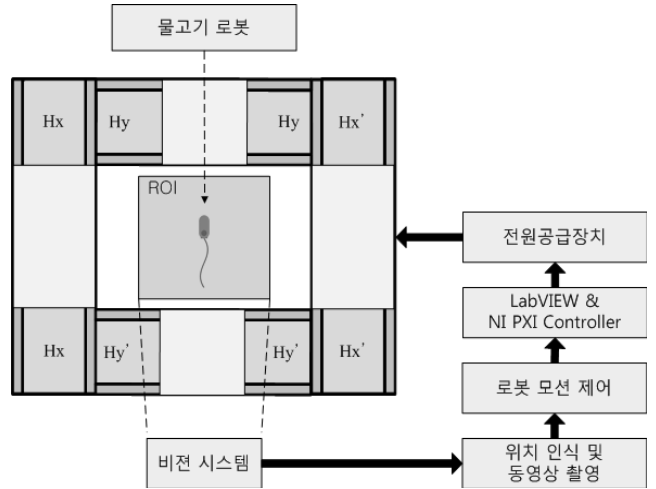


Fig. 8 Experiment Setup

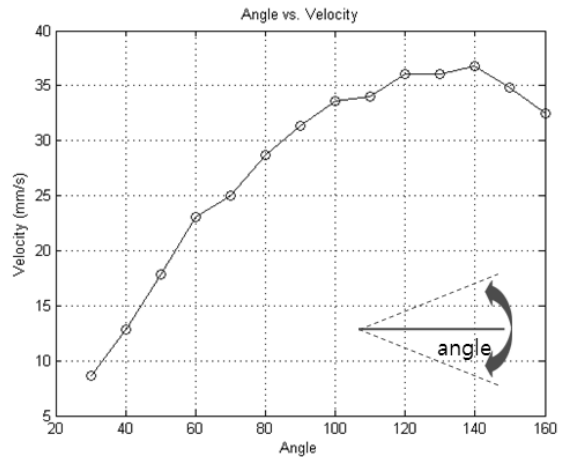


Fig. 9 Rotation Angle vs. Velocity

이하 각도에서는 마이크로로봇의 응답성은 좋았지만 지느러미가 딱딱한 모습을 보였다. 80° 이상 각도에서는 마이크로로봇의 응답성은 나빠졌고, 지느러미는 유연한 모습을 보였다. 특히 80° 이상에서는 마이크로로봇의 전체적인 움직임이 커서 원하는 방향으로 진행하지 않아 제어하기가 어려웠다.

#### 5.3 지느러미 길이에 따른 속력 변화 실험

마이크로로봇의 최적화 된 길이를 알아보기 위하여 지느러미 길이를 6 ~ 15mm까지 변화를 주면서 실험을 해보았다. 지느러미 회전각도는 70°로 고정하였고 결과는 Fig. 10에 나타났다.

그래프에서 보는 것처럼 지느러미 길이가 9mm 일 때 가장 자연스러운 유영을 하였다. 6mm 일 때는 몸체와 지느러미가 같이 움직이는 모습을

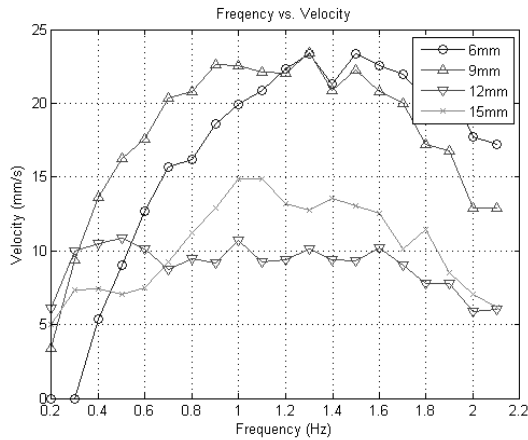


Fig. 10 Frequency vs. Measured Velocity

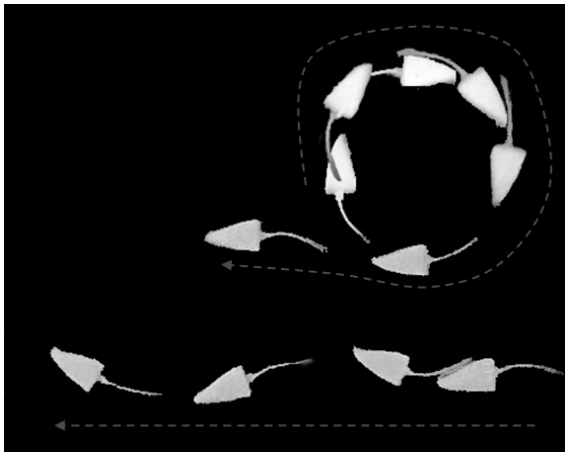


Fig. 11 The Practice Swimming of Microrobot on the 2D Plane

보였으며 낮은 주파수에서는 움직임이 거의 없었다. 지느러미 길이가 짧아지면 지느러미가 움직이더라도 충분한 추력을 만들어내지 못함을 알 수 있다. 15mm 일 때는 지느러미가 유연하게 움직였지만 속도가 감소하였다. 이는 마이크로로봇의 전체적인 질량이 증가하였기 때문으로 추정된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 우리는 외부자기장으로 움직이는 유영 마이크로로봇을 제작하고 실험하였다. 유영 마이크로로봇을 2차원 평면상에서 자유롭게 유영시키기 위해 2쌍의 헬름홀츠 코일을 사용하여 균일한 자기장을 생성하였고 조이스틱으로 유

영 마이크로 로봇을 움직이는 실험을 수행하였다. 실제 자유 유영 모습은 Fig. 11에 나타내었다. 유영 마이크로로봇의 성능을 최적화할 수 있는 조건을 찾기 위해 지느러미 길이 변화 실험, 지느러미 각도 변화 실험을 하였으며, 다양한 경우에 대한 실험을 통하여 지느러미의 길이가 9mm, 회전각도는 60 ~ 80°, 주파수는 0.9 ~ 1Hz의 조건에서 유영로봇은 응답성이 좋고 유연한 움직임과 빠른 속도(20 ~ 25mm/s)를 보였다.

## 후기

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업(과제번호:10030039)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Abbott, J. J., Nagy, Z., Beyeler, F. and Nelson, B. J., 2007, "Robotics in the Small-Part I : Microrobotics," IEEE Robotics and Automation Magazine, pp. 92~103.
- (2) Zhang, L., Abbott, J. J., Dong, L., Kratochvil, B. E., Bell, D. and Nelson, B. J., 2009, "Artificial Bacterial Flagella : Fabrication and Magnetic Control," Applied Physics Letter, pp. 94~96.
- (3) Bar-Cohen, Yoseph, 2005, "Biomimetics : Biologically Inspired Technologies," CRC.
- (4) Guo, S., Sawamoto, J. and Pan, Q., 2005, "A Novel Type of Microbot for Biomedical Application," IROS, pp. 1047~1052.
- (5) Park, S. and Park, J., 2008, "Frontier Research Program on Biomedical Microrobot for Intravascular Therapy," IEEE BIOROB 2008, pp. 360~365.
- (6) Choi, H., Choi, J., Jang, G., Park, J. and Park, S., "Two Dimensional Actuation Of Microrobot With Stationary Two-Pair Coils System," Smart Materials and Structures, accepted.
- (7) Hayt, W.H. and Buck, J. A., 2006, "Engineering Electromagnetic," McGraw-Hill, pp. 279~288.
- (8) Alamgir, A.K.M., Fang, J., Gu, C. and Han, Z., 2005, "Square Helmholtz Coil with Homogeneous Field for Magnetic Measurement of Longer HTS Tapes," Physica C424, pp. 17~24.