

Magnetic Micro/Nano Robot Systems and Development Trend

Sung Hoon Kim*

Department of Electronics Convergence Engineering, Wonkwang University, 460 Iksandae-ro, Jeonbuk 54538, Korea

(Received 8 August 2019, Received in final form 26 August 2019, Accepted 26 August 2019)

Magnetic micro/nano robots have the potential to revolutionize technological change in biotechnology and medicine. As a main feature, it is driven by an external magnetic field and controlled wirelessly to achieve miniaturization. Thus, minimally invasive diagnosis and treatment are possible. There is a growing interest in research to replace the traditional robot technology with the micro robot technology for the minimally invasive and targeted treatment. Therefore, this paper examines the control method, mechanism and research trend of micro robot.

Keywords : magnetic micro/nano robot, medical robot, minimally invasive treatment, external magnetic field

자기 마이크로/나노 로봇 시스템 및 연구동향

김성훈*

원광대학교 전자융합공학과, 전북 익산시 신동 익산대로 460, 54538

(2019년 8월 8일 받음, 2019년 8월 26일 최종수정본 받음, 2019년 8월 26일 게재확정)

자기마이크로/나노 로봇은 바이오 및 의학분야에서 혁신적인 기술변화를 일으킬 가능성이 있다. 주된 특징으로 외부의 자기장으로 구동되어 무선으로 제어되어 초소형화가 실현되었다. 따라서 최소침습기반의 진단 및 치료를 가능하게 한다. 최소침습 및 표적화 치료를 위하여 기존의 고전적인 로봇기술에서 마이크로 로봇 기술로 대체하기 위한 연구에 대한 관심이 커지고 있다. 따라서 본 논문에서는 마이크로 로봇의 제어방법, 메커니즘, 연구동향에 대하여 살펴본다.

주제어 : magnetic micro/nano robot, medical robot, minimally invasive treatment, external magnetic field

I. 서 론

무선제어 가능한 마이크로/나노 로봇은 산업분야, 생체 내 응용분야, 복잡한 환경에 이르기까지 다양한 용도로 제안되어 왔다. 산업용 적용분야에서는 정밀한 마이크로 어셈블리에 적용되고 있다[1]. 바이오 분야에서는 세포와의 상호작용을 위한 도구로 활용되고 있다. 마이크로 로봇은 세포를 이동시키고 분류를 위해 국소적인 영역(시험관 내) 제어가 가능하다[2,3]. 마이크로 가공 기술, 마이크로 전기기계 시스템의 발달함에 따라 마이크로 유체 제어 시스템에 대한 많은 연구가 보고되고 있다. 특히 마이크로 유체제어를 위하여 마이크로 펌프, 밸브, 채널 등은 바이오 분야에서 진단시스템에 중요한 역할을 한다. 미세 유체를 제어하기 위하여 마이크로 로봇 메

커니즘을 이용하여 유체의 펌핑, 운반하는 사례가 보고되고 있다[4,5]. 최근 의학 분야에서 마이크로 로봇을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 마이크로 로봇은 인체 내에서 표적 약물 전달, 열 치료, 혈전제거, 센싱 등 최소 침습기반의 다양한 진단 및 치료 시스템에 활용되고 있다[6-15]. 이러한 마이크로 로봇들은 대부분 외부 자기장에 의하여 움직임을 정밀하게 제어할 수 있다. 마이크로 로봇의 메커니즘에 따라 제어하는 외부자기장의 형태가 결정되며 균일한 자기장 또는 경사자기장이 사용된다[16,17]. 균일한 자기장의 경우 마이크로 로봇의 회전력을 발생하여 로봇을 제어한다. 균일한 자기장에서는 로봇의 자기력에 의한 평행이동은 발생하지 않는다. 따라서 균일한 회전자기장을 이용하는 경우 균일한 회전자기장, 교번자기장을 이용한다. 헬리컬 메커니즘 또는 나선선 메커니즘의 경우 회전자기장을 이용하여 로봇을 제어한다[18-20]. 또는 구름운동(rolling movement)을 하여 로봇이 제어된다[11,21]. 교번자기장 또는 회전자기장에서 꼬리

의 교번운동을 통하여 로봇이 이동할 수 있는 메커니즘을 적용하고 있다[22,23].

경사자기장은 자기력에 의하여 로봇이 평행이동을 하므로 특별한 로봇 메커니즘이 필요하지 않다[16,24,25]. 로봇의 제어 능력을 향상하기 위하여 균일한 자기장과 경사자기장을 모두 사용하여 자유도를 향상한 연구가 보고되고 있다[16]. 마이크로 로봇을 정밀제어 하기위한 자기장 발생장치는 코일 기반의 전자석과 영구자석이 이용되고 있다. 영구자석을 이용할 경우 마이크로 로봇과 구동 영구자석의 거리 조절을 통하여 자기력을 제어한다. 반면, 전자석인 경우 코일에 인가되는 전류의 종류와 코일의 형태에 따라서 발생하는 자기장이 바뀌게 된다. 또한 인가되는 전류의 주파수, 크기, 위상 차 등의 제어 요소에 따라 제어능력이 바뀌게 된다. 따라서 전자석을 사용하는 제어시스템이 영구자석을 사용하는 시스템보다 향상된 제어 능력을 가진다.

외부 자기장 제어 시스템은 국소적으로 자기장을 발생시켜 로봇을 제어할 수 있어 의료용 로봇에 매우 적합하다. 이에 본 고에서는 최소 침습을 이용한 진단 및 치료를 목적으로 하는 의료용 마이크로 로봇의 메커니즘과 제어시스템의 연구 동향에 대하여 살펴보고자 한다.

II. 자기마이크로 로봇의 구동원리 및 사례

자기마이크로 로봇은 구동기의 형태에 따라 영구자석 기반 제어시스템과 전자석 기반의 제어 시스템으로 분류된다. 또한

자기장의 형태에 따라서 자기력제어 방식 또는 자기 토크제어 방식으로 구분된다. 자기력제어의 경우 영구자석 혹은 전자석에서 발생하는 경사자기장에 의하여 마이크로 로봇이 직선운동(평행이동)하게 된다. 경사자기장을 이용하여 제어하는 경우 경사자기장의 선형성이 가장 중요하다. 경사자기장의 세기가 비선형적으로 증가 혹은 감소를 하게 되면 마이크로 로봇의 움직임을 정밀하게 제어할 수 없다. 균일한 자기장의 경우 마이크로 로봇의 직선운동은 발생하지 않고 자기 토크에 의하여 회전운동을 발생하여 로봇의 움직임 및 이동을 제어한다. 자성체는 균일한 자기장내에서 인가되는 자기장의 방향으로 정렬하려는 성질을 가지고 있다. 마이크로 로봇을 제어하기 위한 자기력과 자기 토크는 다음과 같이 표현된다.

$$F = \nabla(M \cdot B_{ext}) \tag{1}$$

$$T = M \times B_{ext} \tag{2}$$

M 은 자기모멘트를 나타내며 B_{ext} 은 구동자기장을 의미한다. 외부의 구동자기장은 코일의 형태, 전류의 종류에 따라서 표현방식은 다르게 표현된다. 일반적으로 경사 자기장을 발생하기 위해서는 맥스웰 코일을 사용하고, 균일한 자기장을 발생하기 위해서는 헬름홀츠 코일을 사용한다. 맥스웰 코일과 헬름홀츠 코일의 구성은 Fig. 1과 같다. 헬름홀츠 코일의 경우 코일의 반지름이 R인경우 두 코일사이의 간격이 반지름길이와 동일하다. 두 코일에 같은 방향으로 전류를 인가하게 되면 두 코일사이에는 Fig. 1(a)와 같이 균일한 자기장이 발생

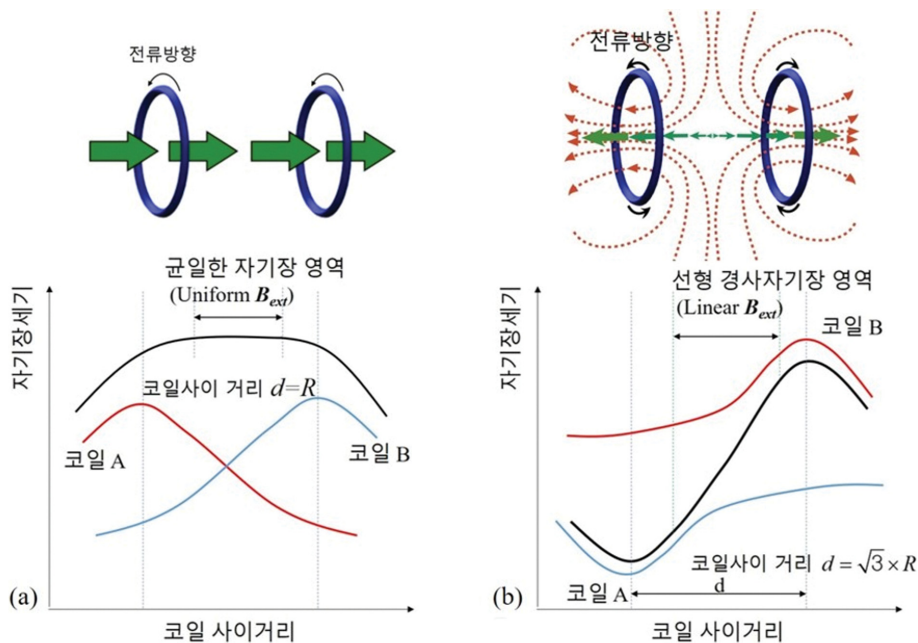


Fig. 1. (Color online) Properties of uniform and gradient magnetic fields: (a) configuration of Helmholtz coil and (b) configuration of Maxwell coil.

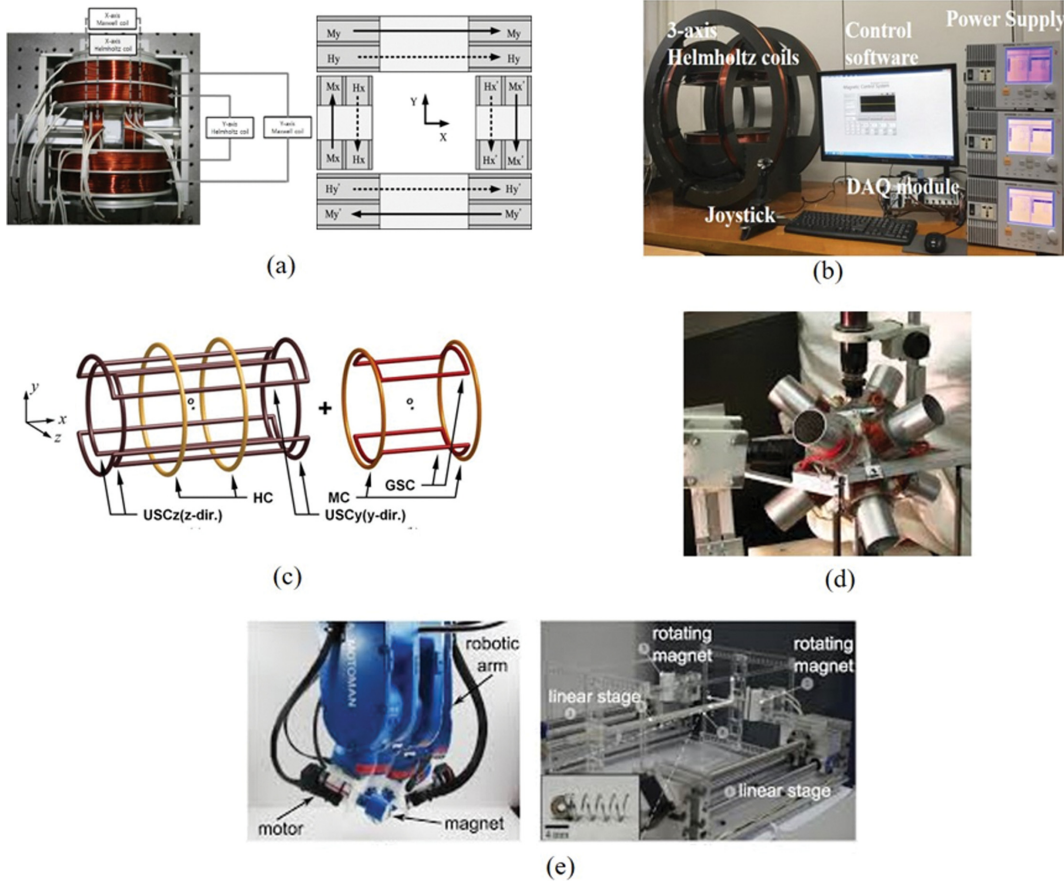


Fig. 2. (Color online) (a) Configuration of electromagnetic control system using Helmholtz and Maxwell coils for magnetic force control [17] (b) 3-axis Helmholtz coil system for magnetic torque control [11], (c) saddle coil with Helmholtz coil [26], (d) 6 DOFs coil system [27], and (e) magnetic force control based on permanent magnet [28].

하게 된다. 반면, 맥스웰 코일은 두 코일 사이의 거리는 코일 반지름의 $\sqrt{3}$ 배이다. 이 경우 전류의 방향은 서로 반대 방향으로 인가하게 된다. 두 코일 사이의 중심점에서는 자기장이 세기가 0 인 지점이 발생하고 코일에 근접할수록 자기장의 세기는 선형적으로 증가한다. 그 특성은 Fig. 1(b)에서 설명하고 있다.

자기력을 이용하여 마이크로 로봇을 제어하기 위하여 맥스웰 코일을 사용한다. 하지만 로봇의 이동과 동시에 조향을 하기 위하여 헬름홀츠 코일을 같이 사용하는 사례가 있다. 균일한 자기장을 이용하여 이동하고자 하는 방향으로 조향을 하는 경우 헬름홀츠 코일을 사용하며 방향전환 후 맥스웰 코일에서 경사자기장으로 로봇을 이동 시킨다. Fig. 2(a)는 2차원 또는 3차원 공간에서 마이크로 로봇을 제어하기 위한 헬름홀츠 코일과 맥스웰 코일을 적용한 코일 시스템이다. 이 경우 헬름홀츠 코일은 로봇의 회전각도를 제어하고 맥스웰 코일은 로봇을 이동 시킨다. 반면 Fig. 2(b)의 경우 3축의 헬름홀츠 코일만 사용하는 코일 구성으로 균일한 회전 자기장을 발생시켜 회전에 의하여 로봇이 이동할 수 있도록 한다. Fig.

2(c)의 경우 자기력과 자기 토크를 발생하기 위하여 saddle 코일과 헬름홀츠 코일을 조합한 경우이다. Fig. 2(d)는 솔레노이드 코일구조의 6자유도 형태의 코일 구조를 나타내고 있다. 이는 로봇의 제어능력을 향상하기 위하여 다축의 코일을 사용하는 것이다. 코일의 조합에 따라서 회전자기장 및 경사 자기장을 발생한다. 코일 기반의 자기장 제어 시스템은 코일의 구조와 인가되는 전류의 조건을 제어함으로써 다양한 형태의 자기장을 발생시킬 수 있다. Fig. 2(e)의 경우 영구자석을 이용하여 로봇을 제어하는 시스템의 사례이다. 로봇 팔에 강한 영구자석을 부착하여 로봇과 구동자석 사이의 거리를 조절하여 로봇을 제어한다.

III. 자기마이크로 로봇 메커니즘 및 응용 사례

자기마이크로 로봇은 고전적인 로봇의 메커니즘과 달리 매우 간단한 구조를 가진다. 실제 하나의 작은 자석 혹은 자성체가 제어하는 자기장 환경내에서는 로봇이 되는 것이다. 로봇은 스스로 보유한 능력에 의해 주어진 일을 자동으로 처리

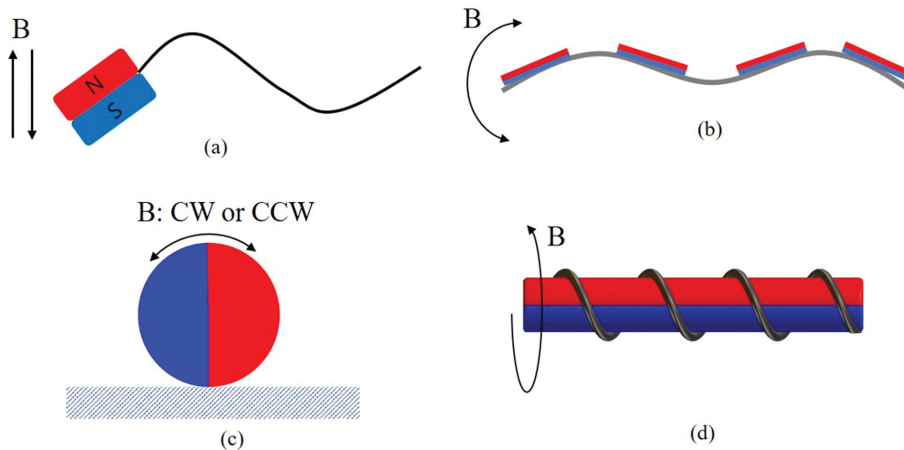


Fig. 3. (Color online) Mechanisms of magnetic microrobots: (a) Tail-based undulatory mechanism using an alternating magnetic field, (b) Oscillatory mechanism using multi-magnets on the flexible materials within a rotating field or an alternating field, (c) Rolling motion by a rotating magnetic field, and (d) Spiral-type magnetic microrobot within a rotating magnetic field.

하거나 작동하는 기계를 의미한다. 따라서 자성체와 제어 자기장을 이용하여 산업 및 의학분야에서 특수한 일들을 자동으로 수행하게 된다. 자기마이크로 로봇을 제어하기 위한 방법은 회전 또는 평행이동이다. 경사자기장을 이용하여 병진운동을 하는 경우 특별한 메커니즘이 요구되지 않는다. 하지만 교번자기장 또는 회전 자기장내에서 로봇이 이동을 하기 위해서는 추진력을 발생할 수 있는 메커니즘이 필요하다. Fig. 3은 회전자기장 또는 교번자기장 환경에서 로봇이 추진력을 발생할 수 있는 대표적인 메커니즘들이다. 현재 보고되고 있는 자기마이크로 로봇은 Fig. 3의 4가지 메커니즘을 기반으로 응용되고 있다. Fig. 3(a)의 경우 유체내 교번자기장을 이용하여 로봇의 이동능력을 발생할 수 있는 메커니즘이다. 자성체에 꼬리를 부착함으로써 교번자기장에 의해 자성체가 자기장의 방향으로 움직일 때 꼬리에서 항력이 발생하고 항력의 반대 방향으로 추진력을 발생한다. 머리부분이 자기장 방향으로 움직일 때 움직임의 크기는 머리부분(자성체)이 가장 크며 꼬리 끝부분으로 갈수록 진폭의 크기는 작아진다. 이러한 움직임은 파동움직임(undulatory motion)이라고 한다. 반면 Fig. 3(b)의 경우 유연한 재료에 다수 개의 자성체가 부착되어 회전자기장 또는 교번자기장에 의하여 물결모양의 움직임을 발생한다. 하지만 Fig. 3(a)와 달리 굽어지는 진폭이 동일하다. 이러한 모션은 진동움직임(Oscillatory motion)이라고 한다. Fig. 3(c)는 회전자기장 환경에서의 로봇의 구름운동(Rolling motion)을 나타낸다. 구름운동은 표면과의 마찰을 이용하여 회전자기장 방향으로 로봇을 이동한다. 일반적으로 자성 미세입자를 손쉽게 이동시키는 방법으로 활용되고 있다. 단일 자성 미립자 이외에도 자성사슬에서도 구름운동을 이용하여 이동능력을 손쉽게 제어할 수 있다. 회전자기장을 이용하여 로봇의 움직임을 제어하는 메커니즘으로 가장 많이 사용하는 것이 Fig.

3(d) 나선형 구조의 메커니즘이다. 자성체는 반경방향으로 자화 되어 있으며 오른나사 메커니즘의 것을 가진 경우 시계방향의 회전자기장에서 전진하게 된다. 유체내에서 회전할 때 나선선과 유체사이의 마찰에 의하여 유체의 항력이 발생하며 반대방향으로 추진력이 발생한다. 회전자기장이 반시계방향인 경우 로봇은 후진한다. 인가되는 회전자기장에 동기화 되어 회전하여 추진력을 발생한다. 특히 나선형 메커니즘은 유체환경 뿐만 아니라 회전 시 마찰을 발생하는 환경에서는 추진력을 발생할 수 있어 다양한 환경에서 활용되고 있다.

자기마이크로 혹은 나노 로봇은 인체 내에서 다양한 이동 메커니즘과 외부자기장 제어를 통하여 이동할 수 있다. 최근 최소 침습 기반의 수술용 로봇의 경우 인체 내부까지 진입이 가능하지만 혈관내 혹은 몸속 깊은 곳까지 쉽게 접근이 불가능하다. 따라서 자기마이크로 혹은 나노 로봇을 이용하여 혈관 또는 장기 깊숙한 곳까지 침투하여 진단 및 치료를 하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. Fig. 4는 자기마이크로나노 로봇의 적용 분야에 대하여 간략히 도식화하고 있다. 자기마이크로나노 로봇은 용도에 따라 각각 다른 응용이 가능하다. 최근 많이 연구되고 있는 응용분야는 능동형 가이드와이어 및 카테터, 혈전제거용 마이크로 로봇, 캡슐형 내시경로봇, 암치료용 나노 로봇 등 다양하다. 이러한 로봇이 하나의 기능만 하는 것이 아니라 다수의 기능을 가질 수 있다. 예를 들어 나선형 구조의 마이크로 로봇을 이용한 능동형 가이드와이어의 경우 혈관내 이동을 하면서 막혀 있는 혈전제거가 가능하고, 표면에 약물을 코팅하여 표적형 약물전달 기능도 가능하다. 자성나노 입자와 자기장 제어 시스템을 이용하여 표적형 암 치료 및 약물전달 등이 가능하다. 직접적 진단 및 치료용 로봇뿐만 아니라 세포를 조작하기 위한 로봇연구도 많이 진행되고 있으며 마이크로 어셈블리를 위한 마이크로 로봇 개

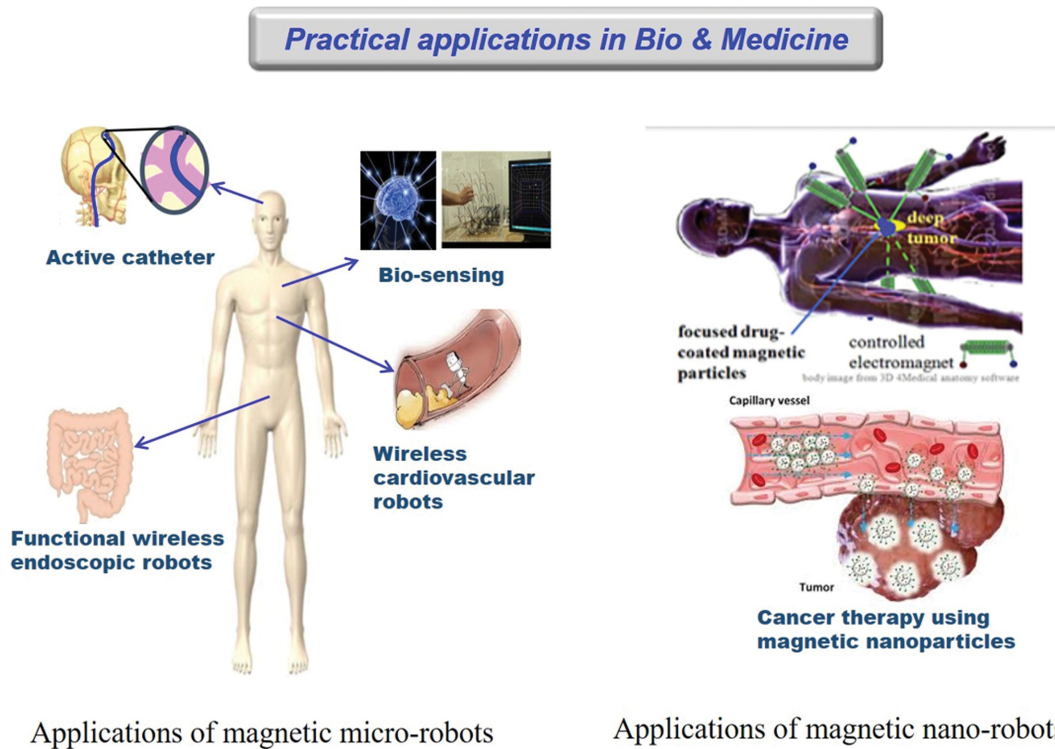


Fig. 4. (Color online) Potential applications of magnetic Micro/Nano robots in biomedical fields.

발도 진행되고 있다.

다양한 형태의 로봇 메커니즘이 연구되고 있으나 현재 바이오 및 의료분야에 적용하기 위한 로봇 메커니즘으로는 나선형 구조의 로봇 메커니즘이 가장 많이 적용되고 있다. 나선형 구조의 경우 회전에 의해 기계적으로 추진력을 발생하여 가장 뛰어난 이동능력을 가지고 있다. 그리고 자기장 제어 시스템에 의해 3차원 공간에서 정밀하게 제어되며 나선형 구조의 기계적 특성 때문에 드릴링, 펌핑 등 다양한 기능을 가질 수 있다. Fig. 5는 자기마이크로나노 로봇이 바이오, 의료, 산업 분야에 적용하기 위해 연구되고 있는 사례이다. 자기마이크로나노 로봇의 최고 장점은 무선구동, 배터리를 사용하지 않으며, 초소형화가 가능한 것이다. 이런 장점들은 특히 인체 내에서 사용하기에 최적합한 것이다. 인체 내의 환경은 매우 복잡하고 많은 위험요소가 존재하므로 일정한 구동력을 가지고 정밀하게 제어되는 것이 가장 중요하다. 현재 임상에서 사용하고 있는 의료기기들 중에서 대표적인 예시가 카테터 및 가이드와이어이다. 카테터 시술을 하기 위해서는 능숙한 훈련이 필요하다. 수동형 카테터는 손으로 제어되기 때문에 시술도중 의료사고의 위험이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 능동형 가이드와이어 및 카테터가 개발되고 있다. Fig. 5(a)는 자기마이크로 로봇을 이용한 능동형 카테터 혹은 가이드와이어로서 자기 토크에 의하여 조향을 하게 되며 나선형구조를 가진 경우 회전에 의한 추진력을 발생

시켜 능동적으로 이동을 하며 드릴링 기능에 의하여 혈전을 제거하는 메커니즘이다. 조향 기능 만 있는 경우 정적인 자기장을 이용하여 자기 토크에 의한 조향 각도를 발생하고 수동으로 가이드와이어를 움직일 수 있다. Fig. 5(b)는 진단 및 치료를 위한 캡슐형 내시경로봇과 약물전달용 로봇이다. 기존의 캡슐형 내시경은 추진력을 발생할 수 없으며 카메라 영상을 통하여 진단만이 가능하였다. 개발된 내시경로봇은 회전에 의한 추진력을 발생하며 환부에 약을 투여할 수 있는 로봇이다. 체내 효과적인 약물전달을 위하여 다공성 구조의 로봇에 약물을 담지 또는 세포를 배양하여 목표지점까지 이동하는 연구 결과이다. Fig. 5(c) 및 (d)의 로봇은 나선형 구조의 마이크로 로봇을 이용하여 막혀 있는 혈관의 혈전을 제거하고, 세포를 운반하며, 산성도에 따라 색을 표기하여 암의 유무를 센싱할 수 있으며 암이 있는 위치에 국소적으로 발열하여 암을 치료하는 로봇이다. 나선형구조의 메커니즘은 추진력을 발생하기 위하여 반대방향으로 항력이 발생한다. 유체 내에서는 항력에 의하여 축류형 마이크로 펌프로 활용할 수 있다. 이는 미세 유체 제어 시스템에 활용된다. 또한, 미세입자 분류, 유체 혼합 등 다양하게 유체 시스템에서 응용되고 있다. Fig. 5(f)는 마이크로 로봇을 이용하여 세포조작을 하는 구동시스템을 나타낸다. 2차원 평면에서 로봇의 정밀한 위치제어를 통하여 세포를 분류, 정렬 등 바이오 분야에 응용되는 사례이다. 로봇은 하나의 바늘과 4개의 자성체로 구성이 되어 있으



Fig. 5. (Color online) Application examples of magnetic micro/nano robot: (a) Active guidewire system [29,30], (b) Capsule-type endoscope with drug delivery robot [20,31], (c) drilling robot in blood vessel [6,10], (d) spiral-type microrobot for drug delivery and hyperthermia [15], (e) spiral-type microrobot for micro-fluid control system [4], (f) microrobot for cell manipulation [32], (g) manipulation of magnetic nanoparticles for magnetic hyperthermia [11], and (h) application of micro-assembly [1].

며 로봇 몸체 하단에 4개의 영구자석을 두어 자석을 움직여 로봇의 위치를 제어하는 방법이다.

Fig. 5(g)는 나노 로봇(자성나노 입자)를 회전자기장으로 이동시켜 목표지점에서 고주파 자기장을 인가하여 발열을 시켜 암 치료를 목적으로 개발되고 있는 능동형 열 치료 시스템의 사례이다. 일반적인 자성 나노입자를 이용한 온열 치료의 경우 정상세포가 열에 의해 손상을 받는 문제점이 있다. 외부 자기장에 의해 나노 입자가 정밀하게 암세포에 표적이 되면 정상세포의 파괴를 막을 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라

서 나노 입자의 정밀한 제어기술은 매우 중요하다. Fig. 5(h)는 산업분야에서 마이크로 구조물 제작을 위하여 마이크로 로봇을 이용한 마이크로어셈블리 공정에 대한 사례이다. 기존의 외부자기장 제어 시스템과는 달리 지면에 마이크로 코일이 어레이 형태로 제작되어 코일 어레이를 제어하여 로봇의 이동 및 조향을 제어한다.

이외에도 다양한 형태의 마이크로 로봇이 존재하며 다양한 분야에 사용되고 있다. 마이크로/나노 로봇은 국소적인 외부 자기장에 의해 제어되기 때문에 협소한 공간에서 효율적으로

사용이 가능하다. 로봇의 메커니즘도 중요하지만 마이크로/나노 로봇기술에서는 자기장 제어 시스템의 정밀성, 재료, 응용 분야의 융합기술이 매우 중요하다.

IV. 결 론

마이크로/나노 로봇에 대한 연구는 최근 10년 이내에 활발히 이루어 지고 있다. 마이크로/나노 로봇을 무선으로 제어하는 방법은 생물학적 방식, 화학적 방식, 자기구동 방식, 초음파를 이용하는 방식으로 크게 나뉘어 진다. 이중 자기구동 방법이 가장 효과적이다. 자기구동 방식은 상대적으로 큰 힘, 빠른 응답 속도를 보장한다. 최근 미세가공 기술의 발달에 의하여 수십 나노 크기까지 가공이 가능하여 초소형화가 실현되고 있다. 외부의 자기장을 이용하는 경우 국소적인 제어가 가능하여 자기마이크로/나노 로봇의 대부분의 연구는 바이오 및 의학분야에 집중되고 있다. 이러한 로봇기술을 의학분야에 적용할 경우 최소침습의 진단 및 치료가 가능하여 환자의 빠른 회복, 표적화된 치료, 편의성을 보장할 수 있다. 마이크로 로봇을 이용한 능동형 카테터 및 가이드와이어, 캡슐형 내시경 로봇, 미세 유체 제어 로봇 등은 임상연구가 일부 진행되고 있고 상용화된 기술도 있다. 더욱이, 자성 나노 입자를 이용한 표적형 암 치료(약물치료 및 열 치료)에 대한 연구가 국제적으로 활발히 이루어지고 있다. 전 세계적으로 마이크로/나노 로봇에 관한 연구가 활성화되고 있으며 특히 의학적, 생물학적 응용에 대한 융합연구가 이루어 지고 있다.

감사의 글

본 연구는 교육부 및 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2015R1D1A1A01057463, NRF-2018R1C1B6003491).

References

- [1] R. Pelrine, A. W. Foy, A. Hsu, B. McCoy, D. Holeman, R. Mahoney, G. Myers, J. Herson, and T. Low, in Proceeding IEEE Int. Conf. ICRA, 739 (2012).
- [2] M. Hagiwara, T. Kawahara, and F. Arai, IEEE Trans. Robotics. **29**, 363 (2013).
- [3] X. Wang, X. Qin, C. Hu, A. Terzopoulou, X. Chen, T. Y. Huang, K. Weber, S. Pane, and B. J. Nelson, Adv. Funct. Mater. **28**, 1804107 (2018).
- [4] S. H. Kim, J. W. Shin, and K. Ishiyama, IEEE Trans. Magn. **50**, 9100404 (2014).
- [5] S. Hisatomi, A. Yamazaki, K. Ishiyama, M. Sendoh, S. Yabu-kami, S. Agatsuma, K. Morooka, and K. I. Arai, J. Magn. **12**, 84 (2007).
- [6] S. H. Kim, K. S. Shin, S. Hashi, and K. Ishiyama, IEEE Trans. Magn. **49**, 3488 (2013).
- [7] K. Ishiyama, M. Sendoh, and K. I. Arai, JMMM **242-245**, 41 (2002).
- [8] S. H. Kim, S. Hashi, and K. Ishiyama, J. Appl. Phys. **109**, 07E318 (2011).
- [9] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott, Annu. Rev. Biomed. Eng. **12**, 55 (2010).
- [10] S. K. Lee, S. M. Lee, S. Kim, C. Yoon, H. Park, J. Kim, and H. Choi, Scientific Reports. **8**, 3691 (2018).
- [11] H. M. Ko and S. H. Kim, J. Magn. **23**, 117 (2018).
- [12] C. Yu and S. H. Kim, J. Magn. **22**, 162 (2017).
- [13] S. Yim and M. Sitti, IEEE Trans. Robotics. **28**, 183 (2012).
- [14] S. Jeong, H. Choi, K. Cha, J. Li, J. O. Park, and S. Park, Sens. Actuators A **171**, 429 (2011).
- [15] K. E. Peyer, S. Tottori, F. Qiu, L. Zhang, and B. J. Nelson, Chem. Eur. J. **19**, 28 (2013).
- [16] S. H. Kim, J. Magn. **23**, 578 (2018)
- [17] H. Choi, K. Cha, S. Jeong, J. O. Park, and S. Park, IEEE/ASME Trans. Mechatronics **18**, 1221 (2013).
- [18] L. Zhang, J. J. Abbott, L. Dong, B. E. Kratochvil, D. Bell, and B. J. Nelson, Appl. Phys. Lett. **94**, 064107 (2009).
- [19] K. E. Peyer, L. Zhang, and B. J. Nelson, Nanoscale **5**, 1259 (2013).
- [20] S. H. Kim and K. Ishiyama, IEEE/ASME Trans. Mechatronics **19**, 1651 (2014).
- [21] M. T. Hou, H. M. Shen, G. L. Jiang, and C. N. Lu, Appl. Phys. Lett. **96**, 024102 (2010).
- [22] S. H. Kim, K. Shin, S. Hashi, and K. Ishiyama, Bioinspiration & Biomimetics **7**, 036007 (2012).
- [23] H. W. Huang, Q. Chao, M. S. Sakar, and B. J. Nelson, IEEE RA-L. **2**, 727 (2017).
- [24] S. Kim, F. Qiu, S. Kim, A. Ghanbari, C. Moon, L. Zhang, and B. J. Nelson, Adv. Mater. **25**, 5863 (2013).
- [25] M. P. Kummer, J. J. Abbott, B. E. Kratochvil, R. Borer, A. Sengul, and B. J. Nelson, IEEE Trans. Robotics. **26**, 1006 (2010).
- [26] J. K. Nam, S. M. Jeon, W. S. Lee, and G. H. Jang, J. Appl. Phys. **117**, 17A726 (2015).
- [27] E. Diller, J. Giltinan, G. Z. Lum, Z. Ye, and M. Sitti, IJRR **35**, 114 (2015).
- [28] T. Xu, J. Yu, Z. Yan, H. Choi, J. L. Zhang, Micromachines **6**, 1346 (2015).
- [29] C. Yu and S. H. Kim, J. Magn. **21**, 616 (2016).
- [30] S. Jeon, A. K. Hoshier, S. Kim, S. Lee, E. Kim, S. Lee, K. Kim, J. Lee, J. Kim, and H. Choi, Micro and Nano Systems Letters **6**, 1 (2018).
- [31] D. Jang, J. Jeong, H. Song, and S. K. Chung, J. Micromech. Microeng. **29**, 053002 (2019).
- [32] L. Feng, X. Wu, Y. Jiang, D. Zhang, and F. Arai, Micromachines **9**, 1 (2018).