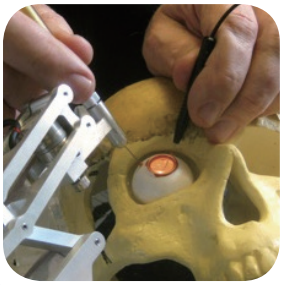
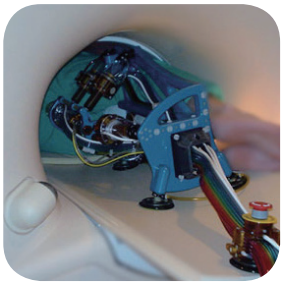
ISSN. 2465-8456

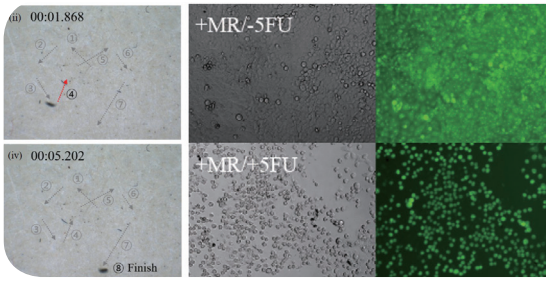
http://crpc.kist.re.kr

융합연구리뷰

Convergence Research Review







2018 December | Vol. 4 | No. 12

Part 1. 의료용 생체 마이크로로봇 기술발전 동향

Part 2. 미세수술 로봇 기술과 전망

융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

CONTENTS

01 편집자 주

03 의료용 생체 마이크로로봇 기술발전 동향

43 미세수술 로봇 기술과 전망

융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2018 December vol.4 no.12

발행일 2018년 12월 3일

발행인 김주선

편집인 최수영·권영만

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
Tel. 02-958-4980 | http://crpc.kist.re.kr

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4783

의료용 생체 마이크로로봇 기술발전 동향

대량 생산 공장에서 일렬로 줄지어 제조 효율성을 높이고, 반복적 작업을 대신하던 산업용 중대형 로봇부터 인간이 수행하기 어렵거나 불가능한 일을 수행하기 위한 의료용 초소형로봇까지 로봇의 종류와 쓰임새는 점차 늘어나는 중이다. 그중 인간의 질병을 완화 또는 퇴치하기 위한 하나의 방법으로 의료용 마이크로로봇에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 현재는 해당기술을 실제 의료현장에서 사용하기 위한 사업화가 전 세계적으로 시작되고 있다.

이에, 본 호 1부에서는 전 세계적으로 태동기의 기술 분야이자 아직까지 절대적 강자가 없는 의료용 마이크로로봇에 대한 개념 및 범위 정립과 함께 마이크로로봇의 기술동향, 제어 및 제조기술, 응용분야, 관련 기업 등을 살펴보고자 한다. 특히 의료용 마이크로로봇의 핵심 기술인 제어기술(자기장 기반 제어, 음향 기반 제어, 화학반응 기반 제어, 광 기반 제어) 동향과 제조기술(3차원 리소그래피 및 3D 프린팅, 나노 입자 / 박테리아 기반 마이크로로봇) 동향을 통해 조금은 생소한 의료용 생체 마이크로로봇에 대해 알아보고자 한다.

본 호를 통해 사업화가 본격 시작되고 있는 의료용 생체 마이크로로봇에 대한 이해도가 높아지길 바라며, 해당 로봇을 통해 전혀 새로운 진단 및 치료방법이 제시되어 인간의 삶의 질이 크게 향상되기를 기대해 본다.

미세수술 로봇 기술과 전망

의료기술의 발전과 신체 내·외부 에 대한 이해도가 높아짐에 따라 여러 질병에 대한 수술이 가능해졌고, 의료진의 전문성에 따라 더욱 복잡하고, 다단계의 수술이 가능하게 되었다. 하지만 수술의의 신체적 한계와 수술도구 소형화 어려움 등 현실적 장애물이 수술의 정밀도를 향상시키는데 장벽이 되어왔으나, 미세수술 로봇 기술의 발전으로 밀리미터 단위의 시·수술이 가능하게 되었다.

이에, 본 호 2부에서는 1980년도에 최초 등장한 수술로봇부터 현재 사용되고 있는 미세수술 로봇의 기술과 전망에 대해 살펴보고자 한다. 미세수술 기술은 일반 외과, 안과, 정형외과 수술, 산부인과, 이비인후과, 신경외과, 소아외과 수술 등과 같은 여러 분야의 전문 기술로 활용되고 있으며, 정교한 작업이 필요한 신경 및 혈관을 다루기 때문에 로봇 기술의 적용으로 발전 가능성이 매우 큰 분야이다.
해외에서는 이러한 발전가능성을 발판으로 대기업의 참여와 지속적 연구발전이 진행되고 있으나, 국내의 경우 아직까지 중소기업이 주축이 되어 기술발전이 이루어지고 있기에 발전 속도가 더딘 편이며, 기술개발 뿐 아니라 인증, 건강보험적용, 표준화 등의 포괄적인 영역에 이르기까지 많은 이해관계자간 협력체제 구축이 필요하다.

본 호를 통해 수술 로봇, 특히 미세수술 로봇의 국내외 기술과 시장 현황 등을 살펴봄으로써, 의료와 로봇분야간의 융합이 새로운 산업 및 의료 생태계를 구축하여 4차 산업혁명의 또 다른 주축이 될 수 있기를 기대해 본다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2018 December vol.4 no.12

01

의료용 생체 마이크로로봇 기술발전 동향

최홍수·김진영 (대구경북과학기술원)

Ⅰ 서론

마이크로로봇은 일반적인 로봇처럼 인간이 수행하기 어렵거나 불가능한 일을 수행하기 위하여 연구개발되고 있는 초소형 구조물이며, 일반적으로 크게는 수 밀리미터(mm: 10^{-3} m)부터 작게는 수 나노미터(nm: 10^{-9} m)의 크기를 가진다. 의료용 마이크로로봇은 의료로봇의 한 분야로서 현재까지는 주로 대학이나 연구소 단위에서 학술적 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 그 동안 축적된 관련 학술적 연구결과를 기반으로 의료용 마이크로로봇을 의료현장에서 사용하기 위한 사업화가 전 세계적으로 시작되고 있다. 마이크로로봇이 의료용으로 사용되는 경우 시술자의 손이 닿기 힘든 국소부위에서의 치료, 정밀 약물 및 세포전달 등의 이점이 있으며, 이를 통해 시술자의 수고를 덜고 환자의 고통 및 감염의 위험 등을 감소시켜 회복기간이 짧아지고 사회활동 복귀를 앞당기는 등 많은 실제적 장점들이 마이크로로봇 사업화의 원동력으로 꼽힌다. 하지만 여전히 의료용 마이크로로봇 분야는 전 세계적으로 태동기의 기술 분야이며 시장을 선점한 절대강자 없이 각 국이 치열한 경쟁을 하고 있다. 따라서 의료용 마이크로로봇 기술의 수요는 지속적으로 늘어날 것이고, 관련 기관들의 경쟁과 기술의 발전으로 마이크로로봇 시장은 향후 확대 발전될 것으로 전망된다.

많은 연구자들 사이에서 의료용 마이크로로봇의 개념 또는 범위를 어떻게 잡느냐로 이견이 있을 수 있지만 (이것이 로봇이냐?), 넓은 개념으로는 자동화된 약물 전달체, 자동 정밀 주사기기, 자동화 정밀 진단기기, 자동화 약물 스크리닝 등의 장치까지도 의료용 마이크로로봇의 범주에 포함된다고 할 수 있다. 이러한 넓은 개념에서 의료용 마이크로로봇은 인체 내부 또는 외부에서 다양한 목적을 가지고 질병을 정확하게 진단 및 치료하는데 사용될 수 있도록 연구되고 있다. 우리나라는 논문과 특허에 있어서 세계적으로 주도적 위치에 있는 국가 중 하나이다. 국내 마이크로로봇 연구자들은 최근 R&D 성과의 조기 사업화를 위해 노력하면서 관련 분야의 초기시장 형성을 촉진하고 있다. 세계 의료용 마이크로로봇 시장은 현재 형성단계이기 때문에 유사 분야인 의료로봇 시장을 참고하면, 세계 의료로봇 시장 규모는 2016년 37억 달러에서 연평균 17%의 성장률을 보이고 있고, 2022년에는 93억 달러 규모로 확대될 것으로 예상된다. 또한 TechNavio사는 세계 나노로봇 시스템 시장이 2016년에서 2020년까지 연 6.06% (CAGR: Compound Annual Growth Rate) 성장할 것으로 예측하였다[1)2)]. 따라서 의료용 마이크로로봇 분야는 의공학 및 의료로봇의 성장과 더불어 개선된 치료 및 진단 기법의 개발로 기존 시장을 대체하거나 기존에 없던 새로운 시장을 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

II 마이크로로봇 기술동향

의료용 마이크로로봇은 표적지향형 치료, 기계적 조직 제거도구 등으로 활용될 수 있다. 의료용 마이크로로봇에 의한 표적지향형 치료의 경우 정밀 약물전달, 정밀 방사능 물질 이송, 인체 내 국소 발열 및 정밀 세포전달 등을 통하여 환자 맞춤형 정밀 치료가 가능하다. 또한 혈관 내 이물질 제거, 조직채취 등의 기계적 제거 도구 등으로 활용될 수 도 있을 것이다. 이밖에 구조물을 이용한 의도적 폐색, 혈관 확장과 유지를 위한 스텐트, 조직 및 세포가 성장 할 수 있는 생체 지지체 및 미세 전극과 센서 등도 의료용 마이크로로봇이 응용될 수 있는 분야이다. 의료용 마이크로로봇은 이처럼 기존의 치료방법을 개선하거나 전혀 새로운 치료 기법을 개발하는데 이용될 수 있다.

이러한 다양한 응용을 위한 의료용 마이크로로봇 기술의 핵심은 아래 3가지로 분류될 수 있다.

- 치료 및 진단의 목적에 적합한 최적화된 마이크로로봇 제작
- 제작된 마이크로로봇의 정밀 제어를 위한 제어시스템
- 제작된 마이크로로봇과 제어시스템을 이용한 치료 및 진단 등의 응용 기술

먼저 전체적인 마이크로로봇과 나노로봇의 각 핵심 요소기술, 기술개발 또는 연구동향을 파악하기 위해서 텍스트 마이닝(text mining)을 진행하여 아래 그림과 같은 결과를 도출하게 되었다. 그 결과 마이크로로봇과 나노로봇의 중심어는 fabrication(제작), control(제어), propulsion(추진), system(시스템), delivery(전달), manipulation(조작), nano-particle(나노 파티클), therapy(치료) 등으로 제시된다. 본 장에서는 마이크로로봇 관련 기술들의 전반적인 개발 동향을 알아보기 아래 그림에서 제시된 중심어를 기초로 논문발행동향과 특허출원동향을 살펴볼 것이다. 마이크로로봇 제작, 제어시스템, 치료 및 진단 응용에 대해서는 앞으로 각 장에서 좀 더 심도 있게 논의될 예정이다.

그림 1 마이크로로봇과 나노로봇 관련 논문의 텍스트 마이닝 결과

마이크로로봇은 서론에서 살펴본바와 같이 전 세계적으로 본격적인 연구가 시작된 지 10~20여년이 지났지만, 최근에야 마이크로로봇 관련 기술을 몇몇 기업들이 사업화를 시작하였기에 기술의 태동기라고 볼 수 있다. 이미 많은 발전이 있는 의료 관련 수술로봇, 의료영상, 신경보철, 인공관절 등의 기술의 경우 세계 주요 기업들이 관련 시장을 지배하고 있고, 후발주자들이 새로운 기술을 개발하여 기존 시장에 진입하기 위하여 경쟁하는 상황이다. 그러나 마이크로로봇 기술의 경우 수술로봇, 의료영상, 의료기기, 신경보철, 인공관절 등의 기술과 비교할 때 상대적으로 우리나라가 경쟁력을 가지고 있는 분야이다. 전 세계적으로 마이크로로봇 관련 기술은 태동기이기 때문에 관련 연구 인력이 아직 많지 않고, 선두그룹과 후발주자의 기술격차도 크기 않다. 우리나라는 이미 2000년대부터 마이크로로봇 관련 기술개발이 시작되었고, 몇몇 마이크로로봇 관련 기술 분야에서는 세계적 수준의 기술을 보유하고 있으며, 관련 학계에서 세계 기술을 선도하고 있다. 이는 아래 마이크로로봇관련 논문 및 특허 발행 동향을 통하여 확인이 가능하다.

그림 2 발행인 국적별 논문 발행량 변화

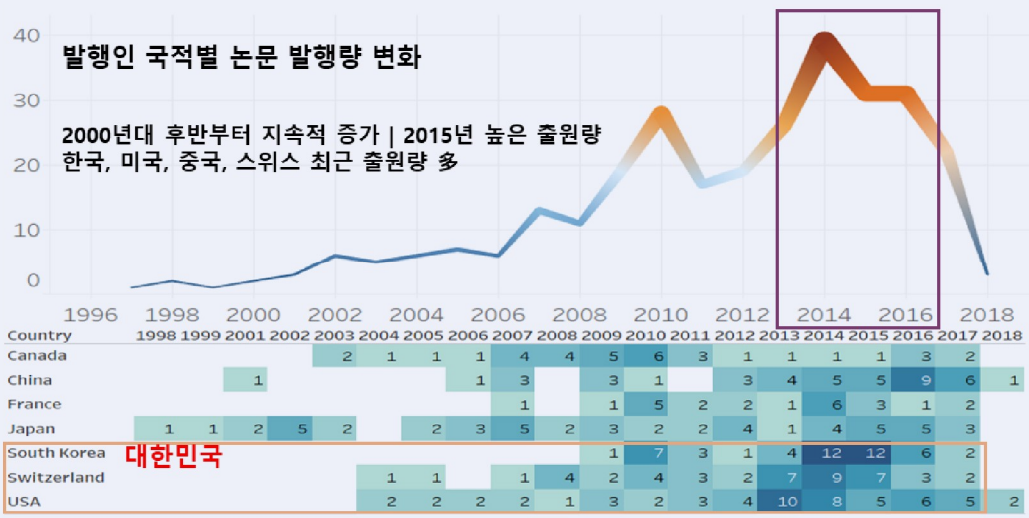


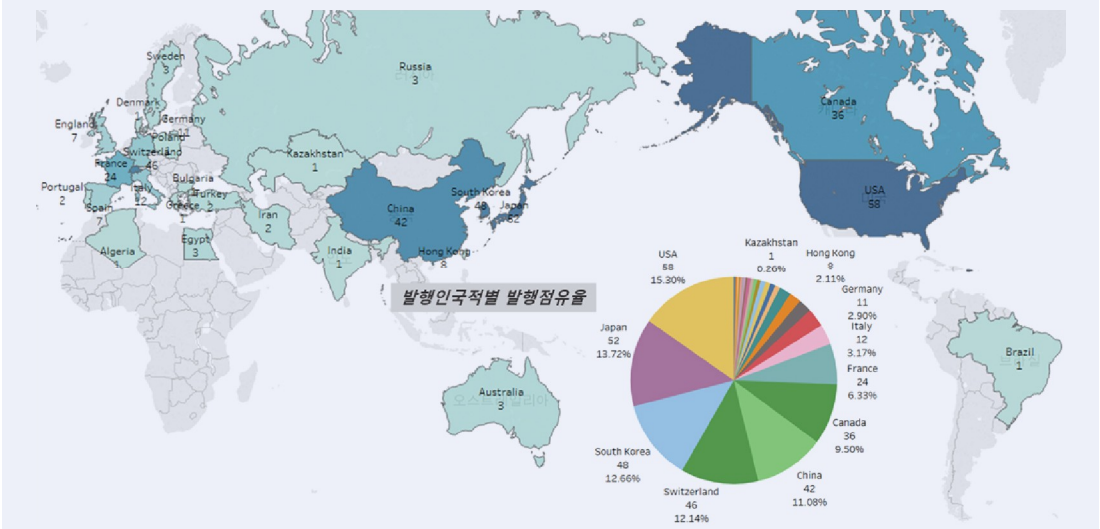
그림 2에서 볼 수 있는 것과 같이 전 세계적으로 2000년대 초반까지 매년 발표되는 마이크로로봇 관련 논문들은 많지 않았다. 마이크로로봇 관련 논문의 발행량은 2006년부터 급속하게 증가하여 2014년에 정점을 보이고 있다. 마이크로로봇 관련 논문 중에서 중심어에 따라서 본 기술동향 조사의 검색어에 포함되지 않은 논문이 다수 있을 수 있고, 본 기술동향 조사에서 사용한 데이터베이스에 포함되지 않은 자료들을 고려한다면, 마이크로로봇 관련 논문의 수는 더욱 증가할 것이다. 2016년부터 2018년 현재까지 검색된 자료들이 감소하는 것으로 보이는 것은 기술동향 조사의 한계로서, 이미 발표된 관련 논문이라도 본 조사에서 사용한 데이터베이스에 업데이트가 안 된 경우에는 기술동향 조사 결과에 포함될 수가 없다. 이는 논문이 발표되더라도 기술동향 조사를 위해서 사용한 데이터베이스가 업데이트되는데 시간이 걸리기 때문이다. 따라서 이번 기술동향 조사에서 모든 논문을 포함하고 있지는 않지만, 우리의 논의는 기술동향 조사 결과인 그림 2로 한정한다. 또한 본 기술동향 조사는 2018년 초에 진행되었음을 참고할 필요가 있다.

2006년부터 마이크로로봇 관련 논문들이 급속하게 증가하는 추세에서, 2014년과 2015년은 우리나라에서 마이크로로봇 관련 논문이 가장 많이 발표된 것을 보여주고 있다. 이는 우리나라의 마이크로로봇 관련 연구수준이 세계적으로 경쟁력이 있음을 보여주고 있고, 특히 다른 나라와 비교하여 마이크로로봇 연구 인

력이 질적, 양적으로 경쟁력이 있는 것을 확인할 수 있다. 다만 최근 중국과 일본의 경우에도 논문의 양이 증가하고 있고, 이는 각 나라에서도 관련 연구 인력이 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 중국의 경우 Chinese Academy of Science (CAS: 中国科学院, 연구 및 교육기관)와 State Key Laboratory (SKL: 国家重点实验室) 프로그램을 통하여 다양한 분야의 연구자를 적극 지원하고 있는데, 이러한 추세에 따라 마이크로로봇 분야에서도 중국 정부의 적극적인 지원을 기반으로 연구 인력이 확대되고 있으며, 연구결과도 질적, 양적으로 점차 우수해지고 있다. 이러한 결과로 여타 다른 연구 분야와 마찬가지로 국제적으로 마이크로로봇 분야에서도 점차 중국의 영향력이 커지고 있다.

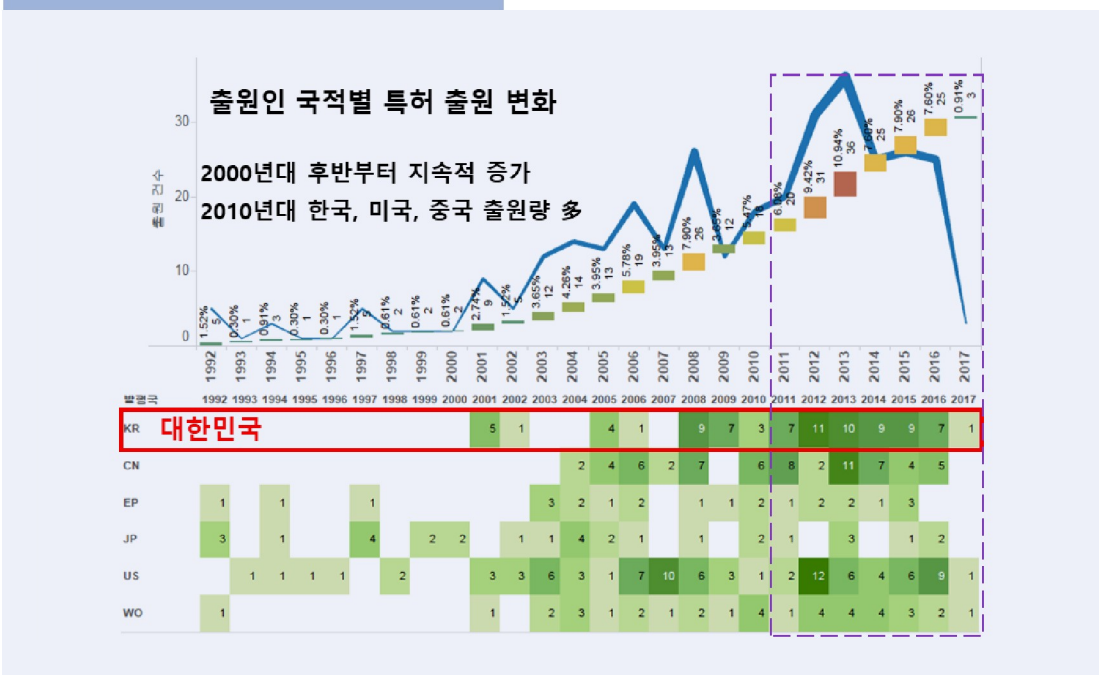
마이크로로봇 관련 각 국가별 논문발행 동향을 좀 더 상세하게 본다면 아래 그림과 같은 발행점유율이 나타난다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 미국과 일본의 논문 발행점유율이 높지만 미국, 일본, 한국, 스위스, 중국, 캐나다 등 주요 논문 발행 국들의 발행점유율은 유사하다. 이는 우리나라의 관련 연구수준이 세계적으로 경쟁력이 있음을 보여주는 동시에, 세계적으로 마이크로로봇 분야가 기술발전 초기단계로서 치열한 경쟁이 이루어지고 있음을 보여준다. 다만 독일의 논문발행 동향이 기대치보다 작은 것은 독일 저자들의 논문 발표 시 키워드 선정으로 인하여 독일의 일부 논문이 기술동향 조사에서 검색이 안 된 것으로 보인다. 아래 그림에 정확하게 파악되지는 않았지만 독일의 경우 막스 플랑크 협회(Max Planck Institutes), University of Oldenburg 등을 중심으로 다양한 마이크로/나노 로봇 연구가 진행되고 있다.

그림 3 마이크로로봇 관련 논문 발행인 국적별 발행동향



다음으로 각 출원인별 특허출원 동향을 그림 4에서 살펴보고자 한다. 특허출원 동향은 전반적으로 논문발행인 동향과 유사한 경향을 보이고 있지만 특허 출원의 증가는 2002년부터 시작된 것으로 판단된다. 이는 일반적으로 연구자들의 기술개발 과정이 1) 초기연구, 2) 특허 출원, 3) 논문발표, 4) 사업화의 순서로 진행되는 것을 고려할 때 논문 발행량이 증가한 2006년도 이전인 2002년부터 관련 분야 연구자들이 마이크로로봇 관련 특허출원을 왕성하게 진행한 것으로 이해된다. 다만 2009년도에는 특허 출원이 급격하게 감소했다가, 이후 다시 특허 출원이 증가하고 2013년도에는 가장 많은 특허가 출원된 것으로 보인다. 2014년부터는 다시 특허 출원 건수가 감소하지만 이는 본 기술동향 조사가 2018년도 초에 진행된 것을 고려한다면, 2014년경부터 출원된 특허 중에서 특허 출원 후 미공개 특허가 다수 있기 때문으로 이해된다. 논문 발행 동향과 마찬가지로 특허 출원에 있어서도 우리나라는 마이크로로봇 분야에서 세계적으로 경쟁력이 있음을 보여주며, 일부 분야에서는 특허 선점 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 특허 선점은 추후 마이크로로봇의 사업화에서 국내 연구팀들의 경쟁력이 기대되는 부분이다.

그림 4 출원인 국적별 특허 출원 동향



본 장에서 살펴본바와 같이 의료용 마이크로로봇(나노로봇 포함)의 기술개발은 2000년대 초반부터 관련 특허 출원이 시작되어 2000년대 중후반부터 논문 발행이 늘어나기 시작했다. 이러한 논문 발행 및 특허 출원 동향은 2000년대 초반부터 마이크로로봇 관련 연구자가 늘어나고 있음을 보여주고 있다. 마이크로로봇 연구의 특성으로는 국내 연구진이 논문 및 특허에서 국제적 경쟁력을 보여주고 있고, 일부 마이크로로봇 기술 분야에서는 세계 선도적 위치에 있다. 이는 다른 국가의 논문 발행 및 특허 출원 성과와 비교하여 국내 연구진의 논문과 특허가 기술적으로 세계적인 선두 그룹과 경쟁할만한 위치에 있다는 것을 보여준다. 다만 최근 중국 연구자들이 중국 정부의 적극적인 지원으로 마이크로로봇 분야에서 빠르게 성장하고 있음을 기억할 필요가 있다. 우리나라도 국내 연구진의 우수한 논문 및 특허 실적을 기반으로 중장기 로드맵을 가지고 효과적으로 마이크로로봇 관련 연구 및 사업화를 진행해나간다면 세계적으로 관련 연구 분야를 선도하는 연구 결과물과 사업화 실적을 기대할 수 있을 것이다.

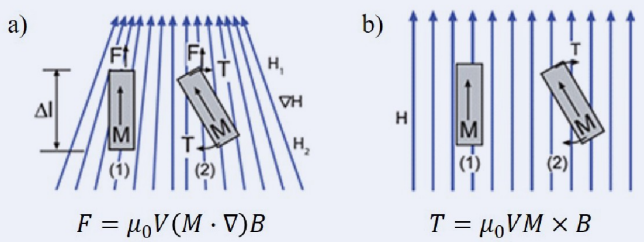
III 마이크로로봇 제어기술

마이크로로봇을 원하는 목적지까지 정확히 이동시키기 위해서는 효율적인 추진을 위한 구동 기술과 정확한 위치 및 방향 제어기술이 핵심이다. 이러한 제어 기술의 경우 고려되어야 할 점은 신체 내외의 마이크로로봇이 사용되는 환경이 일반적으로 유체 환경이라는 점이다. 이러한 환경에서 효과적으로 마이크로로봇을 구동하기 위해서는 유체의 점성 등으로 인한 저항을 극복할 수 있는 구동방법으로 충분한 추진력을 확보할 필요가 있다. 그러나 마이크로로봇의 작은 크기로 인하여 일반적인 에너지원 혹은 배터리를 이용하기에는 어려움이 있다. 따라서 유체환경에서 마이크로로봇을 효과적으로 움직일 수 있도록 원격 구동 및 제어 기술에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 장에서는 마이크로로봇의 제어 및 구동을 위해 활용되고 있는 자기장 기반 제어, 음향 기반 제어, 화학반응 기반 제어, 광 기반 제어에 대하여 간략하게 논의를 진행할 것이다.

1. 자기장 기반 제어

자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging: MRI) 시스템은 자기장을 이용하여 해부학적 정보를 얻는 방법이다. 일반적으로 MRI는 초음파를 제외한 다른 의료 영상시스템에 비하여 안전한 것으로 알려져 있다. 이는 일정 자기장 강도 이내에서는 자기장 에너지가 신체 내 안전성이 높기 때문이다. 자기장은 인체 내에서 감쇄가 작기 때문에 신체 외부에서 원격으로 정밀 제어가 가능하므로 다양한 형태의 자기장 기반 마이크로로봇 제어시스템이 활발히 연구되고 있다. 자기장은 인체 조직과 상관없이 거리의 제곱에 반비례하여 감쇄한다. 자기장 기반 마이크로로봇 제어시스템은 기본적으로 자기적 힘(magnetic force, F)과 자기적 토크(magnetic torque, T)를 발생시키며, 마이크로로봇의 위치와 방향을 제어 할 수 있고, 제어 원리는 아래 그림과 같이 설명 될 수 있다. 아래 그림에서 μ_0는 자유 공간에서의 투자율, V는 강자성체나 영구자석의 체적, M(A/m)은 자화강도, ∇는 기울기 기호 (gradient symbol)를 의미한다.[3] 여기에서는 대표적인 네 종류의 자기장 시스템에 대해서 논의를 진행할 것이나, 여기에서 소개된 자기장 시스템 외에도 연구팀에 따라 다양한 자기장 시스템을 개발하고 있다.

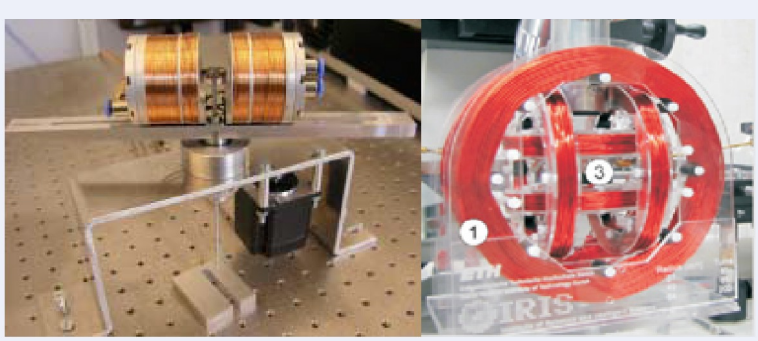
그림 5 자기장 제어 기본 원리 (a) 자기적 힘(F), (b) 자기적 토크(T) 제어[3]



1) 취리히 연방공대(ETH Zurich), 스위스

스위스 ETH의 Bradley J. Nelson 교수팀은 헬름홀츠 코일과 맥스웰 코일의 조합으로 제작 된 코일[4][5]을 개발했으며, 모터를 사용하여 회전이 가능한 유형과 X-Y-Z방향으로 자기적 제어가 가능한 2D/3D형 코일 시스템을 개발했다. 헬름홀츠 코일은 유효 작업 공간(effective working space) 내부에 균일한 자기장(constant magnetic field, B)을 발생시켜 마이크로로봇을 회전 및 정렬 시킬 수 있으며, 맥스웰 코일은 자기장 기울기(magnetic field gradient, ∇B)를 발생시켜 임의의 방향으로 조향 및 이동될 수 있도록 마이크로로봇에 힘을 발생시킬 수 있다.

그림 6 스텝 모터형 헬름홀츠 코일 시스템(좌)[4]과 3차원 헬름홀츠 코일 시스템(우)[5]



MiniMag[6]과 OctoMag[7] 코일 시스템은 사용 용도에 따라 8개의 솔레노이드 코일로 서로 다른 거리, 각도로 제작 및 배치 됐다. MiniMag의 경우 작업 공간(working space, 약 1.2㎤) 내부에 약 20mT 정도의 자기장을 발생시킬 수 있다. 연구 목적에 따라 자기장 제어 알고리즘 개발부터 마이크로/나노 크기 수준의 세포 및 약물 전달 연구에 주로 활용된다. OctoMag은 약 5㎤ 정도의 작업 공간을 가지며, 주파수에 따라 최대 120mT 정도의 자기장을 발생시킬 수 있다. 이러한 시스템은 기준 축에 따라 3개의 위치, 2개의 방향으로 제어 할 수 있다.

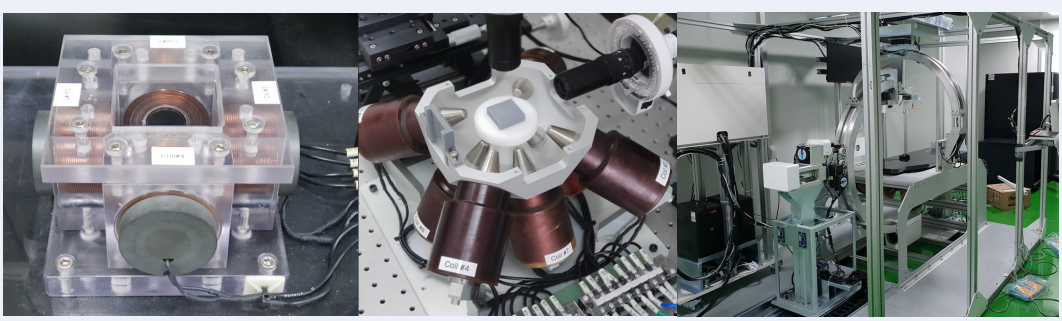
그림 7 MiniMag 시스템의 내(좌), 외부(중)[6] 실물과 OctoMag 시스템 set-up 환경(우)[7]

2) 대구경북과학기술원(DGIST), 대한민국

국내에서도 사용 용도에 따라 다양한 자기장 제어시스템이 개발되고 있다. DGIST 최홍수 교수팀은 연구용 소형 자기장 제어시스템, 소동물의 크기에 알맞은 중형 자기장 제어시스템 (Maroda), 중동물 실험에 적용이 가능한 대형 자기장 제어시스템을 개발하여 마이크로로봇 제어의 완성도를 높이고 있다. 대형 자기장 제어시스템(최대 50mT 자기장 발생)의 경우 두개의 X-ray 영상 시스템 (Bi-planar X-ray 시스템)과 코일 시스템이 수술용 침대를 중심으로 통합되어, 실시간으로 X-ray 영상을 획득하여 마이크로로봇의 실시간 제어 및 영상기반 시술을 시도하고 있다. 이 대형 자기장 제어시스템은 기존의 자기장 시스템과는 다르게 두 개의 X-ray 영상 시스템이 통합되어 시술 중에 실시간으로 환자의 영상뿐만 아니라 마이크로로봇의 위치를 확인할 수 있어, 시술자가 능동적으로 영상기반 수술 내비게이션이 가능하다는 특징이 있다. 본 시스템이

실제 응용된다면 시술 전 환자의 3차원 심장 영상을 Computed Tomography(CT)로 획득하고, 실제 시술에서는 실시간으로 두 개의 X-ray 시스템을 사용하여 CT영상과 2개의 X-ray영상의 3차원 영상 정합을 할 수 있다. 이를 통하여 3차원 공간에서 실시간 마이크로로봇의 위치를 확인할 수 있고 정밀 시술계획을 세울 수 있을 것으로 기대된다.

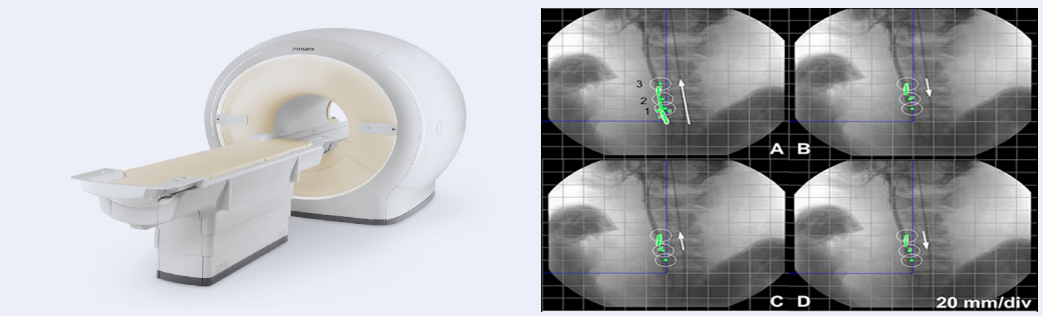
그림 8 소형(좌), 중형(중, Maroda), 대형(우) 자기장 제어시스템



3) École Polytechnique de Montréal (EPM), 캐나다

캐나다 EPM의 Sylvain Martel 교수팀은 자기공명영상장치(Magnetic Resonance Imaging: MRI) 시스템[8]이 탑재 된 자기장 제어시스템을 제안했다. MRI를 이용하기에 인체 내부에서 로봇의 움직임과 이미징은 효과적이지만, 시스템 내부에 한 쌍의 헬름홀츠 코일만 존재하여 방향 제어가 어렵고, 여러 축에 따른 맥스웰 코일이 존재하지 않기 때문에, 이동 제어가 제한적이다.[9] 본 팀은 박테리아 기반 마이크로로봇 제어에 이 자기장 제어시스템을 활용하며, 현재 임상시험을 준비하기 위하여 대형 시스템을 제작하고 연구를 진행하는 것으로 파악되고 있다.

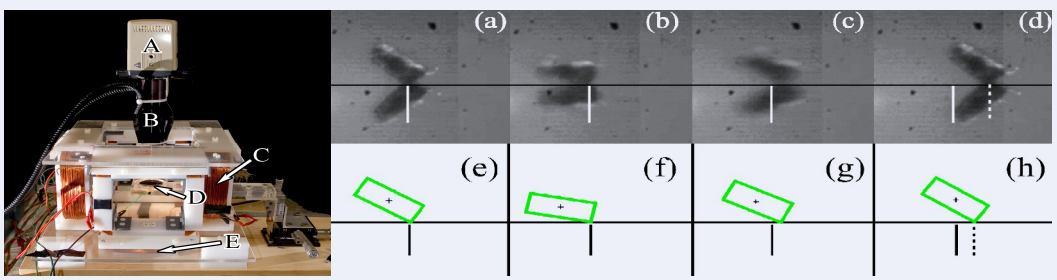
그림 9 Conventional MRI system(좌)[8]과 돼지 경동맥 혈관에서 마이크로비드 조향 실험 결과[9]



4) Max Planck Institute for Intelligent Systems, 독일, Carnegie Mellon University(CMU), 미국

Max Planck Institute for Intelligent Systems의 Metin Sitti 교수팀에서는 5개의 코일로 구성된 자기장 제어 시스템을 개발하였고, 이 시스템은 약 5~10㎤ 정도의 작업 공간(working space)을 포함하는 것으로 보인다. 본 자기장 제어시스템에서 4개의 코일은 자기장(magnetic field)과 자기장 기울기(magnetic field gradient)를 조절하는 역할을 하며, 나머지 한 개의 코일은 마이크로로봇의 clamping 기능을 위한 것으로 사용된다. 중심 센터에서 가할 수 있는 가장 큰 자기장은 약 6.5mT이며, 자기장 기울기는 약 149mT/m이다. 참고문헌에 따르면 clamping-type 마이크로로봇 연구에 사용되었다.[10] Sitti교수는 CMU에서 최근 Max Planck Institute for Intelligent Systems 이동하여 대형 연구팀을 구성하여 마이크로로봇 관련 연구를 폭넓게 수행하고 있다.

그림 10 자기장 제어시스템(좌)과 Stick-slip motion으로 마이크로로봇 거동 실험 결과(우)[10]

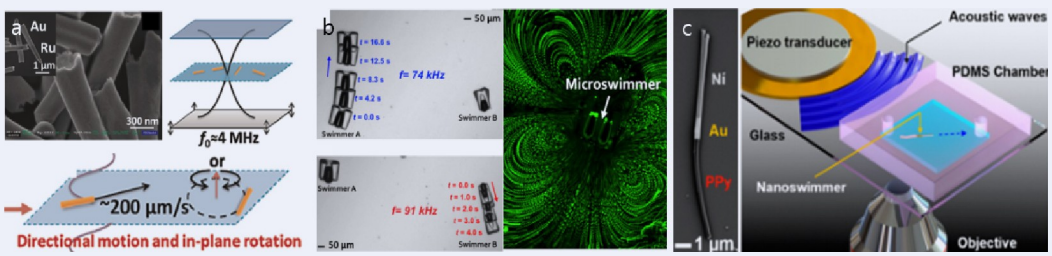


2. 음향 기반 제어

음향 기반 마이크로로봇 제어는 주로 음파의 물리적 에너지를 이용하여 마이크로로봇의 추진력을 생성하며, 음파만으로는 마이크로로봇의 방향 제어가 어려워 자기장과 같은 추가적인 물리적 힘을 더하여 방향을 정확하게 제어를 할 수 있다. 음파를 이용하여 마이크로로봇의 추진력을 얻는 방법에는 크게 세 가지가 있다.

첫 번째로는 그림 11(a)[11]와 같이 정상파(standing wave)로부터 발생되는 부분적인 압력차를 이용하는 것이다. 이 방법의 장점은 마이크로로봇의 모양과 재질에 상관없이 그 크기가 일정한 범위 안에 있으면 추진력을 얻을 수 있고, 인체를 통과할 수 있는 초음파를 이용해서 방향제어도 가능하다는 점이다. 두 번째 방법은 그림 11(b)[12]와 같이 마이크로로봇의 빈 공간에 트랩 되어있는 공기방울(micro-bubble)을 초음파를 사용하여 공명진동 시켜 발생되는 유체의 마이크로스트리밍을 사용하여 추진력을 얻는 방법이다. 마이크로로봇의 빈 공간 사이즈를 변화시켜서 공기방울의 크기를 조절 할 수 있고, 이에 따라 공명 진동수 또한 조절할 수 있다.[13] 초음파는 유체로 이루어진 인체와 같은 물질을 잘 통과하기 때문에 마이크로로봇 제어에 있어서 자기장 이외의 제어기법으로 고려될 수 있다. 다만 마이크로로봇의 크기에 비하여 공기방울의 크기가 큰 경우 마이크로로봇을 액체내로 가라앉히기(immerge)가 쉽지 않을 수 있다. 세 번째 방법은 그림 11(c)와 같이 마이크로로봇 구조 자체의 공명을 이용하는 방법이다.[14] 초음파를 이용하여 마이크로로봇 구조물의 일부를 진동시키고, 그 진동으로 인하여 추진력을 얻는 방법이다. 그 예로 금속으로 된 머리 부분과 폴리머로 된 꼬리 부분을 가지는 마이크로로봇에서, 폴리머로 이루어진 꼬리부분만 진동하도록 초음파를 사용하여서 추진력을 얻는 마이크로로봇이 개발되었다.

그림 11 (a) 정상파를 사용한 제어[11] (b)공기방울의 공명진동을 사용한 제어[12] (c) 마이크로로봇의 공명을 사용한 제어[14]



음향 기반 제어 마이크로로봇은 사용하는 초음파의 세기와 종류에 따라서 큰 추진력을 받을 수 있어 빠른 속도를 낼 수 있다는 장점이 있다. 또한 정상파를 사용하는 경우 마이크로로봇의 모양과 재질에 상관없이 추진력을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 초음파는 뼈와 같이 밀도가 높은 부위를 투과 할 수 없기 때문에 생체 내에서의 사용이 부분적으로 제한이 될 수 있다는 단점이 있고, 너무 강한 음향강도의 초음파는 인체에 사용하기에 위험성이 있기 때문에 사용하는 로봇의 종류와 응용에 따라서 적합한 초음파의 종류 사용하는 것이 중요하다.

3. 화학반응 기반 제어

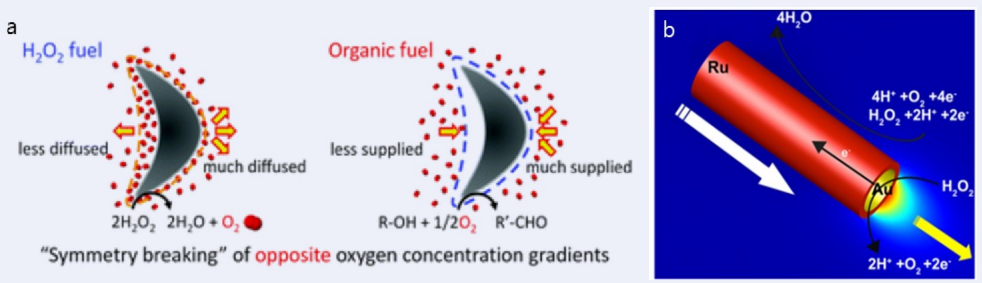
화학적으로 제어하는 마이크로로봇은 화학 반응을 통해 추진력을 얻는 마이크로로봇을 의미한다. 방향제어 같은 경우 현재까지는 화학적인 방법만으로는 불가능하기 때문에 마이크로로봇에 자성물질을 추가, 자기장을 이용하여 방향을 제어하는 경우가 있다. 화학적으로 제어하는 마이크로로봇은 주위환경에 존재하는 화학물질들과 반응하여 화학적인 농도기울기를 발생시키고 그것으로 추진력을 얻는다. 즉 주위에 존재하는 화학물질이 연료와 같은 역할을 하게 되는 것이다.

화학연료를 통해 추진력을 얻기 위해서는 두 가지 조건이 만족되어야 하는데 첫 번째로는 마이크로로봇의 표면이 주위에 존재하는 화학물질과 반응하여 반응물이 생성되어야 한다. 백금(Pt)과 과산화수소가 반응하여 산소를 발생시키는 반응은 마이크로로봇의 화학적 제어에 많이 이용되는 화학 반응이다. 두 번째 화학기반 제어는 마이크로로봇 구조를 비대칭적으로 만들거나 화학반응이 비대칭적으로 일어나도록 하는 것이다.

화학반응이 대칭적으로 일어나게 되면 반응부산물의 농도기울기가 발생하지 않기 때문에 마이크로로봇이 추진력을 얻지 못하기 때문이다. 따라서 비대칭적 화학 반응은 마이크로로봇 구조물의 힘을 불균일하게 만들어 한 방향으로 추진력을 발생하게 한다.

화학적인 농도기울기를 사용하여 추진력을 얻는 방법에는 그림 12와 같이 크게 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 화학반응으로 생긴 부산물자체를 사용하는 방법이다.[15] 예를 들어 백금과 과산화수소가 반응한 후 발생되는 산소기체 자체의 농도기울기로 추진력을 얻는 마이크로로봇이 존재한다. 또 다른 방법으로는 화학반응으로 생긴 부산물로 인해서 발생되는 전기장으로부터 유도되는 electrophoresis로 추진력을 얻는 방법이 있다.[16]

그림 12 (a) 화학반응 부산물 농도차로 구동되는 마이크로로봇[15] (b) Electrophoresis로 구동되는 마이크로로봇[16]



화학적으로 제어되는 마이크로로봇은 주위의 환경에 연료로 사용할 수 있는 화학물질이 존재해야 구동이 가능하고, 주위에 화학연료가 있으면 항상 추진력을 얻기 때문에 구동을 켜고/끄기(on/off)가 힘들다. 또한 자기장과 같은 추가적인 제어가 적용되지 않으면 구동방향의 제어가 어렵다는 명확한 한계점을 가지고 있다. 하지만 화학적 구동방법은 자기장구동에 비해 우월한 추진력을 통해 더 빠르게 로봇을 구동시킬 수 있다. 지금까지 개발된 마이크로로봇은 대부분 과산화수소를 연료로 사용하는데 과산화수소는 몸속에서 농도가 매우 낮고, 생체 친화적이지 않기 때문에 화학 반응 기반 제어를 이용한 마이크로로봇의 신체 내 적용에는 한계가 있는 것으로 보인다. 다만 이러한 화학 반응 기반 제어 마이크로로봇은 오염된 수상환경을 정화시키는 용도 등의 비 의료적 목적으로 응용될 수 있을 것으로 예상된다. 근래에는 위의 산과 반응하여 추진력

을 얻는 마이크로로봇을 만들어서 생체에서도 화학적으로 조작하는 마이크로로봇을 특정 환경에 사용 할 수 있다는 가능성을 보여주는 연구가 소개되고 있다.

4. 광 기반 제어

광 기반 제어 마이크로로봇은 빛을 이용하여 추진력을 얻을 뿐만 아니라 빛의 방향을 통해서 구동방향을 조작할 수도 있다. 빛을 사용하여 조작하는 방법으로는 크게 네 가지가 있다. 첫 번째로는 그림 13(a)와 같이 초점 레이저의 방사 압력을 사용하여 작은 크기의 마이크로로봇을 레이저 빛 안에 넣어 레이저의 움직임을 통해 제어하는 것이다.[17] 이는 레이저가 마이크로로봇에 부딪혔을 때 빛의 진행방향과 똑같이 마이크로로봇에 힘이 생기게 되고 광자에서 마이크로로봇으로 운동량이 전달되어 마이크로로봇이 레이저 빛 안에 트랩이 되는 것이다. 이 방법은 로봇의 모양에 상관없이 마이크로로봇의 크기만 레이저 빛 안에 트랩 될 정도가 되면 마이크로로봇을 구동할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 사용하는 레이저의 출력이 매우 크기 때문에 마이크로버블이나 세포기반 마이크로로봇 같이 열에 취약한 마이크로로봇 구동에는 어려움이 있을 것으로 예상된다.

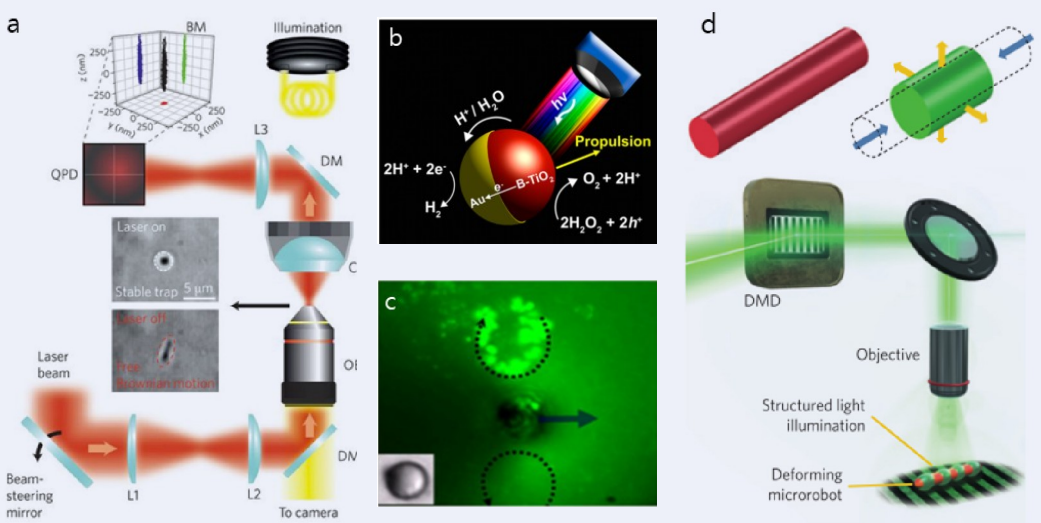
두 번째 방법은 그림 13(b)와 같이 광촉매를 사용하는 방법이다. 광촉매는 빛이 존재할 시에만 화학반응이 일어나는 촉매를 의미한다.[18] 광촉매를 마이크로로봇에 적용시키면 앞서 설명한 화학적으로 구동되는 마이크로로봇과 동일한 원리로 마이크로로봇을 구동시킬 수 있다. 광촉매를 비대칭적인 구조로 마이크로로봇에 분포시켜서 빛이 조사되었을 때 발생되는 화학반응을 통한 부산물의 농도기울기를 사용하여 추진력을 얻는 것이다. 이 방법은 기존 화학적인 제어와는 달리 빛의 켜고/끄기(on/off)를 통해서 마이크로로봇 구동의 켜고/끄기(on/off)를 조절 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 최근에는 조사되는 빛의 방향을 조절하여서 마이크로로봇의 방향을 컨트롤 할 수 있는 가능성도 보여주었다.[19]

세 번째 방법은 빛으로 인해 쉽게 가열이 되는 물질을 사용하는 방법이다. 빛으로 인해 쉽게 가열되는 물질을 마이크로로봇에 비대칭적으로 분포시킨다면 그림 13(c)와 같이 빛을 조사하였을 때 비대칭적으로 마이크로로봇이 가열되어 마이크로로봇 주위로 열기울기가 발생될 것이고, 이 열기울기로 인해서 추진력을 얻을 수 있다.[20] 예를 들어서 일부 금속은 폴리머 보다 빛을 더 잘 흡수하고 쉽게 온도가 올라가기 때문에 이러한 금속의 부분적인 코팅으로 열기울기를 발생시키고 추진력을 얻는다. 이 방법은 다른 광 기반 제어와는 달리 마이크로로봇의 방향을 컨트롤 하는데 어려움이 있다는 단점이 존재한다.

마지막으로는 그림 13(d)와 같이 빛에 반응하여 구조물의 부피나 모양이 변화하는 물질을 사용하여 비대칭 운동(non-reciprocal motion)을 구현하는 방법이다.[21] 물질의 특성에 따라 빛에 반응하여 부피나 모양이 바뀌고 빛이 없을 때에는 다시 원래의 부피나 모양으로 되돌아오는 물질들이 있다. 이러한 물질들을 특정한 모양으로 가공하여 구조물을 만들고, 조사하는 빛에 일정한 패턴을 주게 되면 반복적으로 비대칭 운동(non-reciprocal motion)을 구현 할 수 있다.

광 기반 제어 마이크로로봇을 생체에 사용하기 위해서는 빛의 투과성을 극복해야하는 어려움이 있다. 빛은 인체 투과율이 매우 낮기 때문에 인체 깊은 곳까지 빛을 전달하기 어렵고, 이에 따라 생체 내에서 빛을 사용하는 마이크로로봇을 활용하기에는 제한이 있다. 하지만 빛의 생체적합성과 정교한 조작이 가능하다는 점을 이용하여 체내에서 활용 시에는 많은 활용 가능성이 있을 것으로 보인다.

그림 13 (a) 레이저 트랩을 사용한 마이크로로봇 제어[17] (b) 광촉매를 사용하는 마이크로로봇 제어[18] (c) 빛을 통한 온도차를 사용한 마이크로로봇 제어[20] (d) 빛을 통한 비대칭 운동(non-reciprocal motion)을 사용하는 마이크로로봇 제어[21]



Ⅳ 마이크로로봇 제조 기술

의료용 마이크로로봇은 기존의 로봇 시술 시스템으로는 도달할 수 없는 체내 또는 체외 특정 위치 도달하여 약물 및 세포 전달, 고온치료, 센서, 생체 검사 등의 역할을 수행할 수 있어야 한다. 그러므로 미세한 사이즈로 정밀하게 제작되어야 하며, 세포, 조직에 대한 독성이 없어야 한다. 또한 위에서 언급한 가장 안전하고 효율적이며, 현재까지 가장 폭넓게 사용되는 자기장 제어를 위해 많은 경우 마이크로봇은 자성을 띄고 있어야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 마이크로로봇은 다양한 방법으로 제작될 수 있으며, 본 장에서는 자성 마이크로봇을 제작하기 위한 대표적 기술인 3차원 리소그래피 및 3D 프린팅, 나노 입자 기반 공정, 그리고 박테리아 기반 자성 마이크로로봇 제작에 대해서 논의할 것이다.

1. 3차원 리소그래피 및 3D 프린팅

체내의 여러 유체 환경 속에서 높은 추진력을 가진 로봇을 제작하기 위해서는 최적화된 3차원 형상의 구조물 제작이 필수적이다. 3차원 형상의 마이크로로봇 구조물을 제작하기 위한 기술로는 크게 3D 프린팅 기술과, 3차원 포토 리소그래피 기술이 대표적이다.

3D 프린팅은 적층 제조라고도 하는데, 컴퓨터 지원 설계(Computer Aided Design, CAD)를 이용한 디자인 혹은 실제 사물을 스캔해서 디지털화한 디자인을 바탕으로, 기판에 실제 3차원 구조물을 정밀 제작하는 공정이다. 최근 들어 3D 프린팅은 일반인들에게도 많이 보급되었으며, 초정밀 미세 구조물 제작부터 대형 부품 제조, 나아가 바이오 잉크를 이용한 바이오 3D 프린팅 장비까지 무한한 가능성을 보이고 있다. 3D 프린팅 기술은 크게 여섯 가지로 나뉜다. 광경화 적층방식, 레이저 소결 적층방식, 수지 압출 적층방식, 잉크젯 적층방식, 폴리젯 적층방식, 박막 적층방식이 있다. 이 중 대표적으로 많이 보급되어 사용되고 있는 방식은 광경화 적층방식, 레이저 소결 적층방식, 수지 압출 적층방식이다.

광경화 적층방식은 강한 자외선 영역의 빛 혹은 레이저 빔을 이용하여, 광경화성 수지를 보존하거나 경화시키는 방법이다. 레이저 소결 적층방식은 레이저 빔을 이용하여, 가루 분말상태의 재료를 각 레이어별로

고온 고압 환경에서 경화시키는 방법이다. 수지 압출 적층방식이란 플라스틱 와이어 형태의 재료에 열을 가하여 사출 헤드를 통해 압출하는 방식이다.

현재까지 개발된 3D 프린팅 기술을 이용해 빠르고 정밀한 구조물 제작이 가능한 반면, 나노 스케일 혹은 수~수십 마이크로미터 크기의 구조물을 제작하기에는 한계가 있다. 마이크로로봇 제작을 위해 반도체 공정에 기반을 둔 미세전자기계시스템(MEMS) 기술을 이용해 로봇을 제작하려는 시도도 있지만, 이는 일반적으로 2차원적인 공정이기 때문에 3차원의 복잡하고 정밀한 구조물을 제작하는데 한계가 있었다.

이를 극복하기 위해 3D 프린터보다 속도는 느리지만, 초미세·초정밀 구조물을 제작할 수 있는 방법인 3차원 레이저 스테레오 리소그래피 시스템이 마이크로로봇 제작에 사용되고 있다. 포토 리소그래피 공정은 마스크의 패턴을 실리콘 혹은 유리 기판 위에 코팅된 광경화 수지에 전사시키는 과정을 의미한다. 그림 14와 같이, 3차원 레이저 스테레오 리소그래피 시스템은 마스크가 없다는 점이 특징인데, 고에너지를 가진 근적외선 펨토초 레이저 빔을 이용하여 광경화 수지 내의 일정 영역에 초점을 맞추면, 초점 영역만 선택적으로 미세하게 경화시킬 수 있다. 따라서 초점 영역의 위치를 조절하면서 3차원 미세 구조를 정밀하게 만들 수 있다.[22] 대표적인 3차원 레이저 리소그래피 장비로는 나노스크라이브(Photonics Professional GT, Nanoscribe GmbH)로 100fs의 펨토초 펄스와 780nm의 파장을 가지는 티타늄-사파이어 레이저 빔을 이용한다. 이러한 3차원 레이저 리소그래피를 이용하면 수백 나노미터에서 수 밀리미터까지의 정밀도를 가지는 3차원 구조물을 제작할 수 있다.

그림 14 3차원 레이저 리소그래피 공정 시스템 원리[22]

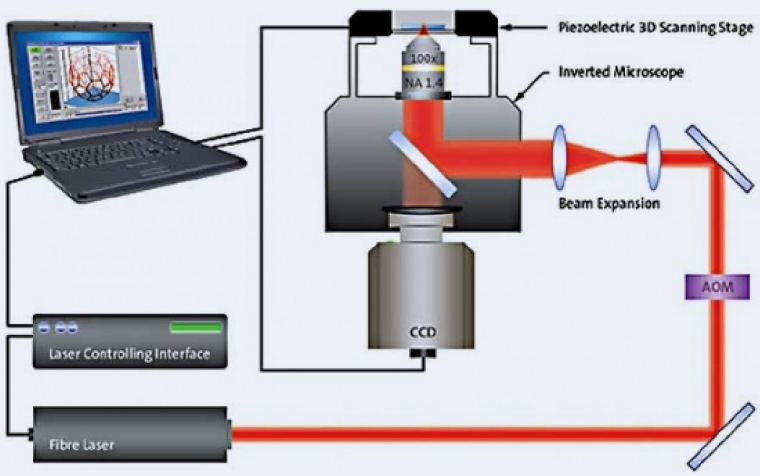


그림 15 3차원 마이크로로봇 구조물 제작 공정도 (1) 광경화성 수지 도포, (2) 이광자흡수를 통한 마이크로로봇 형상 경화, (3) 마이크로로봇 형상을 제외한 비경화 부분 제거를 위한 현상 공정, (4) 자성 및 생체적합 물질 코팅 공정[23]

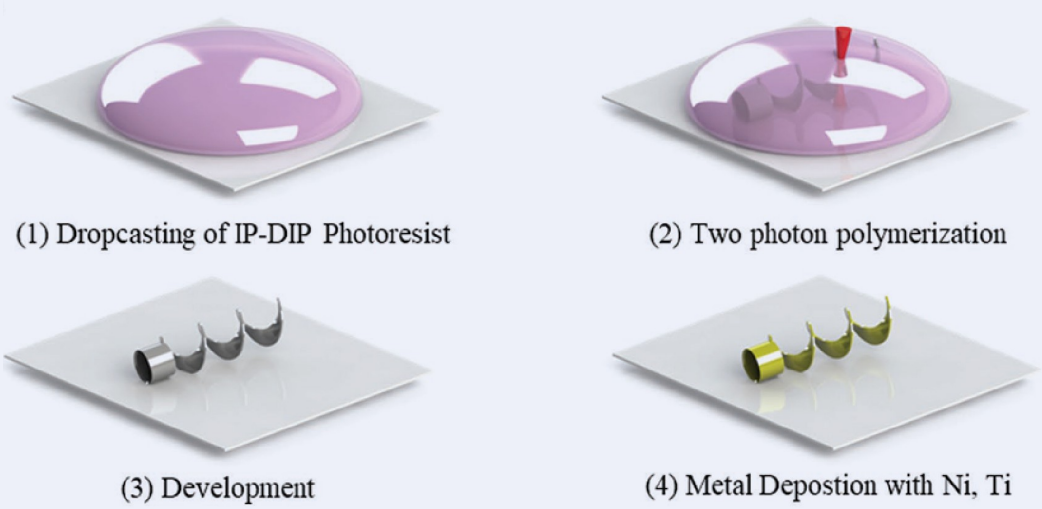
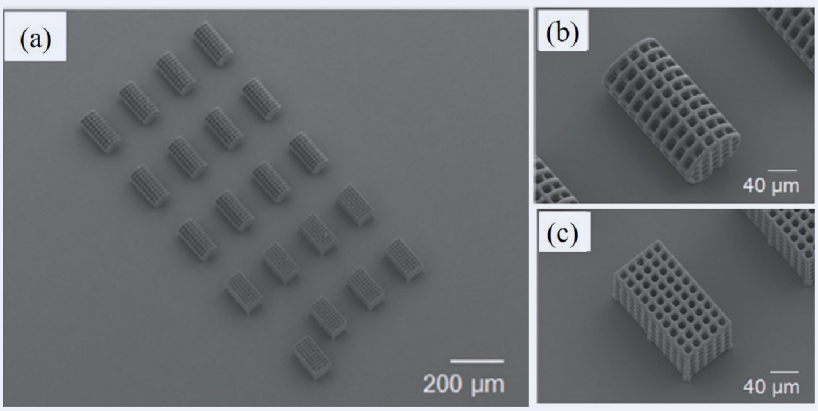


그림 15는 자기장 제어가 가능한 마이크로로봇을 3차원 레이저 스테레오 리소그래피 방법을 이용하여 제작하는 공정을 나타내는 개략도이다.[23] 광경화성 수지를 도포한 후, 레이저를 이용한 이광자흡수를 통해 원하는 3차원 마이크로로봇 형상을 경화시킨다. 다음으로 비경화된 부분을 현상액에 담가 제거한 후 자성 물질인 니켈과 생체적합성 물질인 티타늄을 차례로 증착한다. 그림 16은 3차원 레이저 스테레오 리소그래피 공정으로 정밀하게 제작된 마이크로로봇들을 보여주고 있다.[24]

그림 16 (a) 이광자흡수 경화 레이저 리소그래피 공정으로 제작된 3차원 마이크로로봇을 전자주사현미경(SEM)으로 관찰한 사진, (b, c) 마이크로로봇들의 확대 사진[24]

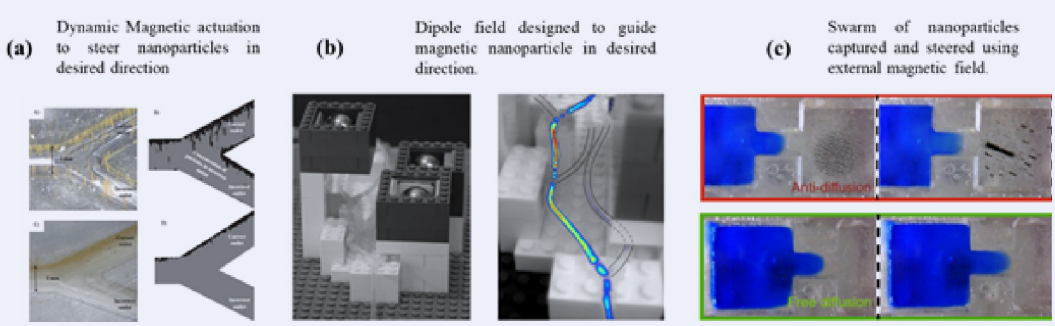


2. 나노 입자 기반 마이크로로봇

최근까지 다양한 마이크로/나노 로봇이 바이오 분야와 융합된 연구들에 소개되고 있다. 이중 나노입자의 특성을 이용한 나노로봇 기반 약물 전달이나 생물학적 응용은 많은 기대를 받고 있다.[25][26][27] 기능화된 자성 나노 입자는 그 크기로 인하여 혈관 뇌 장벽(blood-brain barrier)을 통과하여 치료 목적을 수행할 수 있을 것으로 기대되며, 자성 약물 전달(Magnetic drug delivery)은 약물의 흡수 효율을 증가시키는데 사용될 수 있다. 또한 자성 나노 입자는 혈관계를 통해 순환하며, 외부 자기장 시스템에 의해 원하는 위치에 약물을 전달 할 수 있다.

나노 입자들을 정맥으로 주입하게 되면 혈관계를 통해 신체로 순환 시킬 수 있다. 이를 통하여 외부자기장 시스템을 이용하여 자기장 구배를 조정하고, 목표점으로 나노 입자들을 이동 시키거나 집중 시킬 수 있다. 또한 나노 입자에 마커를 부착하여 혈관의 경로 내비게이션 역할을 수행하는 연구도 진행되고 있다. 나노 입자는 개별 제어보다 군집 형태로 제어 하는 것이 효율적이며, 군집된 나노로봇의 크기를 조절하여 전달하는 약물의 양을 조절 할 수 있으며, 목표지점에 도달 후 자기장 및 초음파를 통하여 고열을 내어 암세포를 사멸시키는 등 다양한 치료법에 적용 할 수 있다.

그림 17 (a) 나노 입자 제어[25], (b) 생체 내비게이션을 위한 가이딩 나노 입자[26], (c) 나노입자들의 군집제어[27]



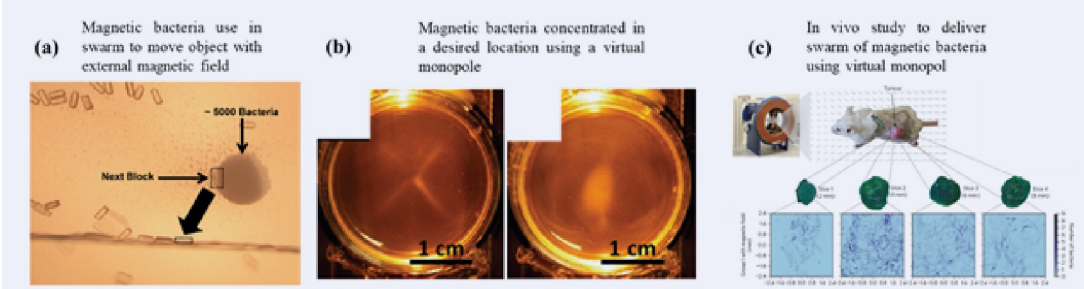
3. 박테리아 기반 마이크로로봇

박테리아 또는 세포 기반 마이크로로봇은 정맥에 주입되어 혈류를 타고 순환한다. 자기장은 혈관 내 마이크로로봇을 조종하여 원하는 위치로 이동하기 위해 사용되며, 보다 효율적인 방법으로 많은 수의 마이크로로봇이 원하는 곳으로 이동할 수 있도록 군집제어 연구도 진행되고 있다.[28)29)30)] 박테리아는 자연적인 생체 액추에이터로서 인공적인 구조물과 합해져 마이크로로봇으로서의 역할을 수행하기 위한 정밀 조향 및 추진 수단으로 사용될 수 있다. 주자성 박테리아(Magnetotactic Bacteria)는 박테리아 자체의 특성상 생체적 추진이 가능하고, 추가적으로 외부 자기장에 의해 방향을 제어 할 수 있다. 자연적인 마이크로로봇이라고도 할 수 있는 주자성 박테리아는 크기가 약 1에서 2 마이크로미터로 미래 지향적인 자체 추진 인공 마이크로

로봇으로 집단 작업을 수행하기 위한 연구의 대상이 되고 있다. 주자성 박테리아는 체내에 나침반 바늘과 같은 역할을 하는 산화철 나노 입자의 사슬을 가지고 있다. 이 사슬은 미세 혈관 네트워크를 통한 치료제의 전달에 이르기까지 다양한 마이크로 단위 군집 작업을 수행 할 수 있는 자기적 거동을 할 수 있게 한다. 이러한 군집 작업은 미세혈관계에서 박테리아를 효과적으로 조작하여 정해진 치료제의 정밀 전달 및 투여량을 정밀하게 제어하는데 필수적이다.

주자성-주호기성 이송 거동(magneto-aerotactic migration behavior)은 약물이 탑재 된 나노 리포좀을 종양의 저산소 영역으로 운반하는 데 사용될 수 있다. Magnetococcus marinus (MC-1) 박테리아는 저산소 영역을 찾아 이동하는 주호기성(Aerotaxis)과 세포 내 자기입자(Magnetosomes)로 인해 박테리아가 자기장 내에서 특정한 방향을 향하는 주자성(Magnetotaxis)을 모두 가지고 있다. 공유 결합으로 결합된 약물을 함유한 나노 리포좀을 지닌 MC-1이 실험쥐의 종양 근처에 주입되었을 경우, MC-1의 이동성에 자기장을 이용한 방향성 및 이동성이 추가되어 효율적으로 종양 내부까지 약물을 전달할 수 있음을 보여주었다.[31]

그림 18 (a) 자기장을 이용한 주자성 박테리아의 제어[28], (b) 주자성 박테리아의 군집 제어[29], (c) 쥐 체내에서의 주자성 박테리아 거동[30]



Ⅴ 의료용 마이크로로봇의 응용분야

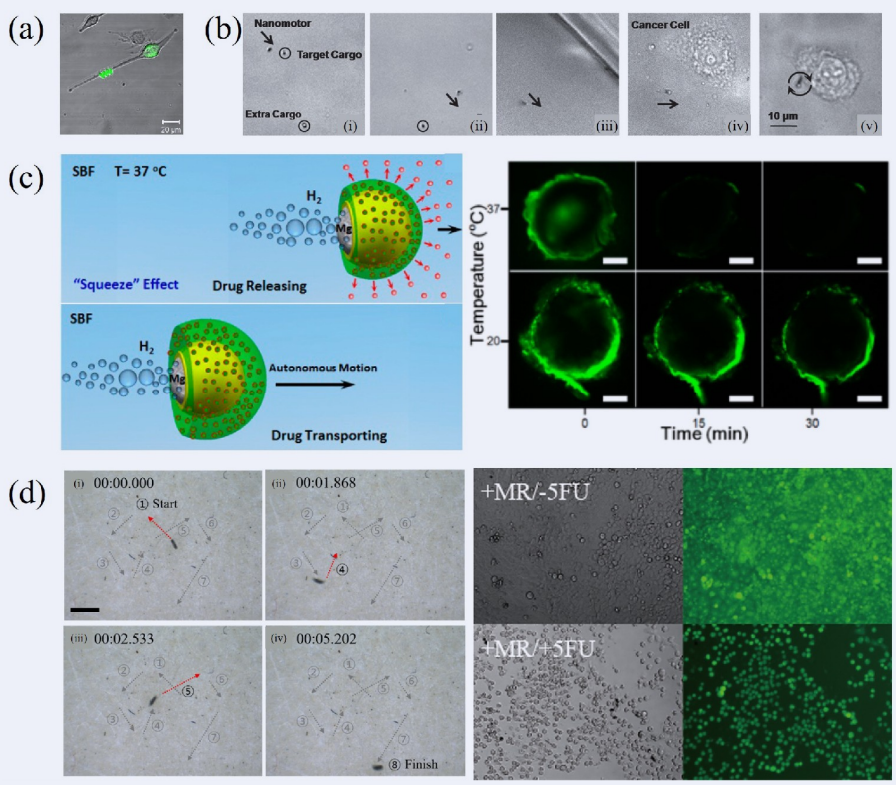
마이크로로봇은 미세한 크기와 정밀한 이동 및 방향 제어의 가능성으로 인해 일반적인 수술 로봇이 닿을 수 없는 신체 내부의 부위까지 도달하여 정확한 진단과 치료를 가능하게하고, 최소 또는 무절개 방식의 시술과 치료를 통하여 감염과 내상의 위험이 적어 최소 침습적 치료가 가능하여 다양한 의료분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.[1)2)31)32)] 본 장에서는 마이크로로봇을 이용한 약물전달, 세포전달, 혈관시술 등의 대표적인 마이크로로봇 기반 응용분야에 대한 논의를 진행할 것이다. 본 장에서 논의되지는 않겠지만 더욱 다양한 마이크로로봇의 응용분야가 있음을 미리 언급하고자 한다.

1. 마이크로로봇 기반 약물전달

약물 치료에 있어서 기존의 경구 투여 및 주사 투여 방식은 원하는 해당 질병이 있는 부분 이외의 정상 세포, 조직 및 장기들까지 약물의 영향을 미쳐 부작용을 유발할 수 있을 뿐만 아니라, 실제 병변부위의 치료를 위해 필요한 약물보다 더 많은 양을 투여해야 하므로 또 다른 부작용을 유발하거나 목표지점에 필요한 약물의 양을 적절히 조절하기도 힘들다. 이를 극복하고 필요한 만큼의 약물을 효과적으로 전달하기 위하여 정밀 약물전달 시스템(Drug Delivery System: DDS) 개발이 활발히 진행되고 있으며, 이러한 DDS의 경우 체내에서 이동하기 위한 추진력, 정밀한 위치 제어, 약물 방출 등의 중요한 기능들이 요구된다. 또한, 약물을 다른 장기, 세포, 조직들에 대한 영향 없이 병변부위에만 전달한다면 부작용을 최소화하고 약물효과를 향상시킬 수 있을 것이다. 이에 따라 그림 19와 같이 마이크로로봇을 이용한 목적지향성 약물 전달에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 그림 19(a)의 경우 박테리아의 나선형 편모를 모사한 마이크로로봇에 리포좀을 코팅하여 형광물질 흡착을 유도한 후 회전자기장에 의한 나선운동으로 원하는 목표 세포에 형광물질을 전달하여 마이크로로봇 기반 약물 전달의 가능성을 보여주고 있다.[33)] 그림 19(b)의 경우 한쪽 끝이 니켈(Ni), 나머지 부분이 은(Ag)으로 되어있는 나노와이어를 이용한 나노로봇으로 자기장에 의해 Ni 부분이 회전하여 이동한 후 Doxorubicin과 같은 약물을 자궁경부암 세포인 헬라(HeLa) 세포에 전달하고 있다.[34)] 그림

19(c)의 경우 마이크로로봇으로 약물 전달 시 온도를 제어하여 약물 방출을 조절하고 있다. 37℃에서 고분자 결합이 느슨해지는 Poly(N-isopropylacrylamide: PNIPAM) 물질로 자성입자를 코팅한 후 약물을 탑재하여 목표 지점에서 37℃로 온도를 올려주며 약물을 방출하는 것을 알 수 있다. 마이크로로봇을 이용한 약물 전달 후 마이크로로봇의 회수가 중요한 고려 사항인데, 생분해성 재료를 이용해 약물 전달 후 회수의 필요성이 없는 마이크로로봇도 연구되어지고 있다.[35] 그림 19(d)에서는 Poly(Lactide-co-Glycolide: PLGA)라는 생분해성 재료에 자성입자, 약물을 함께 탑재하여 생분해성 마이크로로봇을 제작하였고, 자기장에 의해 구동제어가 가능하고, 항암약물 전달 시 암세포의 수가 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다.[36]

그림 19 마이크로로봇 기반 약물 전달 (a) 단일 C2C12 세포에 Calein 형광 물질을 전달한 나선형 마이크로로봇[33], (b) Doxorubicin 약물 탑재 후 이동, 전달하는 Ni-Ag 나노와이어 모터 마이크로로봇[34], (c) 온도에 반응하여 약물 방출하는 Mg/Pt-PNIPAM 야누스 마이크로로봇[35], (d) 약물을 몸체 자체 물질에 포함하여 이동 후 생분해되며 약물을 방출하는 생분해성 자성 마이크로로봇[36]

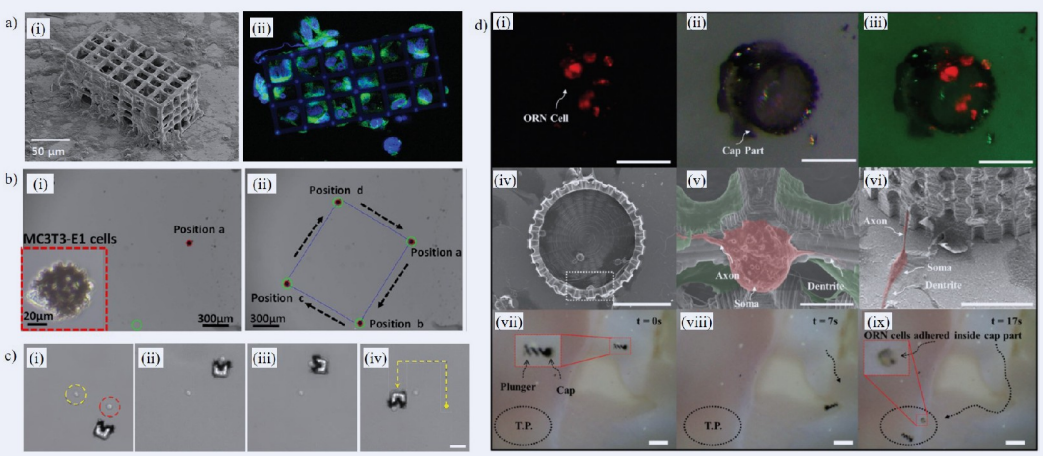


2. 마이크로로봇 기반 세포전달

줄기세포는 인체 내 다양한 조직 및 기관의 세포 기능을 재생하여 치료할 수 있어 암, 심혈관질환, 혈액질환, 뇌질환 등 다양한 질병 치료에 적용 가능하다는 장점을 갖고 있어 최근 재생의학 분야에서 줄기세포 치료는 높은 관심을 받고 있다.[37)38)39)] 또한 줄기세포 관련 연구 분야는 세포분화 기술, 역분화 기술, 세포분리 및 증식 기술, 임상 기술 등의 다양한 기술이 개발되어 매우 광범위한 질환 치료에 대한 가능성을 보여주고 있다. 하지만 주사기, 병변을 개복 후 줄기세포 탑재 패치 주입 등의 기존 방법은 침습적이며, 수술 후 고통 및 염증을 유발할 수 있고 회복 시간이 길어 질 수 있다.[40)] 또한 세포 전달용 패치의 경우 큰 크기로 인해 신체 내 도달할 수 있는 부위가 제한적이다. 그러나 마이크로로봇 기반 세포 전달의 경우, 위의 약물 전달 경우와 같은 장점을 가지고 기존 세포 전달 방식의 한계를 극복할 수 있는 가능성으로 인해 중요기술로 연구가 진행되고 있다.

그림 20(a)는 3차원 세포 배양 및 전달이 가능한 스캐폴드(scaffold)형 마이크로로봇으로, 스캐폴드 구조를 통해 3차원으로 상호 작용하며 세포를 배양할 수 있으며 자기장을 통해 원하는 부위로 정밀하게 위치를 제어하여 세포를 전달 할 수 있다.[24)] 줄기세포의 경우 2차원적인 단층 배양에서 세포의 형태 및 기능을 서서히 잃게 되는 반면 3차원 세포 배양의 경우 이를 향상 시킬 수 있으므로 3차원 세포 배양 및 전달 가능한 마이크로로봇을 이용한다면 줄기세포의 기능을 3차원 조직과 좀 더 유사하게 유지할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 20(b)는 구형 스캐폴드 마이크로로봇으로 20(a)와 같은 정밀 세포 전달 치료의 가능성을 보여주고 있다.[41)] 그림 20(c)의 경우 ㄷ형 마이크로로봇으로 자기장 제어를 통해 방향 및 위치를 제어하여 세포를 원하는 곳으로 이동시킬 수 있다.[42)] 마지막으로 그림 20(d)의 경우에는 캡슐형 마이크로로봇으로 꼬리(Plunger)와 캡으로 구성되어 있고, 꼬리 앞단의 저장 공간과 캡을 결합하여 원하는 세포를 탑재할 수 있으며(Pick 기능) 원하는 위치에 도달하여 캡을 열어 세포를 전달(Drop 기능)할 수 있다.[23)]

그림 20 마이크로로봇 기반 세포 전달 (a) Human embryonic kidney (HEK) 293 세포를 3차원으로 배양·전달 가능한 스캐폴드(scaffold)형 마이크로로봇[24], (b) MC3T3-E1 섬유아세포를 탑재·배양 후 전달하는 구형 마이크로로봇[41], (c) 쥐의 배아세포를 탑재·전달 가능성을 보여주는 ㄷ형 마이크로로봇[42], (d) "Pick-and-Drop" 기능을 사용하여 세포를 탑재·전달 할 수 있는 캡슐형 마이크로로봇 (i, ii, iii) olfactory receptor neuron (ORN) 세포가 탑재된 캡슐형 로봇 캡의 형광 이미지와 (iv, v, vi) SEM 이미지, (vii, viii, ix) ORN 세포가 탑재된 캡을 'Pick'하여 원하는 위치로 이동 후 'Drop'하여 세포를 전달하는 캡슐형 마이크로로봇[23]



3. 마이크로로봇 기반 혈관질환 시술

혈관 질환에 대한 가장 일반적인 치료법으로는 약물 치료, 혈관 우회로 이식(vascular bypass graft) 및 경피 경관 혈관 성형술(Percutaneous Transluminal Angioplasty: PTA)이 있다. 예를 들어 약물 요법은 혈전 용해제 또는 항응고제를 사용하여 혈전을 용해하는 치료법이다. 그러나 이 요법은 손상된 혈관의 지혈 반응에 악영향을 미칠 수 있다. 혈관 우회술에서 이식 된 혈관은 폐색 된 혈관을 우회하는 시술이다. 그러나 이것은 장시간 회복과 함께 번거로운 복강경 수술이 포함되며 부작용의 우려가 있다. PTA는 심혈관 네트워크의 만성 완전 폐색(Chronic Total Occlusion: CTO)으로 막힌 혈관에 대해 가장 빈번하게 사용되는 치료법으로 비교적 단순한 절차이고 최소 침습성이며 회복 시간이 비교적 짧은 것이 특징이다. 가이드 와이어와 카데터를 사용하여 폐색된 병변 부위를 관통하고 스텐트를 삽입하여 혈관을 확장시켜 혈액의 흐름을 원활히 한다. 그러나 가이드 와이어 및 카데터의 자유로운 조작 및 시술 성공 확률을 높이기 위해서는 고도의 훈련과정과 시술자의 숙련된 경험이 필요하다. 또한 이러한 훈련과 숙련된 경험이 있더라도 환자의 해부학적 심혈관 구조에 따라 시술 성공 확률은 많은 영향을 받는다.

최근 마이크로로봇은 혈관 질환의 치료에 대한 가능성을 보여주며, 기존 시술의 어려움을 보안 할 수 있을 것으로 부각되고 있다. 작은 크기는 최소 침습적인 시술을 가능하게 하며, 외부 자기장을 이용하여 무선으로 정밀하게 조작 할 수 있는 특징은 시술자가 보다 정밀하고 신속하게 시술을 진행할 수 있는 가능성을 제공한다. 또한 환자의 병변부위의 특성에 따라 다양한 마이크로로봇을 개발하여 병변의 특징에 따라 필요한 의학적 기능을 수행하는 것을 목표로 많은 연구가 진행되고 있다.

그림 21에서 볼 수 있듯이 기존의 가이드 와이어 끝 부분에 장착 된 부드러운 마이크로로봇(soft micro-robot)은 외부 자기장 제어시스템으로 정밀 제어 될 수 있다.[43] 이러한 자기장 제어시스템은 3차원 공간에서 자기장을 생성 및 제어 할 수 있고, 마이크로로봇은 자체 자성물질을 외부 자기장 방향의 변화에 따라 정렬시켜 방향과 위치가 제어된다. 즉 다시 말해 외부 자기장을 이용하여 마이크로로봇을 원하는 방향으로 정밀 제어 할 수 있다. 그림 22는 3차원 혈관 분지 모델에서 가이드와이어에 부착된 마이크로로봇이 조향되는 것을 보여준다.[43] 사용자는 원하는 목표점을 인식한 후 자기장 제어 시스템을 이용하여 자기장 방향을 정밀하게 조작하고, 이러한 외부 자기장의 크기 및 방향에 따라서 마이크로로봇이 목표지점까지 도달하게 된다.

그림 21 마이크로로봇 조작을 위한 자기장 제어 시스템과 가이드 와이어 부착형 마이크로로봇[43]

그림 22 3차원 혈관 모델에서 가이드 와이어 부착형 마이크로로봇의 정밀 조향[43]

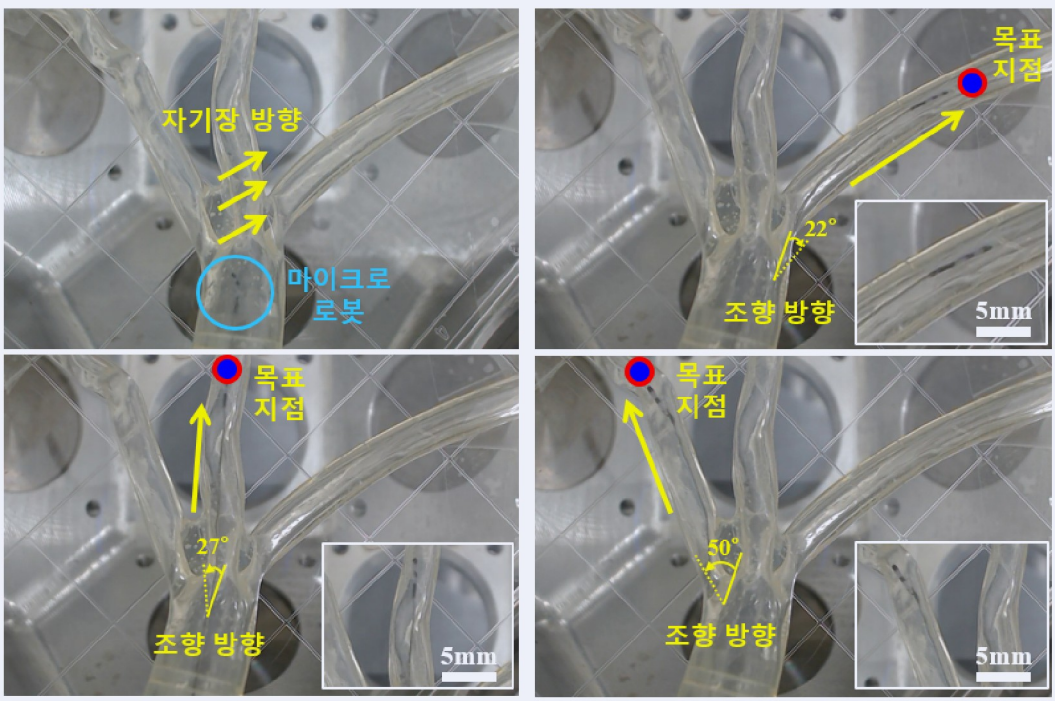


그림 23은 회전하는 자기장을 이용하여 추진되는 무선 마이크로로봇이다.[44] 생체에 적합한 재료를 이용하여 3D 프린팅 공정을 통해 나선형 구조물을 제작하고, 구조물 내부에 자성 재료를 적용하여 다양한 유체 환경에서 추진될 수 있는 마이크로로봇이다. 이 마이크로로봇은 회전 자기장을 이용하여 무선으로 조작 될 수 있으며 혈관의 막힌 부분을 원격에서 개통 할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 24는 실제 심장크기와 동일하게 제작된 3차원 혈관 모델에서 혈관의 일부를 인공 혈전으로 막은 뒤, 마이크로로봇을 이용하여 막힌 혈전을 개통하는 실험을 보여준다.[44] 수평 구동에 비하여 수직 구동 및 드릴링은 중력의 영향을 고려해야 하므로 보다 큰 추진력 필요로 한다. 수직 구동 및 막힌 부분을 개통 시 높은 주파수의 회전 자기장을 이용하여 3차원 구동 및 드릴링이 가능하다.

그림 23 3D 프린팅 공정으로 제작된 드릴링 마이크로로봇의 모식도와 실체 이미지[44]

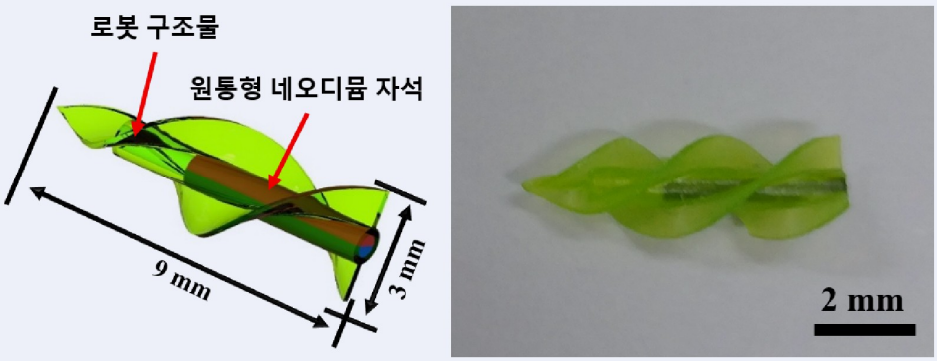
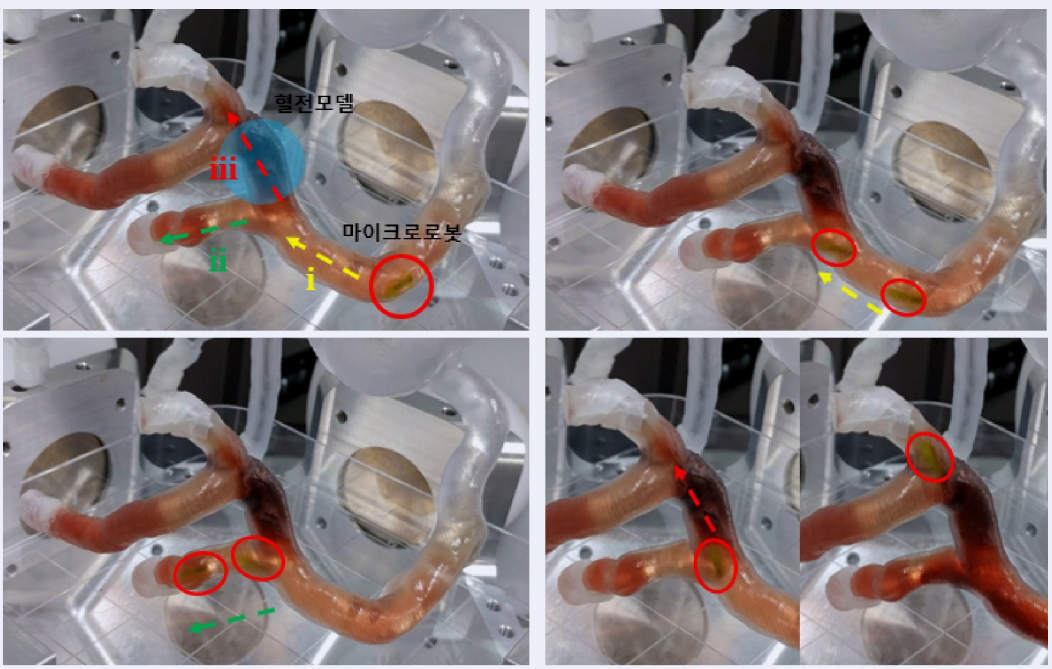


그림 24 3차원 혈관 모델 환경에서 마이크로로봇을 이용한 조향과 드릴링[44]



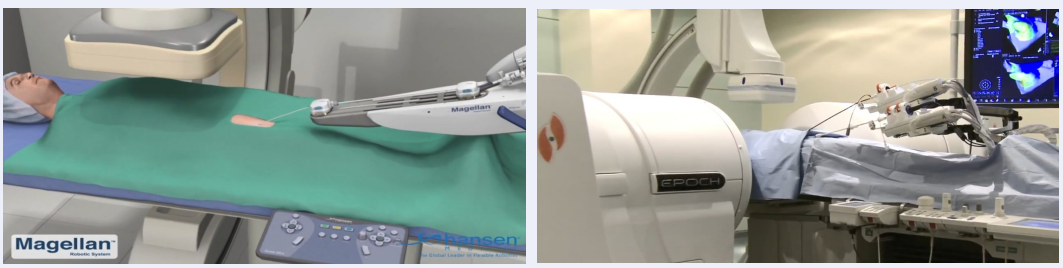
VI 마이크로로봇 관련 기업들

서론 및 마이크로로봇 기술 동향을 논의하면서 이미 언급했지만 현재까지 마이크로로봇 관련 시장은 태동기로서 현재의 시장규모보다는 앞으로의 시장규모가 더욱 성장할 것은 자명하다. 이러한 기대로 인하여 전 세계적으로 다양한 연구 그룹에서 마이크로로봇 관련 연구를 진행하고 있으며 일부는 특정 목적에 따라 마이크로로봇 기술을 기반으로 사업화를 시작했다. 그러나 현재까지 마이크로로봇 분야에서는 절대 강자는 없는 것으로 보이며, 원천연구와 사업화 연구 개발에서 모두 치열한 경쟁이 진행되고 있다. 본 장에서는 마이크로로봇 관련 기업들을 간략하게 소개하고자 한다. 다만 해당 기업기술의 장단점을 논하기 위해서는 객관적인 시각이 필요하며 연구자 및 기업마다 바라보는 가치가 다를 수 있다. 따라서 각 기업의 기술에 대한 장단점은 논하기 않기로 하고, 각 기업을 간략하게 소개하고자 한다. 각 기업 및 시스템의 상세한 내용은 소개된 기업의 웹페이지를 통하여 확인 할 수 있다.

미국의 Hansen Medical(hansenmedical.com)은 Magellan Robotic System (그림 25(a))을 개발하여 판매하고 있다. 본 시스템은 와이어기반 기계적 카데터 제어 시스템으로서 X-ray 시스템을 이용하여 시술 중 영상을 확인한다. 시술자는 마스터-슬레이브(Master-Slave) 시스템을 기반으로 환자와 이격된 공간에서 가이드 와이어 및 카데터를 제어할 수 있다.

Stereotaxis(www.stereotaxis.com)사의 Niobe® System은 그림 25(b)에서 보이듯이 환자가 위치하는 수술침대 양쪽에 두 개의 대형 구조물이 회전하면서 환자 심장부의 자기장을 제어한다. 각 구조물에는 다수의 영구자석이 있어 구조물 내의 영구자석들의 위치 및 방향각 두 개 구조물의 위치 및 방향을 제어하여 작업 영역(working space)내의 자기장을 변화시킨다. Niobe® System은 시술 중 영상을 위해서 X-ray 시스템을 사용하며, 시술자는 수술실 외부에 위치한 마스터(Master) 시스템을 이용하여 환자와 함께 수술실에 위치하는 슬레이브(Slave) 시스템을 제어한다. 본 시스템은 국내에서도 임상허가를 받아 심혈관 병변의 치료에 활용되고 있다.

그림 25 (a) Hansen Medical사 Magellan Robotic System, (b) Stereotaxis사의 Niobe® System



다음으로 소개할 기업은 Magnetecs(www.magnetecs.com)사의 Catheter Guidance Control and Imaging (CGCI) 시스템으로, 자기장으로 카데터를 제어하는 것이 목적이다. 이를 위해 그림 26(a)와 같이 8개의 코일을 (아래 4개, 위에 4개) 대칭 형태로 가지고 있다. Magnetecs 시스템도 이전에 소개된 시스템들과 마찬가지로 마스터-슬레이브 시스템을 이용하여 카데터를 제어하며, 카데터의 전후 이송은 마스터-슬레이브 시스템, 회전 및 좌우 이송은 자기장을 이용하여 제어한다. 본 시스템도 시술 중 환자 영상은 X-ray 시스템을 사용하는 것을 목표로 한다.

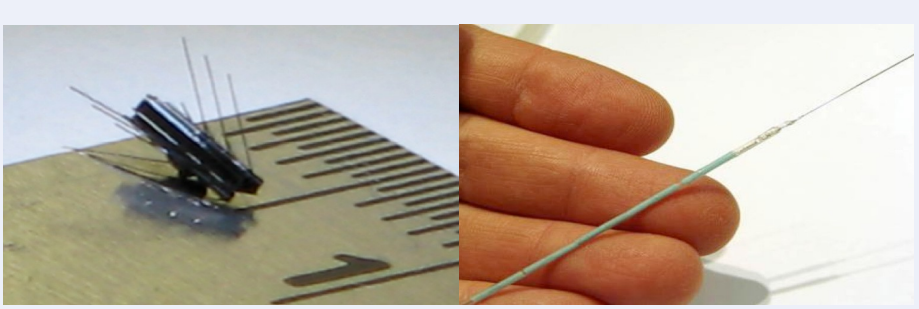
다음은 스위스의 Aeon Scientific사의 Aeon Phocus 시스템을 소개한다. Aeon Phocus는 그림 26(b)와 같이 환자가 위치하는 수술치대 양쪽에 두 개의 코일 시스템(모두 7개의 대형 전자석 코일)이 위치하며, 각 코일 시스템 아래에는 레일이 있어 환자 주위로 코일을 모으거나 분리할 수 있다. 본 시스템도 이미 소개된 다른 시스템과 마찬가지로 시술 중 영상은 X-ray 시스템을 이용하여 획득하고 시술자는 마스터-슬레이브 시스템을 이용하여 수술실 밖에서 카데터를 제어할 수 있다. 본 시스템도 부정맥 시술을 위하여 개발되었으며, 본사는 현재 정상적인 사업 활동이 안 되는 것으로 판단된다.

현재까지 소개된 4개 회사의 각 시스템들이 환자의 영상획득을 위해서 X-ray 시스템을 사용하는 것은 심혈관관련 질환을 시술하면서 실시간으로 환자의 영상 및 환자 심장에 위치하는 카데터 또는 가이드 와이어의 위치를 파악하기 위한 것이다. 또한 모든 시스템이 마스터-슬레이브 시스템을 이용하는 것은 X-ray 시스템에 의한 시술자의 방사선 피폭을 줄이고 시술의 정확성을 높이고자하는 목적으로 보인다.

그림 26 (a) Magnetecs사의 Catheter Guidance Control and Imaging (CGCI) 시스템, (b) Aeon Scientific사의 Aeon Phocus 시스템

다음으로 소개할 기업은 Microbot medical(www.microbotmedical.com)사로서, 본 기업은 독립된 형태의 ViRob (그림 27(a))과 카데터 형태의 TipCAT (그림 27(b))을 개발하였다. ViRob은 인체 내 약물전달 등의 목적으로 개발되고 있는 것으로 보이며, TipCAT은 뇌에 삽입된 전극 등의 치료기기에 섬유아세포(fibroblast) 등이 결합되어 고유 기능을 떨어트리는 것을 해결하고자 하는 것으로 보인다. Microbot medical사는 XACT Robotics(www.xactrobotics.com)사와 전략적 제휴 등을 통하여 함께 연구개발을 진행하는 것으로 보인다. XACT Robotics사는 그림 25와 그림 26에 소개된 기업들과 유사하게 마이크로로봇 제어 시스템 및 마스터-슬레이브 시스템을 개발하고 있는 것으로 보이며, 이러한 제어 시스템은 아마도 Microbot medical사에서 개발되는 마이크로로봇의 제어에 활용될 것으로 예상한다.

그림 27 Microbot medical사의 (a) ViRob, (b) TipCAT



VII 맺음말

지금까지 의료용으로 응용 가능한 마이크로로봇에 대하여 개략적으로 살펴보았다. 의료용 마이크로로봇은 미세구조물 제작기술, 정밀제어기술, 효율적인 구동 기법 등의 요소기술의 획기적인 발전으로 점점 현실화 되어가고 있으며 일부 사업화를 시작하기도 하였다. 이러한 마이크로로봇의 발전은 인체 내부 또는 체외에서 기존의 진단 및 치료방식의 문제점들을 개선하거나, 기존에 없던 전혀 새로운 진단 및 치료방법을 제시하여 인간의 삶의 질을 크게 향상 시킬 것으로 기대된다. 마이크로로봇이 인체 내에서 필요한 만큼의 약물만 정밀 전달하여 종양을 치료할 수 있다면 암 치료에 획기적인 역할을 할 수 있을 것이다. 또한, 마이크로로봇 기술을 이용하여 심혈관 시술의 정확성을 획기적으로 높이고 시술시간을 줄일 수 있다면 환자뿐만 아니라 시술자에게도 엄청난 도움이 될 것이다. 마이크로로봇을 이용하여 줄기세포를 정밀하게 전달할 수 있다면 아마도 기존에 상상하지 못하던 새로운 치료법이 개발될 수 있을 것이다. 하지만 마이크로로봇이 의료 현장에서 사용되기 위해서는 앞으로도 많은 기초연구, 동물실험, 임상시험이 요구되며, 이를 위해서는 마이크로로봇 관련 연구자뿐만 아니라 다양한 분야의 연구자와 임상의의 공동연구가 필요하다. 특히 실제 개발될 마이크로로봇을 임상에 사용할 임상의와 마이크로로봇 연구자의 벽이 없는 논의와 공동연구는 마이크로로봇이 임상현장에 사용되는 시점을 앞당기는 중요한 요소가 될 것으로 생각된다.

저자 _ 최홍수 (Hongsoo Choi)

• **학 력**
Washington State University 기계공학 박사
Washington State University 기계공학 석사
영남대학교 기계공학 학사

• **경 력**
現) 대구경북과학기술원(DGIST) 교수
前) 한국기계연구원 선임연구원
前) University of California, Davis 박사후연구원

참고문헌

1) Medical Robotics Technology & Market Analysis report, Yole Développement, 2017년 11월

2) Global Nanorobotics Systems Market 2016-2020, TechNavio (Infiniti Research Ltd.), 2016년 11월

3) Chang, L. (2011). Foundations of MEMS. Pearson/Prentice Hall

4) Yesin, K. B., Vollmers, K., & Nelson, B. J. (2006). Modeling and control of untethered biomicrorobots in a fluidic environment using electromagnetic fields. The International Journal of Robotics Research, 25(5-6), 527-536.

5) Peyer, K. E., Tottori, S., Qiu, F., Zhang, L., & Nelson, B. J. (2013). Magnetic helical micromachines. Chemistry-A European Journal, 19(1), 28-38.

6) Kratochvil, B. E., Kummer, M. P., Erni, S., Borer, R., Frutiger, D. R., Schürle, S., & Nelson, B. J. (2014). MiniMag: a hemispherical electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation. In Experimental Robotics (pp. 317-329). Springer, Berlin, Heidelberg.

7) Kummer, M. P., Abbott, J. J., Kratochvil, B. E., Borer, R., Sengul, A., & Nelson, B. J. (2010). OctoMag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation. IEEE Transactions on Robotics, 26(6), 1006-1017.

8) Slocum center for orthopedics & sports medicine. (n.d.). Retrieved from https://www.slocumcenter.com/

9) Martel, S., Mathieu, J. B., Felfoul, O., Chanu, A., Aboussouan, E., Tamaz, S., ... & Mankiewicz, M. (2007). Automatic navigation of an untethered device in the artery of a living animal using a conventional clinical magnetic resonance imaging system. Applied physics letters, 90(11), 114105.

10) Floyd, S., Pawashe, C., & Sitti, M. (2008, May). An untethered magnetically actuated micro-robot capable of motion on arbitrary surfaces. In Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on (pp. 419-424). IEEE.

11) Wang, W., Castro, L. A., Hoyos, M., & Mallouk, T. E. (2012). Autonomous motion of metallic microrods propelled by ultrasound. ACS nano, 6(7), 6122-6132.

12) Ahmed, D., Lu, M., Nourhani, A., Lammert, P. E., Stratton, Z., Muddana, H. S., ... & Huang, T. J. (2015). Selectively manipulable acoustic-powered microswimmers. Scientific reports, 5, 9744.

13) Ahmed, D., Dillinger, C., Hong, A., & Nelson, B. J. (2017). Artificial Acousto-Magnetic Soft Microswimmers. Advanced Materials Technologies, 2(7), 1700050.

14) Ahmed, D., Baasch, T., Jang, B., Pane, S., Dual, J., & Nelson, B. J. (2016). Artificial swimmers propelled by acoustically activated flagella. Nano letters, 16(8), 4968-4974.

15) Zhao, G., & Pumera, M. (2014). Geometric asymmetry driven Janus micromotors. Nanoscale, 6(19), 11177-11180.

16) Jang, B., Wang, W., Wiget, S., Petruska, A. J., Chen, X., Hu, C., ... & Nelson, B. J. (2016). Catalytic locomotion of core-shell nanowire motors. ACS nano, 10(11), 9983-9991.

17) Maragò, O. M., Jones, P. H., Gucciardi, P. G., Volpe, G., & Ferrari, A. C. (2013). Optical trapping and manipulation of nanostructures. Nature nanotechnology, 8(11), 807.

18) Jang, B., Hong, A., Kang, H. E., Alcantara, C., Charreyron, S., Mushtaq, F., ... & Nelson, B. J. (2017). Multiwavelength light-responsive Au/B-TiO2 janus micromotors. ACS nano, 11(6), 6146-6154.

19) Dai, B., Wang, J., Xiong, Z., Zhan, X., Dai, W., Li, C. C., ... & Tang, J. (2016). Programmable artificial phototactic microswimmer. Nature nanotechnology, 11(12), 1087.

20) Jiang, H. R., Yoshinaga, N., & Sano, M. (2010). Active motion of a Janus particle by self-thermophoresis in a defocused laser beam. Physical review letters, 105(26), 268302.

21) Palagi, S., Mark, A. G., Reigh, S. Y., Melde, K., Qiu, T., Zeng, H., ... & Giesselmann, F. (2016). Structured light enables biomimetic swimming and versatile locomotion of photoresponsive soft microrobots. Nature materials, 15(6), 647.

22) 이승민, 김상원, & 최홍수. (2017). 레이저 포토리소그래피 기반 3 차원 구조물 제작 및 의공학적 응용. 기계저널, 57(1), 42-45.

23) Lee, S., Kim, S., Kim, S., Kim, J. Y., Moon, C., Nelson, B. J., & Choi, H. (2018). A Capsule-Type Microrobot with Pick-and-Drop Motion for Targeted Drug and Cell Delivery. Advanced healthcare materials, 7(9), 1700985.

24) Kim, S., Qiu, F., Kim, S., Ghanbari, A., Moon, C., Zhang, L., ... & Choi, H. (2013). Fabrication and characterization of magnetic microrobots for three-dimensional cell culture and targeted transportation. Advanced Materials, 25(41), 5863-5868.

25) Hoshiar, A. K., Le, T. A., Amin, F. U., Kim, M. O., & Yoon, J. (2017). A Novel Magnetic Actuation Scheme to Disaggregate Nanoparticles and Enhance Passage across the Blood-Brain Barrier. Nanomaterials, 8(1), 3.

26) Latulippe, M., & Martel, S. (2015). Dipole field navigation: Theory and proof of concept. IEEE Transactions on Robotics, 31(6), 1353-1363.

27) Yu, J., Wang, B., Du, X., Wang, Q., & Zhang, L. (2018). Ultra-extensible ribbon-like magnetic microswarm. Nature communications, 9(1), 3260.

28) Martel, S., & Mohammadi, M. (2010, May). Using a swarm of self-propelled natural microrobots in the form of flagellated bacteria to perform complex micro-assembly tasks. In Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on (pp. 500-505). IEEE.

29) D. De Lanauze, O. Felfoul, J.-P. Turcot, M. Mohammadi, and S. Martel, (2014) "Three-dimensional remote aggregation and steering of magnetotactic bacteria microrobots for drug delivery applications," The International Journal of Robotics Research, vol. 33, no. 3, pp. 359-374

30) Felfoul, O., Mohammadi, M., Taherkhani, S., De Lanauze, D., Xu, Y. Z., Loghin, D., ... & Gaboury, L. (2016). Magneto-aerotactic bacteria deliver drug-containing nanoliposomes to tumour hypoxic regions. Nature nanotechnology, 11(11), 941.

31) Nelson. B. J., Kaliakatsos. I. K., Abbott. Jake J., (2010) "Microrobots for Minimally Invasive Medicine", Annual Review of Biomedical Engineering 12, 55-85

32) Li. J, Avila. B. E.-F., Gao. W., Zhang. L.,, Wang. J., (2017) "Micro/nanorobots for biomedicine: delivery, surgery, sensing, and detoxification.", Science Robotics, 2, eaam6431

33) Mhanna. R., Qiu. F., Zhang. L., Ding. Y., Sugihara. K., Zenobi-Wong. M., Nelson. B. J., (2014) 'Artificial Bacterial Flagella for Remote-Controlled Targeted Single-Cell Drug Delivery", Small, 10, No. 10, 1953-1957

34) Gao. W., Kagan. D., Pak. O. S., Clawson. C., Campuzano. S., Chuluun-Erdene. E., Shipton. E., Fullerton. E. E., Zhang. L., Lauga. E, Wang. J., (2012) "Cargo-Towing Fuel-Free Magnetic Nanoswimmers for Targeted Drug Delivery", Small, 8, No.3, 460-467

35) Mou. F., Chen. C., Zhong. Q., Yin. Y., Ma. H., Guan. J., (2014) "Autonomous Motion and Temperature-Controlled Drug Delivery of Mg/Pt-Poly(N.isopropylacrylamide) Janus Micromotors Driven by Simulated Body Fluid and Blood Plasma", Applied Materials and Interfaces, 6, 9897-9908

36) Kim. J.-Y., Jeon. S. H., Lee. J. E., Lee. S. M., Lee. J. H., Jeon. B. O., Jang. J. E., Choi. H. S., (2018) "A simple and rapid fabrication method for biodegradable drug-encapsulating microrobots using laser micromachining, and characterization thereof", Sensors and Actuators B: Chemical, 266, 276-287

37) Doucet C., Ernou I., Zhang Y., Llense J. R., Begot L., Holy X., Lataillade J.J., (2005) "Platelet lysates promote mesenchymal stem cell expansion: A safety substitute for animal serum in cell-based therapy applications." J. Cell. Physiol. 205, 228.236

38) Dimmeler S., Burchfield J., Zeiher A. M., Cell-based therapy of myocardial infarction. Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. 28, 208.216 (2008).

39) Guven S., Chen P., Inci F., Tasoglu S., Erkmen B., Demirci U., (2015) "Multiscale assembly for tissue engineering and regenerative medicine." Trends Biotechnol. 33, 269.279

40) Wei K., Zhu M., Sun. Y., Xu J., Feng Q., Lin S., Wu T., Xu J., Tian F., Xia J., Li G., Bian L., (2016) Robust biopolymeric supramolecular "Host.Guest Macromer" hydrogels reinforced by in situ formed multivalent nanoclusters for cartilage regeneration. Macromolecules 49, 866.875

41) Li J., Li X., Luo T., Wang R., Liu C., Chen S., Li D., Yue J., Cheng S., Sun D., (2018) "Development of a magnetic microrobot for carrying and delivering targeted cells", Science Robotics, 3, eaat8829

42) Steager E. B., Sakar M. S., Magee C., Kennedy M., Cowley A. Kumar V., (2013) "Automated biomanipulation of single cells using magnetic microrobots", The international journal of Robotics Research, 32(3), 346-359

43) Jeon S., Hoshiar A. K., Kim K., Lee S., Kim E., Lee S., Kim J. -Y., Nelson B. J., Cha H. -J., Yi B., Choi H., (2018) "A Magnetically Controlled Soft Microrobot Steering a Guidewire in a Three-dimensional Phantom Vascular Network" Soft Robotics

44) Lee S. , Lee S., Kim S., Yoon C. -H., Park H. -J., Kim J. -Y., Choi H., (2018) "Fabrication and Characterization of a Magnetic Drilling Actuator for Navigation in a Three-dimensional Phantom Vascular Network" Scientific Reports, Vol. 8, No. 3691 (9pp)

02

미세수술 로봇 기술과 전망

서승범*·김천우**·김계리***·강성철****

* 공동 주저자, 한국과학기술연구원, keenhurt81@kist.re.kr
** 공동 주저자, 한국과학기술연구원, cwkim@kist.re.kr
*** 공저자, 한국과학기술연구원, jazzpian@kist.re.kr
**** 공저자, 한국과학기술연구원, kasch@kist.re.kr

Ⅰ 서론

1.1. 배경 및 필요성

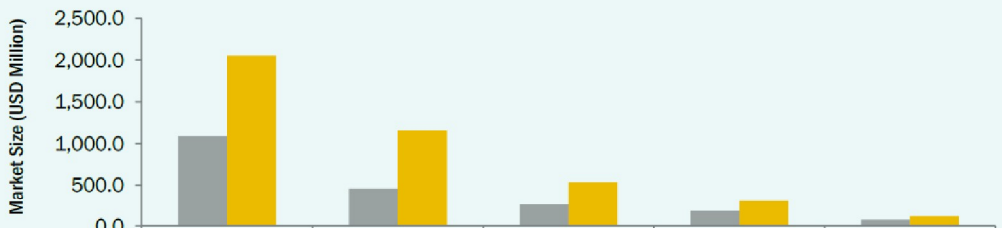
고령화 사회의 진입에 따라 고령인구 수가 증가하며 관련 인구의 삶의 질적 향상을 위한 기술 및 시장은 계속 증가하는 추세이다. 특히, 건강 유지, 치료 및 시·수술, 재활에 이르기까지 여러 분야에 산업 기술들이 접목되고 발전되고 있다. 그중 정밀한 수행이 요구되어지는 수술의 경우 로봇 기술이 적용된 수술 로봇은 기술 발전 뿐 아니라 시장 및 적용 영역도 넓어지고 깊어지는 추세이다.

1980년도 최초의 수술로봇이 등장한 이후로 많은 발전이 있었던 수술로봇은 현재 시술의 정확성은 높이고 수술 후 합병증은 감소시켜주며, 의료산업 패러다임이 로봇을 활용한 최소침습수술(MIS) 도입이 강조되는 방향으로 변하고 있다. 그 외에도 단일공 복강경 수술로봇, 자연 개구부 수술로봇, Mesoscale의 수술로봇 까지 다양한 수술 로봇의 개발이 진행되고 있다. 수술로봇 도입에 따른 임상 분야별 상세 수가 연구, 신개념의 수술로봇 기반의 임상진료 지침 마련 뿐 아니라 수술로봇 안전성 및 국제표준 대응, 다양한 신개념 수술로봇에 대한 안전성 및 성능 표준 제정 및 국제표준 개정에 대한 논의가 필요할 만큼 수술로봇 시스템은 수술에 있어서 더 이상 선택의 영역을 벗어나고 있는 수술의 독자적 분야라 할 수 있다.

수술 내비게이션, 수술 로봇, 센서 기술과 같은 각 분야의 원천기술의 개발진행도가 성숙됨에 따라 통합형 수술 시스템에 대한 관심도가 높아지고 있으며, 그 시장 규모 및 기술 발전의 속도도 상상을 초월할 만큼의 성장을 보이고 있다.

최근에는 신체 내 질병의 진단 및 치료 등 의료적인 목적으로 사용될 수 있는 미세수술 로봇(1mm~1μm 내외의 크기)으로써 세포, 약물, 열 치료(hyperthermia), 방사선 등을 원하는 국소부위에 전달하는 표적지향형 치료용 로봇, 신경보철 등을 포함한 생물-로봇 인터페이스, 조직재생용 지지체 구조물, 조직절개, 조직채취 및 물리적 개통 및 폐색을 위한 미세 기계도구, 센서 및 마커 등의 미세 무선 원격시스템 목적용으로 개발되는 분야도 개척되고 있다. 특히, 조직채취, 절개 등의 물리적인 도구로써의 미세수술 로봇개발, 약물 및 세포전달을 위한 구조설계와 가공, 생체적합성 및 생분해성을 높이는 재료 및 표면개선 등과 관련된 연구가 활발히 진행 중인 전도가 유망한 분야라 할 수 있다.

그림 1 수술 로봇 시장 규모



	Surgical Robotic Systems	Rehabilitation Robotic Systems	Hospital and Pharmacy Robotic Systems	Noninvasive Radiosurgery Robotic Systems	Other Robotic Systems
2018	1,087.7	459.8	266.0	181.0	77.9
2023	2,052.2	1,155.6	537.8	304.0	116.4
CAGR	13.5%	20.2%	10.9%	15.1%	8.4%

(출처: Medical Robots Market (Global Forecasts to 2023), Markets and Markets)

이렇듯, 수술로봇 분야는 적용되는 임상 분야, 기술적인 측면에서도 다양한 영역을 기반으로 두고 있으며, 수술로봇의 세부기술 별 개발은 로봇 메커니즘, 센서, 영상기반 지능화, 햅틱, 원격제어, 시뮬레이션 및 내비게이션, MR/CT 호환기술, 인체 삽입기술과 같은 여러 로봇 기술 분야에서 소형화, 지능화, 인지력강화, 고자유도, 환자 개인 특성 대응 맞춤형, 고정밀도로의 발전이 예상된다.

수술로봇의 시장 규모 또한 현재 1조원 대의 매출을 창출하는 회사가 생기는 등 주요 산업으로 발돋움하고 있는 등 거대 시장이 예상되고 있다. 특히 로봇시장에서 의료서비스 로봇 분야는 고부가가치 산업으로 특화되고 있는 품목이며, 다빈치 로봇의 Intuitive Surgical의 판매액은 2011년 17억 5,700만 달러를 기록하였으며 전체 시장의 82%를 점유하고 있고, 방사선 수술로봇 Cyberknife를 판매하는 Accuray가 10%, 정형외과 수술로봇 MAKOplasty를 판매하는 MAKO Surgical이 4%를 점유하는 등 정교한 로봇 기술을 확보한 기업들의 시장 점유가 점차 늘어날 것으로 예상되고 있다. 2015년 이후 다양한 차세대 수술로봇의 등장 및 로봇수술로의 완전한 수술패러다임의 변화로 세계시장 및 국내시장이 연평균 50% 이상 성장하는 등 2025년까지 급성장을 지속할 것으로 추정되고 있으며, WinterGreen Research는 수술로봇 장치의 2018년 시장규모를 85억 달러로 예측하고 있다.[1)]

본 리뷰에서는 현재의 수술 로봇 기술을 소개하고 그 동안 연구되었던 수술 로봇 기술의 최신 연구 동향 및 시장 현황을 살펴보고자 한다.

1.2. 수술 로봇의 개념, 역사, 분류

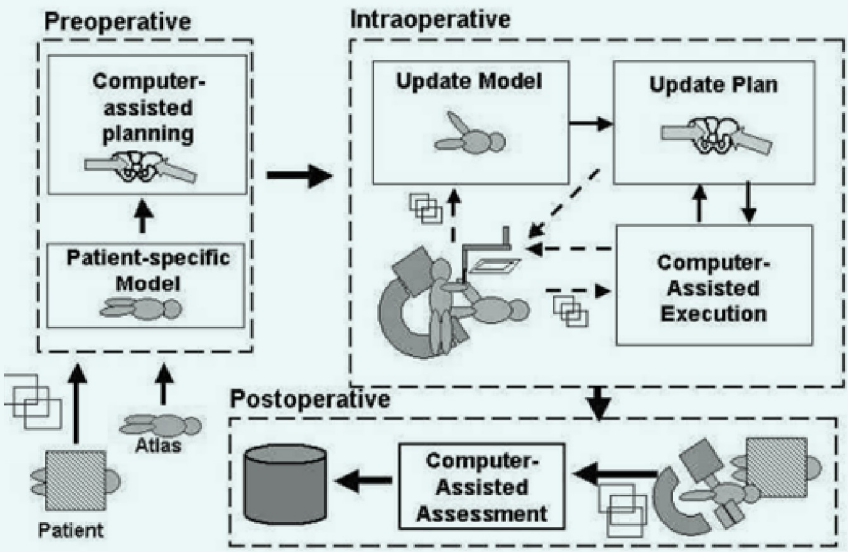
1) 수술 로봇의 개념

수술 로봇은 수술과정 중 일부 또는 전체를 ① 의사를 대신하여 자동으로 작업하거나, ② 의사가 조종하여 함께 작업하거나, ③ 의사를 햅틱이나 영상기술 등으로 보조하여 수술의 효율성, 효과성을 증대시키기 위한 로봇을 지칭한다.[2)]

수술 로봇 기술은 로봇과 IT 기술을 적용한 생산 과정의 혁신을 의료 현장(수술 과정)에서 재현하고자 하는 Computer Integrated Surgery(CIS)의 핵심 기술이다. 컴퓨터 응용 설계(CAD) 및 제작(CAM) 기술이 제품 기획, 설계, 생산, 품질 관리에 이르는 생산 전 과정의 효율성을 향상시킴으로써 제품의 품질을 향상시키고, 단가를 낮추었듯이, Computer Integrated Surgery에서는 로봇과 IT 기술을 통해 진단, 시술 계획, 수술, 회복 및 관찰에 이르는 전 과정을 계량화, 객관화 (Digital Surgery) 하여 수술 과정의 안전성, 효율성을 증가 시키고자 한다. 수술 로봇은 CIS에서 치료 계획 및 수행을 위해 필요한 환자의 모든 정보가 융합되는 플랫폼이자 계획된 수술을 최소침습적으로 정밀하게 수행하는 도구로서 CIS 환경의 중심 기기이다.

1) "Surgical Robot Market", WinterGreen Research, 2012
2) 의료로봇 분과 위원회, 2014

그림 2 Computer Integrated Surgery 환경[3)]



2) 수술 로봇의 역사

수술 로봇의 역사는 1980년대부터 시작된다. 이 시기는 1960년대에 처음 공장에 도입되기 시작한 산업용 로봇 기술이 어느 정도 성숙한 시기로, 이 시기에 이루어진 최초의 수술 로봇 연구들은 기존 산업용 로봇을 의료 현장에 활용하는 연구들이었다. 최초로 수술 현장에서 사용된 것으로 알려진 로봇은 1983년 University of British Columbia에서 개발된 Arthrobot[4)]이다. Arthrobot은 수술을 보조하는 로봇으로, 의사의 음성 명령에 따라 관절 수술 중 환자의 다리의 위치를 조정하거나, 수술 도구들을 집어서 전달해주는 역할을 수행하였다. 1985 년 Kwoh et. al.의 연구[5)]에서는 산업용 로봇인 PUMA 360을 CT 영상에서 확인된 뇌종양을 생검하기 위한 바늘의 위치를 잡는데 활용하였다.

3) R. H. Taylor and D. Stoianovici, "Medical robotics in computer-integrated surgery," in IEEE Transa -ctions on Robotics and Automation, vol. 19, no. 5, pp. 765-781, Oct. 2003.
4) http://www.brianday.ca/imagez/1051_28738.pdf
5) Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, et al. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1988;35:153-161

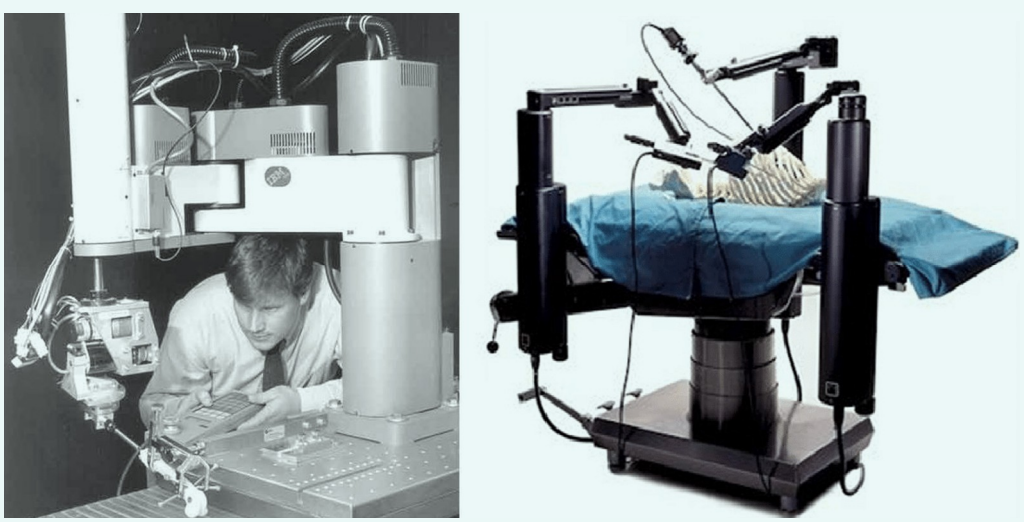
그림 3 (좌) 최초로 수술 현장에 사용된 로봇 Arthrobot (1983)
(우) 산업용 로봇 PUMA 360을 활용한 CT 영상 기반 뇌생검 (1985)

또한 1980년대에는 오늘날 수술 로봇의 기반이 되는 여러 가지 기술들이 의학/공학 분야에서 개발되었다. 의학 분야에서는 복강경 수술 기법이 개발되어 1987년 최초의 복강경 수술(담낭 절제)이 이루어졌다. 작은 구멍으로 도구와 카메라를 넣어 수행하는 복강경 수술의 여러 어려움(제한된 시야 및 수술 동작, 불편한 수술 자세)은 이를 해결할 수 있는 새로운 로봇 기술에 대한 수요를 만들어내었다. 한편 공학 분야에서는 우주 비행사나 전장의 군인들의 원격 수술을 위한 원격 조종 로봇 기술이, 미국 NASA와 DARPA를 중심으로 연구되기 시작하였다. 또한 산업용 로봇을 사용한 컴퓨터 응용 기계 가공(CAM) 기술을, 인체의 뼈를 깎는데 활용하는 기술에 대한 연구가 IBM Research에서 진행되었다.

1990년대에 들어서는 실제로 환자의 신체에 작업을 수행하는 로봇들이 등장하기 시작한다. IBM Research에서 개발된 기술을 바탕으로 1992년에는 Integrated Surgical System사에서 출시한 ROBODOC은 상용 수술 로봇으로는 최초로 신체에 직접 사용되는 로봇으로, 고관절 치환술에서 인공 관절을 삽입하기 위해 대퇴골을 절삭 가공하는 과정을 수술 전 CT영상을 바탕으로 수립한 계획에 따라 자동으로 수행하였다. 1994년 Computer Motion사에서 출시한 AESOP(Automated Endoscopic System for Optimal Positioning) 로봇은 미국 FDA 의 승인을 받은 최초의 수술 로봇으로, 복강경 수술 중 음성 명령에 따라 복강경 위치를 자동으로 조종해주는 로봇이었다. Computer Motion사는 한 걸을 더 나아가 1998년에는 AESOP 시스템과 원격 조종되는 2개의 팔을 추가로 장착한 ZEUS 수술 로봇을 개발한다. ZEUS 수

술 로봇은 대서양을 가로질러 뉴욕의 의사가 프랑스의 환자의 담낭을 절제하는 원격 수술 프로젝트 (Operation Lindbergh[6]) 에 사용됨으로써 수술 로봇 기술의 가능성을 보여 주었다. 그러나 상업적이 성공 측면에서 ROBODOC과 ZEUS 시스템 모두 한계에 부딪혔었다. ROBODOC 시스템의 경우 미국 FDA 승인을 받지 못하여 유럽/아시아 지역에만 판매가 가능하였고, ZEUS 시스템은 심장 수술에 주로 사용되었으나 그 수요가 크지 않았다.

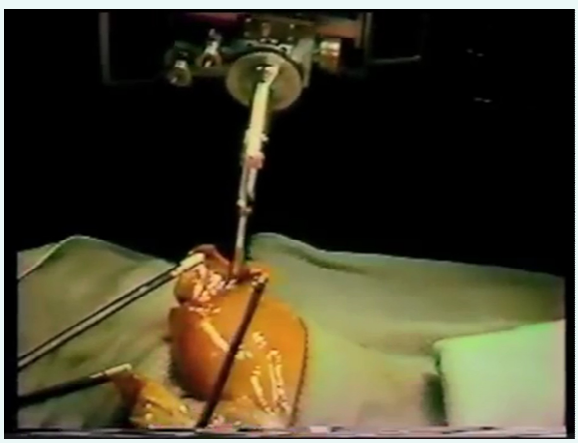
그림 4 (좌) ROBODOC 시스템 (우) ZEUS 수술 로봇 (Computer Motion사)

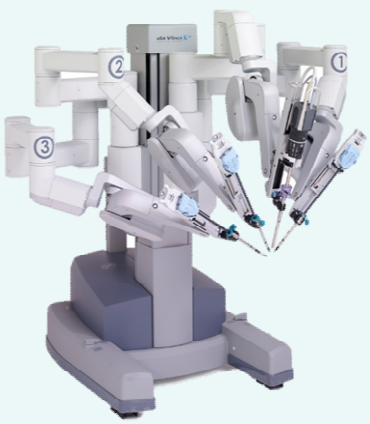


이러한 상황에서, 미국 Intuitive Surgical사는 DARPA의 위탁을 받은 SRI International사에서 개발한 원격 수술 로봇 기술을 바탕으로 2000년에 복강경 수술 로봇 daVinci를 출시한다. daVinci 수술 로봇은 전립선 제거 수술이라는 수요가 큰 시장에서 그 효능을 입증함으로써 상업적으로 큰 성공을 거두었고, 수술 로봇의 역사를 daVinci 이전과 이후로 나눌 수 있을 정도로 이 후 수술 로봇 연구에 큰 영향을 끼친다.

6) https://www.ircad.fr/wp-content/uploads/2014/06/lindbergh_presse_en.pdf

그림 5 (좌) daVinci 수술 로봇의 원형인 SRI International의 Green Telepresence 시스템, (우) Intuitive Surgical사의 daVinci 수술 로봇





daVinci 수술 로봇의 상업적인 성공 이후 전 세계적으로 수술 로봇 기술 개발에 많은 투자가 이루어지며 2000년대 이후로는 다양한 수술 분야에, 여러 수술 로봇 시스템들이 연구실 수준에서, 또 상업적인 수준에서 개발되어지고 있다.

3) 수술 로봇의 분류

수술 로봇은 그 역할에 따라 수술의 전 과정 혹은 일부를 의사 대신 또는 함께 작업하는 로봇(수술로봇), 의사의 수술을 보조하거나 영상가이드 역할 등을 담당하는 로봇(수술보조로봇)으로 분류할 수 있다.

표 1 수술로봇 분류 (출처: 의료로봇 분과 위원회, 2014)

분류		설명
수술 로봇	수술로봇	수술의 전 과정 또는 일부를 의사 대신 또는 함께 작업 하는 로봇
	수술보조 로봇	의사의 수술을 보조하거나 영상가이드 역할 등을 담당하는 로봇
수술시뮬레이터		가상 그래픽, 햅틱 장치 등을 활용한 수술연습로봇

오늘날 많은 수술 로봇들이 개발되어, 다양한 응용 분야에 사용되고 있지만, 수술 로봇이 가장 많이 활용되는 대표적인 분야는 1) 복강경 수술, 2) 정형외과 수술, 3) 뇌, 혈관 등에 영상 기반 중재술이다.

표 2 수술로봇 활용 및 기술에 따른 분류. (출처: 생명공학정책연구센터, 2015)

수술	수술로봇	연조직	복강경	Multi-Port
				Single-port
				NOTES[7]
			뇌, 혈관 중재술	Image-guided Intervention
		경조직	정형외과	인공관절
	내비게이션, 수술 시뮬레이터, 첨단수술실			

4) 미세 수술 로봇

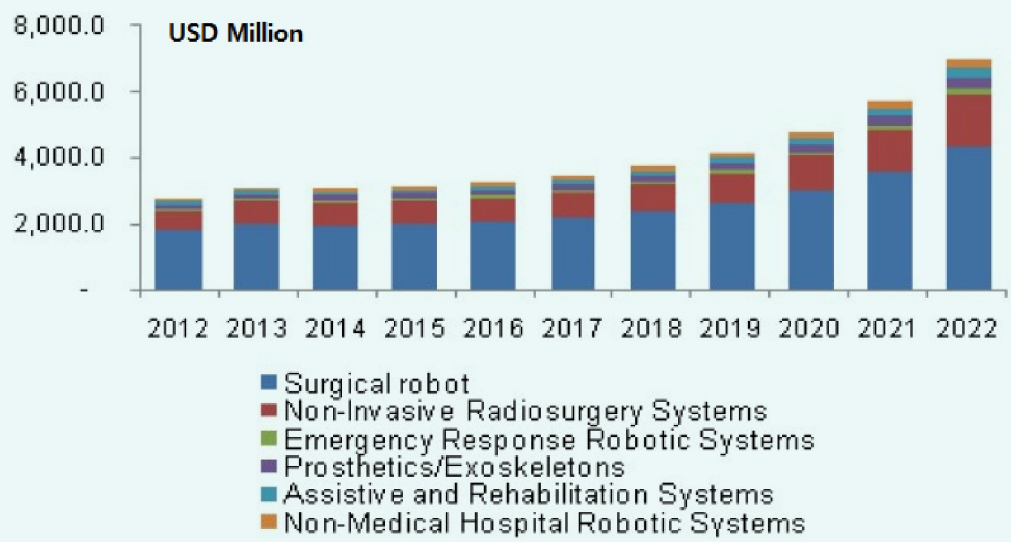
현미경을 필요로 하는 수술을 일반적인 용어로 미세수술이라 명명하는데, 특히 신체 기관 및 조직의 일부를 다른 부분으로 옮기거나 절단된 조직을 다시 부착 할 수 있게 해주는 작은 혈관과 신경(일반적으로 직경 1mm)의 문합을 가능하도록 개발된 수술 방식이다. 일반적으로 미세 수술 기술은 일반 외과, 안과, 정형외과 수술, 산부인과, 이비인후과, 신경외과, 구강 악안면 수술, 성형외과, 족뇨 수술 및 소아 외과 수술과 같은 여러 분야의 전문 기술로 활용되고 있다. 정교한 작업이 필요한 신경 및 혈관을 다루는 시술이기 때문에 로봇기술의 적용으로 발전 가능성이 매우 큰 분야이기도 하다. 이러한 이점을 이용하여 현재 로봇 기술이 접목되어 망막, 내이, 뇌, 척수, 신경계, 혈관계, 심장, 비뇨기 관련 수술에 관한 기술이 개발되고 있다. 이러한 미세수술은 고도의 정확성과 손재주를 요구하며, 기존의 수술 방법으로는 일정 이상의 정확도를 보장하기 어렵기 때문에 로봇을 이용한 원격 미세수술 시스템을 이용하여 미세수술을 수행하는 의사의 손의 움직임을 줄이고, 떨림을 보정하며, 수술 도구에 부과되는 힘을 조정함으로서 수술 정밀도를 향상시키고 인간 공학적이며 안전한 미세수술이 가능하게 하는 시스템을 제공한다.

7) *NOTES : Natural-orifice transluminal endoscopic surgery (자연개구 내시경 수술)

II 수술 로봇 시장 및 기술 현황

현재의 의료로봇 시장은 연간 15%씩 고도성장하여 2020년경 114억 달러 규모가 될 것이며, 수술로봇 시장이 전체 로봇시장의 60%에 달할 것으로 전망하고 있으며[8], 그림 6에서와 같이 북미 수술로봇 시장은 2022년에 약 70억 달러 규모, 전 세계 수술로봇 시장은 2024년에 208억 달러 규모로 고도성장할 것으로 예상되고 있다.

그림 6 의료 로봇 시장 전망



(출처: Grand view research, 'U.S. medical robotic system market, 2015')

8) 식약처 신개념 의료기기 보고서 2017년 2월

현재 daVinci 수술로봇(Intuitive Surgical사)의 성공이후 수술로봇시장에서 독점적 구조를 유지하여 왔으나, 최근 기존의 의료기기 업체와 신생업체들의 시장 진입이 증가하고 있다. 수술로봇 시장에서 로봇 시스템은 약 42%의 수익을 창출했으며, 로봇 시스템의 개선버전 재판매 및 관련 액세서리, 소모품의 판매로 지속적인 성장세를 보이고 있다. 또한, 서비스 및 유지보수 분야는 기존 로봇 시스템의 주기적인 안전 및 유지관리가 필수적임에 따라, 앞으로 수술로봇 시장의 20%를 차지할 것으로 예상된다. 국내 수술로봇 시장의 경우 연평균 45.1%로 대폭 증가하고 있으며, 2018년에는 시장규모가 566억 원 가량 될 것으로 예상되지만, 현재 국내 수술로봇 시장은 daVinci 수술로봇의 독점적인 시장 점유 상황이기 때문에 일부 국산화하는 전략(fast follower)보다 고도화된 기술개발로 daVinci가 진입하지 못하는 틈새분야를 공략하는 전략(first mover)이 필요할 것으로 판단되고 있다. 하나의 예시로서, 현재 daVinci 수술로봇은 매우 고가여서 대형병원 위주로 사용이 되고 있으나, 중소형 병원에서 사용할 수 있는 저가형이면서 간단한 수술로봇 시스템을 개발한다면, 보다 대중적인 수술로봇시장이 열릴 것으로 판단된다.

또한, 미세의료로봇의 경우 정책적으로 로봇, 의료기기 등의 기술 분야에서 제시되고 있으나, 국내 의료기기시장의 경우 국내 기업들은 기술력, 자본력, 인지도 등에서 매우 열세로 국내 수요의 62%를 수입에 의존하고 있으며, 특히 MRI, CT 등 고가장비는 95%가 수입에 의존하고 있다. 의료기기 수출 규모는 2010년 10억 달러 수출로 세계 20위권 밖의 수출국이며(일본 세계 9위 수준), 수출품목도 초음파 영상진단기, 치과용 임플란트, 온열기, 안경렌즈 등 범용제품이 주류를 이루고 있다. 국내 미세의료로봇 관련 제품은 주로 스텐트(stent), 카테터(catheter), 진단용 센서 등이 개발되고 있으나 초음파진단기 등 널리 상용화 된 의료기기에 비해 수요 및 연구개발이 매우 미비한 수준이다. 시장의 측면에서는 미세의료로봇 분야는 단일 시장이 형성되지 않은 상태이고, 현재까지 심장질환 및 안과 질환 치료를 위한 미세로봇 시스템이 임상시험을 진행하는 단계이나, 미세 의료로봇 분야에서 daVinci 수술로봇과 같은 절대 강자는 없는 상황이다. 미세의료로봇과 관련한 국내외 기업, 연구기관 대부분의 기술력이 기초기술 개발단계이며 기술 격차가 크기 않기 때문에, 암, 뇌질환, 심장질환 등의 주요 질병 치료를 위한 미세의료로봇의 원천기술 개발 및 시스템 통합 연구를 통해 세계적으로 미세의료로봇 시장을 주도할 수 있을 것으로 판단되고 있다.

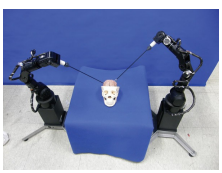
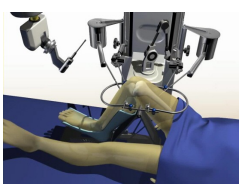
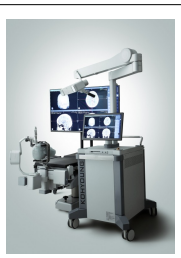
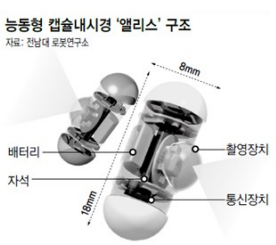
2.1. 국내 수술 로봇 기술 및 시장 동향

국내 의료로봇 시장 또한 괄목할만한 성장을 보였으나 중소기업이 대부분인 구조적인 한계와 장기적 대규모 연구개발 투자 미진으로 인해 전체 시장 규모는 축소하고 있으며 수출이 5% 미만을 차지하고 있는 실정이다.[9] 이에 정부는 차세대 의료기반 구축을 위하여 의료용 로봇 등에 대한 원천기술개발 지원 사업 및 수술로봇 연구 기획을 통해 사업 확산 및 기술 개발에 많은 노력을 기울였다.

그 결과로 국내 기업의 기술을 이용한 daVinci 수술시스템과 유사한 복강경 수술로봇 시스템을 개발하였고, 인공관절치환수술과 같은 시술에 로봇 기술을 접목하여 국산화를 이루었다.(표 3 참조) 하지만, 국내 의료로봇 개발 업체들은 상용화를 위하여 요구되는 기술 안전성 및 신뢰성 문제로 외국 기술도입에 많은 부분을 의존하고 있는 단계이며, 최소 침습로봇은 임상 표준절차로 정착되는 단계이며, 중재시술 및 새로운 수술로봇 분야 개발을 진행 중이다. 이 밖의 흉·복부 수술 분야의 성공적 임상 실용화 기반으로 두경부 수술, 혈관/신경 수술, 안과 수술 등 다양한 신규 분야에서의 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 제품화 부문에서는 심장혈관 중재시술 로봇, 인공관절치환 수술 로봇 등이 우수한 임상 결과로 신규 시장을 개척하고 있으며, 생검 및 고주파 절제술 등 영상중재시술 로봇도 제품화 초기 단계에 진입했다. 뇌수술, 미세 수술, 영상유도 수술 및 시술 등 향상된 정밀도 및 신뢰도와 환자 영상 맞춤 융합을 위한 신기술 개발은 아직 미개척 분야이며 활발한 연구 개발이 동반되어야 성공적인 상업-제품화가 실현 될 것으로 전망된다.

9) 한국로봇산업진흥원, 2013

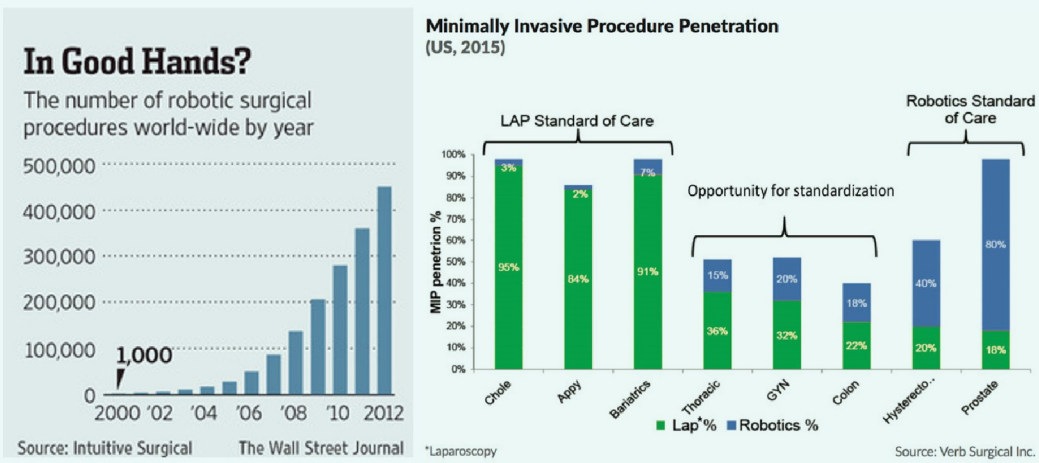
표 3 국내 수술로봇 기업 기술 개발 현황

업체명	사진	사업영역 및 주요 내용
큐렉소		• CT영상을 이용한 3차원 수술 프로그래밍을 수행하는 Orthodoc workstation 및 프로그램된 수술을 자동 수행하는 ROBODOC • 세계적으로 8,000회 이상의 수술을 성공적으로 수행하였으며, 미국 FDA의 승인 획득 • 미국에서 개발되었고, 큐렉소(국내 자본)에 인수, 합병
NT 리서치		• '08년 말 레지던트 닥터 역할을 하는 수술보조용 로봇을 개발하여 현재 식품의약품안전처에 승인을 신청해 놓은 단계
미래컴퍼니		• 국제 공동연구를 통하여 보급형 복강경 수술로봇 개발 중 • 상용화를 목표로 인증, 허가 단계 진행 중
현대중공업		• 골절접합 로봇 상용화 계획 • 현대중공업 로봇 암(arm)을 적용한 큐렉소 '로보닥', FDA 승인 대기 중
고영 테크놀로지		• 이비인후과 및 신경외과 수술로봇 개발 중
Intromedic		• 세계 2번째로 소화기관 진단용 미니로봇 출시 • 국내 및 약 65개국에 현재 수출 • 미니로봇 외에 1회용 내시경 출시 • 소화기관 진단용 미니로봇과 1회용 내시경 모두 2011년 말까지 FDA 확보 예정

2.2. 국외 수술 로봇 기술 및 시장 동향

2000년대 Intuitive Surgical사의 daVinci 수술 로봇의 성공(그림 1) 이후 수술 로봇에 대한 많은 투자와 연구가 이루어졌다. 그 결과 2010년대에 여러 상용화된 수술 로봇 시스템들이 등장하고 있다. daVinci 수술 로봇의 독보적인 지위에 도전하는 새로운 복강경 수술 로봇 시스템들이 출시되고 있으며, 카테터를 사용한 중재술과 정형외과 분야에도 상용화에 성공한 수술 로봇들이 등장하고 있다. 한편 그동안 벤처 기업 위주였던 수술 로봇 시장에 Medtronic, Stryker, Johnson and Johnson 같은 대형 의료기기 회사들이 진출하고 있다. 특히 Johnson and Johnson은 Google과의 합작 회사인 Verb Surgical을 설립하여 Google의 앞선 정보 처리 기술을 바탕으로 한 information-guided digital surgery(Surgery 4.0)라는 미래 수술 로봇의 청사진을 제시하며 곧 시장에 새로운 수술 로봇을 출시할 계획이다.

그림 7 (좌) 전 세계 1년간 로봇 수술 건수, (우) 복강경 수술 중 로봇화 된 수술의 비율



1) 복강경 수술 로봇 기술 및 시장 동향

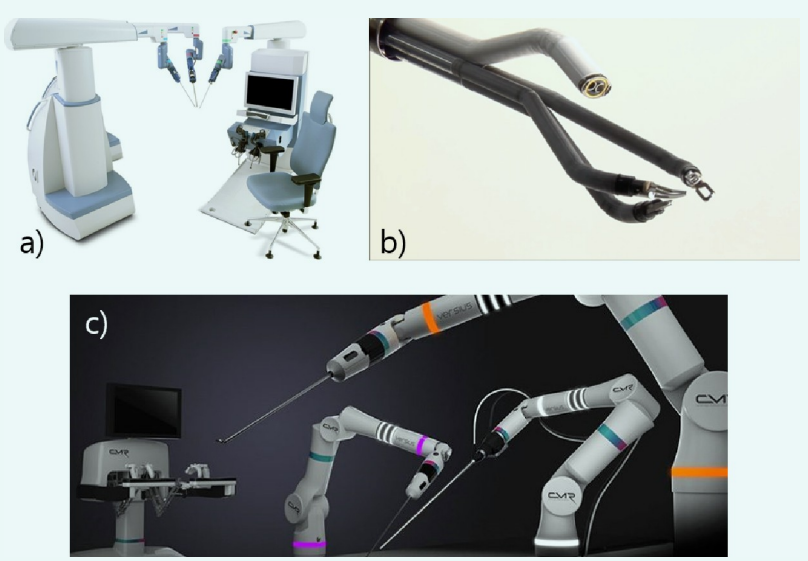
최근 복강경 수술 로봇 시장에서는 그동안 Intuitive Surgical사의 daVinci 수술 로봇이 독점해 오던 시장에 미국 TransEnterix사의 Senhance나 영국 Cambridge Medical Robotics사의 Versius와 같은

새로운 수술 로봇이 도전장을 내밀고 있다. 특히 Senhance 수술 로봇은 2017년, 복강경 수술 로봇으로는 daVinci 이후 처음으로 미국 FDA 승인을 받아 판매를 시작하였다.

기술적인 측면에서 복강경 수술 로봇은 기존 복강경 수술 보다 더 최소 침습적인 단일공 수술(Single-port surgery)과 미세 복강경(micro-laparoscopy) 수술을 가능하게 하는 방향으로 진화하고 있다. daVinci 수술 로봇을 사용한 로봇 복강경 수술에서는 환자의 복부에 직경 8mm 도구와 카메라가 지나갈 수 있는 통로를 3-4개 뚫게 된다. 반면, 단일공 수술에서는 환자의 배꼽에 직경 20mm의 구멍 하나를 뚫고, 그 구멍을 통해 모든 카메라와 도구를 집어넣음으로써, 상처를 최소화한다. 미세 복강경 수술의 경우 구멍의 위치와 수는 기존과 같으나, 보다 가느다란 도구를 사용하여 구멍의 크기를 줄임으로써, 이전 보다 더 최소 침습적인 복강경 수술이 가능하다.

이러한 기술의 발전에 맞추어 Intuitive Surgical사에서는 단일공 수술을 위해 개발된 새로운 daVinc-SP를 출시하였으며, Senhance, Versius 로봇은 미세 복강경 수술을 위한 직경 3mm, 5mm 도구가 장착이 가능하도록 개발되었다.

그림 8 최근 새로 출시된 복강경 수술 로봇 a) Transentrix사의 Senhance, b) Intuitive Surgical사의 daVinci-SP, c) Cambridge Medical Robotics의 Versius



한편, 미세 복강경 수술보다 더 최소 침습적인 수술 방법으로 입, 소화관, 항문과 같은 인체의 자연 개구부(Natural Orifice)를 통해 복부 장기에 대한 수술을 수행하는 자연개구부수술(Natrual Orifice Transluminal Endoscopic Surgery, NOTES)의 경우, 연구가 활발히 진행되고는 있지만, 현재까지 시장에 상용화된 제품은 없는 상황이다. 현재 미국 Medrobotics사에서 출시한 Flex 로봇이 NOTES처럼 구강으로 진입이 가능하도록 되어있지만 깊이 들어가지는 못하며, 식도, 기관지 부위까지로 수술 범위가 한정되어 있다.

그림 9 경구강 수술을 수행할 수 있는 Medrobotics사의 Flex 로봇

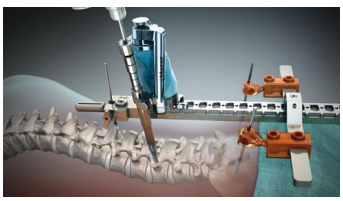
2) 정형외과 수술 로봇 기술 및 시장 동향

정형외과 수술에서 수술 로봇은 수술 전 X-ray나 CT영상을 바탕으로 얻어진 환자의 3차원 뼈 모형을 바탕으로 인공 관절을 끼우기 위해 잘라낼 뼈의 모양이나 나사못을 박기 위한 경로를 설계하고, 실제 수술 중에 설계한대로 정확하게 뼈를 자르고 나사를 박는 과정을 자동/반자동으로 수행한다. 이러한 정형외과 수술 과정은, 컴퓨터로 설계된 3차원 모형을 바탕으로 재료를 절삭 가공하는 산업용 로봇 기술을 큰 변화 없이 그대로 적용할 수 있는 분야였기 때문에 정형외과 수술 로봇은 90년대의 ROBODOC 수술 로봇으로부터 시작되는 오랜 역사를 가진 수술 로봇 분야이다.

그림 10 정형외과 수술 로봇 Mazor X를 사용한 척추 나사 삽입 경로 설계 (좌) 와 설계한 경로에 따른 나사 삽입 경로 안내 (우)

그러나 시장 측면에서는, ROBODOC이 초기에 미국 FDA 승인을 받지 못하여 시장 진출에 어려움을 겪으며 복강경 수술 로봇 시장에 비해 빨리 성장하지는 못하였다. 그렇지만 2010년대에 들어서면서 ROBODOC 뿐만 아니라 다른 많은 정형외과용 수술 로봇들이 고관절 치환술, 슬관절 치환술, 척추 나사 삽입 등의 분야에서 FDA 인허가를 획득하며 시장이 커지고 있다. 특히 최근 1-2년 사이에는 대형 의료기기 업체인 Medtronic, Stryker, Zimmer Biomet사가 각각 Mazor Robotics, Mako Surgical, Medtech사를 인수하면서 경쟁이 치열해지고 있다. 주요 회사 및 수술 로봇은 아래 표와 같다.

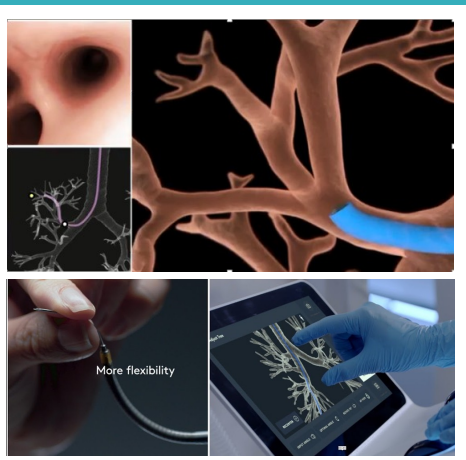
표 4 정형외과 수술 로봇 기술 및 시장

제품명(기업, 국가)	제품 개요	주요 기능(특징)
MAKO (Stryker, 미국)	슬개대퇴부 관절형성뿐만 아니라 중앙 및 측면의 치환용 무릎의 이식에 사용	• 다른 정형외과 시스템과 달리 뼈를 제자리에 고정시킬 필요가 없음, 대신 디지털 추적 시스템을 통한 끊임없는 모니터링으로 환자의 해부학적 구조를 갱신하고 임플란트 위치 및 배치 최적화 • 밀링 과정 중 미리 계획한 절단 범위를 벗어나면 수술의의 손을 다시 밀어냄으로써 수술의 정확성 확보
 Renaissance (Mazor Robotics/Medtronic, 이스라엘/미국)	기형 교정, 생체검사, 최소 침습 수술 및 전극 배치 절차 등을 비롯한 다양한 시술	• 수술 중간에 이식위치를 확인할 수 있도록 3D 영상을 제공하는 기존의 형광투시 C-arm을 장착할 수 있는 기능 장착 • 여러 연구 결과를 통해 이식의 정확도가 개선되는 것을 확인할 수 있으며 Renaissance/SpineAssist를 통해 보다 많은 이식물 경피 삽입 가능
TSolution One (Think Surgical, 미국)	고관절치환술에서 관절형성	• Curexo의 미국 자회사, Curexo가 인수한 ROBODOC의 업그레이드 버전 • 수술 계획에 따라 다리뼈에서 인공 관절을 삽입할 구멍을 자동으로 깎아낸다
ROSA (Medtech/Zimmer Biomet, 프랑스/미국)	뇌 / 척추 바늘 및 나사 삽입 안내	• 로봇 팔과 환자를 동시에 CT 영상 촬영한 후 계획된 경로에 따라 바늘/나사 삽입 경로를 안내함. 영상 촬영 후 호흡에 따른 환자의 움직임을 광학 마커로 추적하여 보상

3) 중재시술용 로봇 기술 및 시장 동향

X-ray, 초음파, 내시경 등의 영상으로 신체 내부를 관찰하며 카테터나 바늘을 체내에 삽입하여 치료를 하는 중재시술에서는 굴곡진 신체 내부 경로를 따라 카테터를 능숙하게 조향하고, 카테터를 조종하는 의사의 X-ray 노출을 감소시키기 위해 원격 조종되는 로봇 카테터 시스템이 개발되고 있다. 복강경 및 정형외과 분야에 비해 아직 상용화된 로봇의 보급이 많이 이루어지지 않은 분야이지만 Intuitive Surgical사와, Intuitive Surgical의 창업자 Fred Moll 이 새로 만든 Auris사가 각자 폐 생검용으로 제품을 내놓으면서 앞으로의 성장세가 기대되는 분야이다. 최근 시장에 출시된 주요 중재시술 로봇 시스템은 아래 표와 같다.

표 5 중재시술용 로봇 기술 및 시장

제품명(기업, 국가)	제품 개요	주요 기능(특징)
Monarch (Auris, 미국)	폐 생검용	 조향 가능한 카테터와 그 끝에 달린 카메라 영상을 바탕으로 기관지를 통과하여 CT 영상상에서 종양으로 의심되는 부위까지 카테터를 진입시켜 조직 채취. 2018 년 FDA 승인
Ion (Intuitive Surgical, 미국)		
CorPath (Corindus, 미국)	관상동맥 중재술	

4) 미세수술 로봇 기술 및 시장 동향

현미경을 사용하는 미세수술의 대표적인 예로는 안과에서 수행하는 각종 안과 수술, 미세한 혈관과 신경을 이어 붙여야 하는 각종 봉합 수술, 귓구멍을 통한 중이(中耳) 내부의 수술, 콧구멍을 통한 뇌기저부 수술 등이 있다. 기술적인 측면에서, 인간의 한계를 뛰어 넘는 정밀함을 요구하는 이러한 수술들은 로봇의 도움이 필요한 분야이지만 시장 측면에서는 규모가 로봇의 개발을 촉진할 만큼 크지 않아서, 그동안 대부분의 미세수술 로봇 개발은 연구 수준에서 그쳤다. 최근 안과 수술과 봉합 수술 분야에서는 상용화된 수술 로봇이 등장하였다. 눈 수술에서는 네덜란드의 Preceyes사에서 기존 눈 수술용 도구를 손대신 로봇으로 잡고 정밀하고 손 떨림 없이 원격 조종할 수 있게 해주는 안과 수술 보조 로봇 시스템을 개발하였고 이탈리아의 MMI Micro사에서는 재건 수술에서 혈관 신경 등의 봉합을 위해 직경 3mm의 초소형 손목이 달린 수술 로봇을 개발하였다.

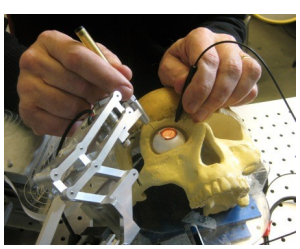
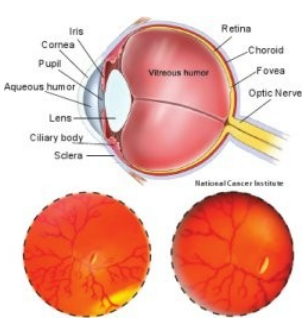
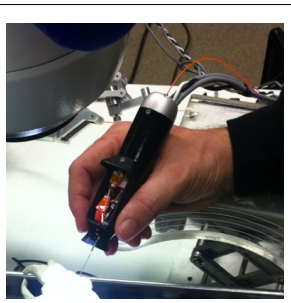
그림 11 (좌) 안과 수술 도구를 원격 조종하는 Preceyes 수술 로봇
(우) 재건 수술용으로 개발된 MMI Micro사의 초소형 로봇 수술 도구

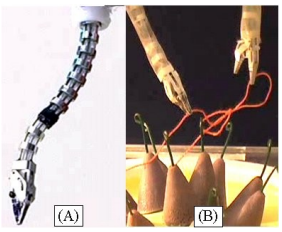
이와 같이 현재는 이미 상업적으로 이용 가능한 제품에서부터, 임상 실습 중인 시스템에 이르기까지 많은 연구가 진행 중에 있다. 이중 대표적인 기술 개발 사례에 대해 적용 분야별로 소개하고자 한다.

가) 안과 수술 및 이비인후과 수술

안과 및 이비인후과 수술은 매우 복잡하고 정밀한 조작을 필요로 한다. 한 예로, 유리체 망막 수술에서 적용되는 힘은 사람이 지각할 수 있는 힘의 한계 값보다 낮음으로 사람이 직접 망막 미세 수술을 진행할 때는 수술 현미경의 시각적 피드백에 거의 전적으로 의존하기 때문에 절차가 굉장히 어렵다는 단점이 존재한다. 이러한 한계를 극복하고 수술 정확도를 향상시키기 위해 여러 로봇 시스템이 개발되고 있다.

표 6 미세 수술 로봇 기술 및 시장

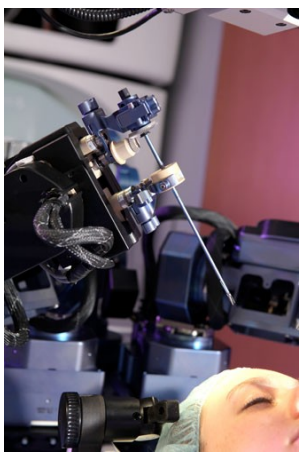
기관명	사진	개발 내용
Johns Hopkins University		Steady Hand: 망막 수술에서 집도의의 손 떨림을 방지하며 수술 정확성을 높이는 시스템 개발
ETH Zurich		IRIS Microrobot: 안구 내 수술을 위해 개발된 무선의 마이크로 로봇 장치 개발
Carnegie Mellon University		Micron: 손 떨림을 보정하여 향상된 시술 정확도를 제공해주는 미세수술용 툴 개발

기관명	사진	개발 내용
University of Birmingham		Surgical robot for cochleostomy: 외과 용 스마트 로봇 드릴링 시스템을 비외상성 인공 와우 절개를 위해 개발
Columbia University		Snake-like eye surgery robot: 고정밀 조작을 위해 개발된 미세수술 로봇 시스템은 목구멍과 방부 기도를 통해 인체에 삽입 후 원격 조작이 가능하며, 후두 봉합등 고정밀 시술을 수행하기 위해 개발

나) 신경외과

신경외과 수술은 영상 유도 기술이 최초로 사용된 분야이다. 영상유도기술은 환자의 두개골에 부착된 마커를 이용하여 수술 기구의 정확한 위치를 파악하는데, 수술 중에 환자 뇌 형상의 변화가 일어나면서 수술 도구의 위치 정확도가 떨어진다는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 이미징(imaging) 기법과 공간 제약 조건과 호환되는 로봇수술이 필요하다. 특히, 신경외과에서의 수술도구 조작은 사람의 뇌 안에 원하는 지점에 수술도구를 정렬, 방향 지정 및 조작하는 방법으로 나누어진다. 로봇을 이용한 신경외과 수술의 이점은 로봇 시스템의 위치정확도와 원격 수술이 가능하다는 점으로 알려져 있다.

표 7 신경외과 수술 로봇 기술 및 시장

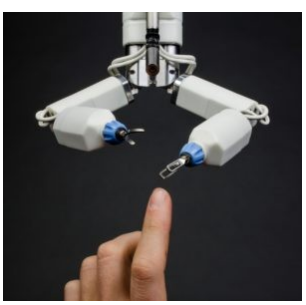
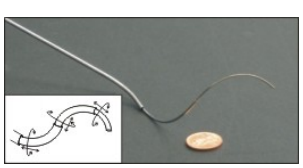
기관명	사진	개발 내용
Accuray Inc		CyberKnife: 비침습적 로봇 시스템으로서 방사선 수술을 위하여 개발되었으며, 제한적인 대상의 움직임을 보상할 수 있음
Prosurgics		Pathfinder: 수술의는 수술 전에 의료영상을 통해 대상과 궤도를 파악할 수 있으며 로봇의 안내에 따란 수술도구를 원하는 위치(근접 1mm이하)까지 정확하게 접근할 수 있음
University of Calgary		Neuroarm: MRI 영상 기반의 미세수술 로봇 시스템을 개발하여 1.5Tesla의 MRI 영상 시스템과 같이 구동할 수 있는 시스템
Renishaw		NeuroMate: 생체검사와 더불어 뇌심부 자극술, 정위뇌파기록술, 경두개 자기자극, 방사선 외과 및 뇌 내시경에 사용

기관명	사진	개발 내용
Mazor Robotics		Renaissance: 수술 중간에 이식위치를 확인할 수 있도록 3D 영상을 제공하는 기존의 형광투시 C-arm을 장착할 수 있는 기능도 있음. 여러 연구 결과를 통해 이식의 정확도가 개선되는 것을 확인 할 수 있으며 Renaissance/SpineAssist를 통해 보다 많은 이식물 경피 삽입 가능

다) 위장 관련

Gastrointestinal tract surgery(위장관 수술)는 위장과 내장을 따라 시행된다. 로봇 시스템을 접목한 수술에 관한 연구는 최근 미세로봇 기술의 발전으로 인해 더욱 두드러지고 있다. 접목되는 로봇 및 컴퓨터 보조 시스템의 대부분은 이미징 및 내시경 검사를 대상으로 하지만 수술을 위한 시스템도 활발히 연구가 진행 중에 있다. 대부분의 유연 내시경을 이용한 인체 삽입과정에서 장이 접히는 폴딩 포인트를 통과하면서 내시경의 강성에 의해 장벽을 미는 경우 환자에게 불편함과 고통을 야기하게 된다. 소장의 경우는 기존의 방법을 이용하여서는 도달 할 수 없게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 미세수술로봇 시스템을 소개한다.

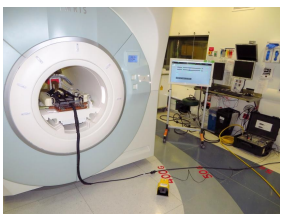
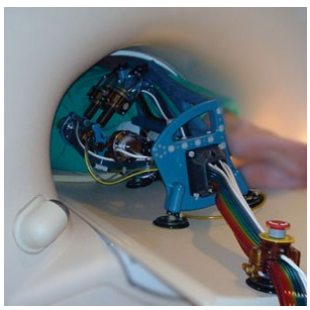
표 8 위장관련 수술 로봇 기술 및 시장

기관명	사진	개발 내용
Given Imaging		PillCam: 직경 10mm, 길이 27mm의 알약의 형태로 작은 카메라와 송수신 장치가 내장되어 있어 입을 통해 삼키면 소화기관의 이미지를 무선으로 전송해주는 시스템을 개발
University of Nebraska		Robotic NOTES device: 로봇은 식도를 통해 삽입되며 오버 튜브와 내시경을 사용하여 복강 내로 진입 완전 삽입 후에 로봇은 임의의 방향에서의 시각화 및 조작을 위한 안정된 플랫폼을 제공
Vanderbilt University		Concentric Tube Robot: pre-curved된 신축성 있는 튜브로 구성되어 있는 시스템으로 내시경의 움직임에 자유로운 굴곡을 가능하게 하는 로봇 시스템을 목표로 개발

라) 비뇨기 관련

비뇨기과 수술의 경우는 로봇을 이용한 수술 시스템이 수술과정에 상당한 영향을 끼치는 영역이다. 사실, 비뇨기과는 합병증을 줄이고 치료의 정확성을 향상시키는데 도움이 되는 복강경 검사 및 MIS와 같은 기술이 적용된 첫 분야였다. 그러나 MIS와 관련된 촉각 감지뿐만 아니라 동작의 정밀함과 수술시의 시야에 대한 제약 때문에 개방 수술과 비교하여 로봇 시스템을 이용한 시술에 더 큰 어려움이 있을 수 있다. 이러한 단점을 해결하기 위한 여러 의료용 로봇 응용 프로그램의 개발이 촉진되었다. 로봇 시스템을 이용한 비뇨기 관련 수술 시스템에 대해 소개한다.

표 9 비뇨기 관련 수술 로봇 기술 및 시장

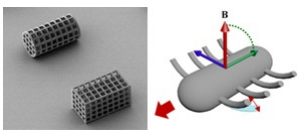
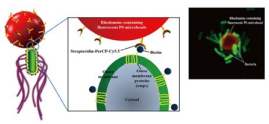
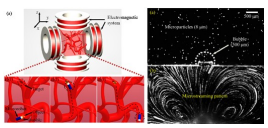
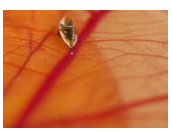
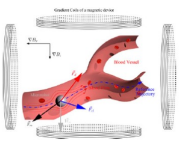
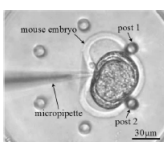
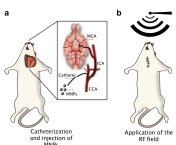
기관명	사진	개발 내용
Engineering Services Inc		MRI guided prostate robot: MRI 스캐너 내부에서 작동 할 수 있는 새로운 로봇 시스템은 현재 실시간 MRI와 함께 로봇을 운용하며, 전립선 암 생검을 빠르고, 정확하며, 적은 비용으로 가능하게 해줌
Hansen Medical		Sensei X: IntelliSense의 힘 감지기능을 통해 도뇨관 조정이 가능하며 도뇨관의 근위단에서 힘을 측정하는 방식으로 접촉력을 지속적으로 추정할 수 있음
Stereotaxis		Niobe: 테이블의 측면에 위치한 하우징 내에 들어있는 두 개의 영구자석이 자기장을 만들어 시스템을 가능하게 함
Imperial College London		Magic angle MRI robot: 기존의 로봇 시스템과는 달리 MRI 내부에 케이블, 센서 및 모터가 없으므로 본질적으로 MRI와 함께 사용이 가능함. 서브 픽셀정도의 정확성을 가진 마커를 사용하여 MRI 스캐너를 통해 실시간으로 직접 추적이 가능
Johns Hopkins University		MrBot for prostate: 전립선 생검이나 방사선 Seed 주입을 위해 고안된 로봇 시스템이며 MRI를 사용 전립선의 바늘 접근은 초음파 유도 하에 수행 초음파는 일반적으로 이용되는 이미징 방법이며 경제적이기 때문에 사용용이

5) 미세 의료로봇기술의 연구 동향

미세 수술과는 다른 영역으로 세밀한 작업을 요하지만 수술의 분야가 아닌 시술 또는 약물 전달과 같은 영역의 연구도 활발히 이루어지고 있다. 이렇듯 미세 의료로봇은 의료로봇 분야에서 새롭게 대두되고 있는 신체 내 질병의 진단 및 치료 등 의료적인 목적으로 사용될 수 있는 미세로봇(1mm ~ 1μm 내외의 크기)으로써 세포, 약물, 열 치료(hyperthermia), 방사선 등을 원하는 국소부위에 전달하는 표적지향형 치료용 로봇, 신경보철 등을 포함한 생물-로봇 인터페이스, 조직재생용 지지체 구조물, 조직절개, 조직채취 및 물리적 개통 및 폐색을 위한 미세 기계도구, 센서 및 마커 등의 미세 무선 원격시스템 등으로 분류될 수 있다. 조직채취, 절개 등의 물리적인 도구로써의 마이크로로봇 개발, 약물 및 세포전달을 위한 구조설계와 가공, 생체적합성 및 생분해성을 높이는 재료 및 표면개선 등과 관련된 연구가 진행 중이다.

국내외적으로 실제적인 치료를 위해 임상적용을 목표로 연구를 진행 중이며 최근에는 나노구조를 가지거나 유연한 재료 및 생체 재료를 이용한 마이크로로봇 개발 등 차세대 마이크로로봇의 개발을 진행하고 있다. 국내 일부 연구팀에서 특정 분야의 마이크로로봇에 있어서는 세계적 수준의 기술 경쟁력과 상용화 가능성을 보여주고 있으며, 세계최초로 3차원 다공성 세포 및 약물 전달체 마이크로로봇을 개발하였고, 심장혈관 폐색병변 개통 및 약물전달을 통한 심장혈관 치료용 마이크로로봇 개발을 진행 중에 있다. 이 밖의 미세 의료로봇기술의 연구 동향을 표를 통해 소개한다.

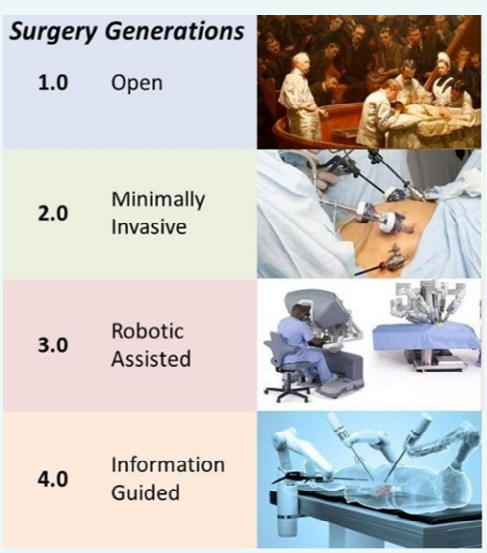
표 10 미세 의료로봇 기술 및 시장

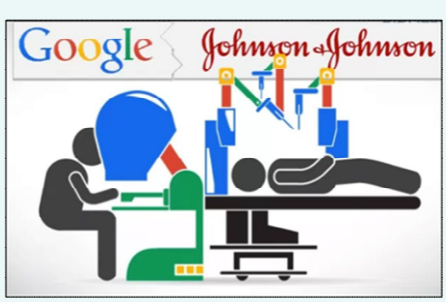
기관명	사진	개발 내용
DGIST, 한국		3차원 마이크로구조물 제작, 고 추진효율 마이크로 로봇 개발, 세포 및 약물전달 응용연구
전남대, 한국		박테리아 로봇, 다기능 캡슐 내시경
명지대, 한국		자기장 제어기의 혈관 적용모델 연구, 전자석 코일 및 Acoustically oscillating bubble을 이용한 마이크로로봇 구동
ETH, 스위스		안구 질병의 진단 및 약물전달을 위한 자기장 기반의 마이크로로봇 연구
INSA Centre Val de Loire, 프랑스		심장혈관 내에서 운동하는 마이크로로봇의 정밀제어에 관한 연구
Univ. of Toronto, 캐나다		분자 및 세포 기반의 마이크로 로봇을 적용한 조작기술
Ecole Polytechnique of Montreal, 캐나다		마이크로로봇 기반 Brain Blood Barrier를 통과하여 약물전달

6) 미래 수술 로봇 시장의 방향

2016년, 대형 의료 기기 업체인 Johnson and Johnson과 Google사가 합작하여 Verb Surgical 이라는 수술 로봇 회사를 창업하였다. 아직 제품 개발 단계이나, 의료기기와 IT의 두 대기업이 합작하여 세상에 내놓을 수술 로봇 제품이 시장에 어떤 영향을 미칠지 그 귀추가 주목된다. Verb Surgical에서 제안하는 미래 수술 로봇 기술의 방향을 CEO 인 Scott Huennekens의 인터뷰[10] 등을 통해 살펴 볼 수 있는데 그 핵심 목표는 'Information- guided Digital Surgery: Surgery 4.0'이다.

그림 12 Surgery 4.0 과 Verb Surgical





수술 로봇이 보급된 오늘날에도 의사들은 수술 중에 자신의 시각과 경험, 환자에 대한 사전 지식을 머릿속에서 재구성하며 판단을 내리고 수술을 진행한다. Surgery 4.0 에서는 이러한 의사 개개인의 능력과 머릿속에 의존하는 수술을 넘어서, 사람의 시각을 넘어서는 각종 영상 정보, 환자 본인뿐만 아니라 유사한 다른

10) https://www.mddionline.com/democratizing-surgery-qa-ceo-verb-surgical

환자들의 과거 의학 영상 및 병력 등 다양한 사전 정보를 디지털화 하여 하나의 플랫폼에 융합하고자 한다. 그리하여 융합된 정보들을 바탕으로 수술 중 의사의 판단을 보조하고 정밀한 도구들로 수술을 정확하게 수행 할 수 있도록 도와주어 결과적으로는 수술 과정의 안전성과 효율을 향상 시키고 결과를 상향평준화 하고자 한다.

Verb Surgical사에서는 Google의 앞선 정보 처리 기술과 Johnson and Johnson의 의료 기기 기술을 결합한 Surgery 4.0의 중심이 될 새로운 수술 로봇 플랫폼을 개발 중에 있다. Verb Surgical이 앞으로 가져올 Digital Surgery의 미래가 주목 된다.

또한 미래의 새로운 수술 분야인 미세 의료로봇 기술은 국내외적으로 로봇의 제작 및 구동, 바이오 응용 등 다양한 분야에서 기초연구 및 원천기술 확보에 주력하고 있다. 각 요소기술의 성능 향상과 함께 기초연구 결과들을 기반으로 임상 적용을 위한 통합 기술개발이 필요하며, 미세 의료 로봇의 구조 및 기능은 아직 단일 로봇의 이동과 같이 단순한 단일 기능에 의한 치료제 전달에 대한 기초 연구에 그치고 있다. 다양한 진단 및 치료 기능을 수행하기 위해서는 좀 더 복잡한 기능을 수행할 수 있으며 복수의 미세 의료로봇의 제작, 제어 및 구동이 필요하다. 미세 의료로봇이 전달 가능한 다양한 치료제, 치료 효과 및 치료 후 로봇의 회수 등과 같은 실제 신체 내 치료 적용을 위한 연구가 아직은 부족한 상황이며, 실제 임상 적용을 위해 미세 유체 흐름 등과 같은 다양한 생리학적 환경 내에서의 미세 의료로봇의 구동 및 치료제 전달에 관한 연구가 필요하다.

III 결론

본 글에서는 수술 로봇의 개념과 분류를 살펴보았고, 현재의 국내외 기술 수준과 시장 동향에 대해 소개하였다. 현재의 수술 로봇 시장은 2000년대 Intuitive Surgical사의 daVinci 수술 로봇의 성공과 더불어 많은 투자와 연구를 통해 2010년대에 여러 상용화된 수술 로봇 시스템들이 등장하고 있다. 특히 벤처 기업 위주였던 수술 로봇 시장에 Medtronic, Stryker, Johnson and Johnson 같은 대형 의료기기 회사들이 진출하고 있고, Google과 같은 초대형 기업들의 합류로 국내의 수술 로봇 기술의 시장 확보는 점점 더 힘들어지고 있는 실정이다. 특히 국내 수술로봇은 벤처와 중소기업 중심으로 수술로봇을 상용화하기까지 장시간의 개발 시간과 많은 투자비용을 감수하기 어렵고, 보수적인 성향을 가진 의료 시장을 공략하는데 의료 분야에서 브랜드와 신뢰도가 없는 새로운 수술로봇 시스템이 시장을 창출하거나 새롭게 진입하는데 많은 어려움이 따른다. 현재 상용화 되어 있는 수술로봇 시스템이 타깃으로 하는 임상 분야에 비해 시장의 규모가 작아 단기간에 큰 매출을 기대하기도 어려운 실정이다.

또한, 관련기술의 신규성으로 인해 기준 규격 및 표준 등이 부족하거나 없는 것 또한 수술 로봇 시장 형성에 어려움을 더한다. 해외의 경우 현재까지 미국 FDA의 허가 여부가 해당 수술로봇의 전 세계 시장 점유 여부를 사실상 결정해왔고, 복강경 수술의 경우 Intuitive Surgical이 전 세계 시장을 독점하다시피 하고 있는 등, 다양한 수술에 대해 다양한 기업이 각 시장을 독점하고 있는 실정이다. 이렇게 선점당한 시장의 경우 특허권 등의 문제로 새로운 기업의 진입이 쉽지 않은 실정이다.

국내의 수술 로봇 기술력 발전을 위해서는 전체 시스템 개발의 측면 뿐 아니라 국내 부품산업의 원천기술력을 확보하여 시스템 개발의 비용 및 기간을 단축시키는 노력이 필요하다. 또한 현재는 인공지능, 빅 데이터 등을 융합한 information guided surgery인 surgery 4.0의 패러다임에 부합하는 수술로봇 시스템 기술 개발이 필요하다. 당장의 수요에 국한된 도구 기술 개발 뿐 아니라 미래의 수술로봇의 방향성에 맞는 데이터 기반의 수술 로봇 요소 기술 개발에 더 큰 투자를 해야 할 때이다.

국내의 기술력 향상과 더불어 사업화의 성공적 모델 및 시장 선점을 위하여서는 수술로봇의 기술개발 뿐 아니라 인증, 건강보험적용, 표준화 등의 포괄적인 영역에 이르기까지 각 부처의(산업통상자원부, 보건복지

부, 식품의약품안전처, 건강보험심사평가원 등 유관기관) 협력체제 구축이 필요하다. 합리적인 제품 개발 및 시장 창출을 위해 제도의 도입을 통해 상용화, 임상시험, 네트워킹의 부담을 경감시켜 기업의 참여를 유도하고 시장 활성화 도모하며, 제도적 지원을 통해 수술로봇 시스템의 개발 기간과 인허가 기간을 단축시켜 기업의 투자에 대한 위험성을 경감시켜 주어야한다. 또한, 수술로봇 분야의 연구 개발과 임상시험, 그리고 상품화에 이르는 여러 단계에 대한 국가의 제도적 지원 계획을 수립하여 수술로봇 시스템의 개발이 완료되기 이전에 제도적인 준비가 갖추어져 있도록 해야 한다.

이 글에서 언급한 수술 로봇 기술 개발을 향한 노력과 범국가적 협력체계 구축을 통해 국내의 기술로서 세계의 수술 및 의료 로봇 시장에서 지속적으로 활용될 수 있는 시스템 개발이 가능하길 기대한다.

저자 _ 서승범 (SeungBeum Suh)

• **학 력**

Virginia Tech. 기계공학 박사
University of Michigan, Ann Arbor 기계공학 석사
University of California, San Diego 기계공학 학사

• **경 력**

現) 한국과학기술연구원 선임연구원
前) 한국과학기술연구원 연구원

융합연구리뷰

Convergence Research Review

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
TEL. 02.958.4980

융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center