



로봇재건수술을 위한 미세수술 훈련

홍종원 · 신동우 · 이동원 · 이원재

연세대학교 의과대학 성형외과학교실 인체조직복원연구소

Robotic Microsurgery Training for Robot Assisted Reconstructive Surgery

Jong Won Hong, Dongwoo Shin, Dong Won Lee, Won Jai Lee

Institute for Human Tissue Restoration, Department of Plastic and Reconstructive Surgery, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Purpose: Recent advances in robotic surgery have affected not only surgery for visceral organs but also head and neck cancer surgery and microsurgery. The authors intended to analyze and share experience gained from performing microanastomosis training in a new robotic surgery system.

Methods: Robotic microanastomosis training was performed using Da Vinci Xi. The robot arm used two black diamond forceps, one Potts scissor, and one vision camera. First, basic robotic surgery skills were trained with Da Vinci Skill Simulator training. Actual microanastomosis practice was performed using artificial blood vessel, chicken wing and porcine leg.

Results: Three simulation training sessions were performed and five vessel anastomosis were performed. A total of 8 vascular anastomosis were performed, and anastomosis for one vessel took 31-57 minutes. The number of sutures used was more than one initially due to suture material damage, but one suture was used after four anastomosis. In the anastomosis time analysis with porcine legs, the actual anastomosis process took 2 minutes 15 seconds \pm 41 seconds per stitch. The vascular anastomosis interval took more time than vascular anastomosis itself due to robot arm change and camera movement.

Conclusion: Robotic microsurgery training was not difficult process for surgeons who had undergone conventional microsurgery. However, more training was needed to replace the robot arm and move the camera. In the long term, mechanical improvements in diamond forceps and camera resolution were necessary. In order to master robotic microsurgery, surgeons must get used to robotic surgery system through simulation training.

Key Words: Microsurgery, Robotics, Anastomosis, Training

Received August 28, 2019, Revised October 1, 2019, Accepted October 16, 2019

Corresponding author: Jong Won Hong

Institute for Human Tissue Restoration, Department of Plastic and Reconstructive Surgery, Yonsei University College of Medicine, 50-1 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

TEL: +82-2-2228-2210, FAX: +82-2-393-6947, E-mail: hsaturn@hanmail.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7762-0940>

Copyright © 2019 by Korean Society for Surgery of the Hand, Korean Society for Microsurgery, and Korean Society for Surgery of the Peripheral Nerve. All Rights reserved.
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

1960년대 미세수술이 임상에 시행된 후, 수지접합의 영역에서 벗어나 피판을 이용한 재건수술 영역으로 확대되었다¹. 특히 두경부암과 하지외상 부분에서는 재건수술을 통하여 더 과감한 종양 제거와 절단이 아닌 하지복원을 이뤘다². 최근에는 로봇수술이 발전하면서 기존의 수술 영역에 확대 적용되어 로봇수술에 대한 분야도 영역별로 급속하게 발전하고 있다. 로봇수술의 장점은 비침습적인 방법의 절정으로 주로 내부장기의 수술 영역을 위주로 적용되었다³. 그러나 2000년대 중후반부터 내부장기는 아니지만 비침습적인 방법의 장점을 이용한 두경부암 영역의 로봇수술도 새로운 분야로 급성장하였다³⁻⁵. 초창기에는 T1, T2 등 비교적 작은 크기의 두경부암에 로봇수술이 적용되었다. 그러나 최근에는 4 cm 이상의 T3 크기의 종양이나, 종양 제거 후 경동맥 등 중요 구조가 노출되는 경우에도 로봇수술이 확대되었다. 로봇수술 후의 작은 결손에 대해서는 이차창상치유(secondary wound healing)나 국소피판(local flap)으로 해결하였다. 그러나 병기가 높은 두경부암에 대한 수술이 증가하면서 유리피판을 이용한 재건수술의 필요성도 증가하였다.

미세수술에 대한 교육 및 훈련(training)은 많은 논문에서 다뤄졌다^{2,6,7}. 다른 술기와는 달리 관찰만으로는 절대 어느 정도 수준으로 될 수 없으며, 실제 임상 적용 이전에 반드시 직접 수행하는 술기 연습이 절대적임을 많은 연구에서 밝히고 있다⁶. 특히 미세수술 훈련의 효과를 높이기 위한 재료에 대한 연구가 많았다. 그 결과 인조혈관, 태반 등 생체 적출물이나 닦 날개 혹은 돼지 다리를 이용한 살아 있지 않은 재료(non-living material)를 이용하여 미세수술 훈련을 간소화 할 수 있었다^{8,9}. 또한 실제 살아있는 혈관을 다루고 혈관문합 후 개통을 확인하기 위하여 살아있는 햇 모델(rat model)에서 대퇴혈관, 경동맥을 이용한 훈련도 많이 사용되고 있다.

그러나 로봇수술을 이용한 미세혈관수술은 완전히 새로운 시스템에서의 미세수술이다. 로봇수술의 장점은 고배율 3차원 시야에서 손 떨림 없이 시행할 수 있다는 것이다. 그러나 촉각이 없어 수술기구를 통한 힘의 전달 정도를 느낄 수 없는 한계가 있다¹⁰. 현재까지 로봇수술을 이용한 재건수술(로봇재건수술)의 보고는 최근에서야 시작되고 있고, 로봇수술을 이용한 미세수술(로봇미세수술) 훈련에 대한 보고는 2000년대 중반에 시작해서 최근에야 늘어나기 시작했다¹⁰⁻¹⁴. 미세수술 특성상 혈관문합을 위해서는 훈련이

필요한 영역임에도, 훈련에 대한 연구나 보고가 아직까지는 많지 않다. 최근에 로봇을 이용한 미세혈관문합 훈련에 관한 논문 발표가 있었다. 의대생 1명, 전공의 1명, 미세수술 전문의 1명 등 총 3명의 훈련자를 대상으로 인공혈관을 이용하여 새로운 로봇시스템에 대한 로봇미세혈관수술 훈련에 대한 내용이었다¹⁴. 그러나 많이 적용하는 로봇시스템이 아니였으며 실제 로봇미세수술을 위한 훈련에 대한 분석이 부족하였다. 또한 인조혈관만을 이용했기에 혈관문합을 위한 혈관준비 과정이 반영되지 않았다. 저자들은 로봇수술을 이용한 미세수술 훈련의 과정에서 있었던 혈관문합 과정을 분석하고자 하였다. 이를 통해 향후 로봇수술을 이용한 유리피판술 재건에 도움이 되고자 한다.

대상 및 방법

1. 로봇시스템 및 기구

로봇수술을 위한 로봇시스템은 Da Vinci Xi 모델(Da Vinci Xi surgical system; Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA, USA)을 기본으로 하였다. 3개의 로봇 팔(robot arm)과 1개의 카메라를 사용하였다. 혈관문합을 위한 로봇 팔은 다이아몬드 겸자(black diamond micro forceps)와 포츠 가위(Potts scissor)를 사용하였다(Fig. 1). 혈관클램프(vessel clamp)는 기존에 미세혈관 훈련에 사용하는 혈관클램프를 사용하였다.

2. 로봇수술을 위한 교육

로봇미세수술을 위해서는 먼저 로봇수술 시스템에 대한 훈련을 먼저 시행하였다. 로봇수술 훈련은 로봇수술 장치에 대한 교육, 시뮬레이션 교육(Da Vinci Skill Simulator), 모형을 이용한 교육, 동물을 이용한 교육으로 구분된다. 시뮬레이션 교육은 로봇 팔, 카메라를 다루는 훈련, 봉합사를 다루는 훈련 등이 포함되어 있으며, 시뮬레이션 훈련으로 어느 정도 로봇수술 기계 및 장비에 익숙해지는 정도까지 도달할 수 있다. 미세혈관수술을 위해서는 시뮬레이션 교육까지 시행한 후 실시하였다. 훈련은 로봇수술 트레이닝 센터 예약 후 시행하였으며, 스케줄 일정에서 통상 하루 2시간 내외의 시간으로 예약했다.

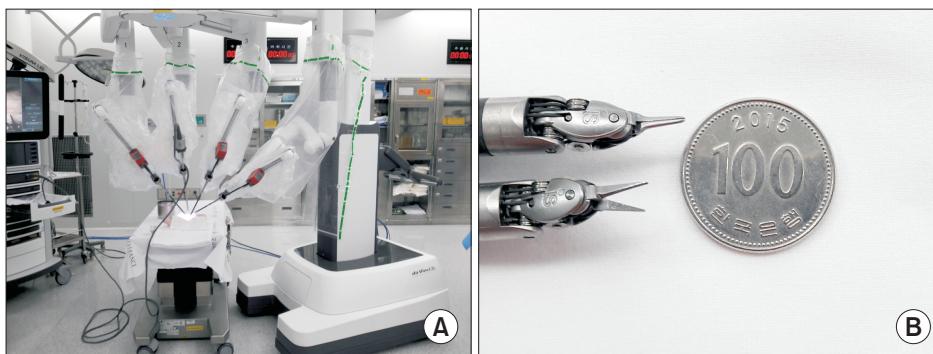


Fig. 1. Robotic microsurgery training model using porcine leg. (A) Da Vinci Xi model composed of one camera vision and three instruments was used. (B) Two black diamond forceps and one Potts scissors were required for robotic microsurgery.

3. 로봇미세수술 훈련을 재료 및 과정

로봇수술을 이용한 미세수술 훈련에서 재료는 인조혈관 (artificial vessel, 2 mm; SINI, Seoul, Korea), 일반 식료품점에서 구매할 수 있는 닭 날개, 돼지 다리를 사용하였다. 닭 날개와 돼지 다리를 이용할 때는 혈관을 찾고 박리하는 것까지는 로봇을 이용하지 않고 기존의 방법으로 시행하였으나 외박(adventitia) 박리는 로봇을 이용하여 시행하였으며 혈관클램프를 적용하는 것은 술자가 직접 클램프 훌더를 이용하였다. 혈관문합 할 부위의 절단(cutting)은 포츠가위 로봇 팔로 시행하였다. 봉합사는 9-0 나일론 (Ethicon, Somerville, NJ, USA)을 사용하였다.

로봇 팔 구성은 좌측은 1개의 다이아몬드 포셉(1번 팔), 우측에 나머지 1개의 다이아몬드 포셉(2번 팔)과 포츠 가위(3번 팔)를 위치시켰다. 다이아몬드 포셉이 로봇미세수술기구에서 지침기(needle holder), Jeweler 포셉, 혈관 확장기(vessel dilator) 역할을 모두 하였다. 우측의 2번 팔과 3번 팔은 발을 이용한 클러치 패달을 이용하여 바꿔가며 사용하였다. 로봇수술에서 배율 조절은 카메라와 대상 간의 초점거리를 조절함으로써 배율을 조절하게 되어 있다. 혈관문합 시에는 혈관과의 거리는 3-5 cm로 하였으며, 봉합사 컷이나 봉합사를 다시 잡을 때는 10-15 cm 거리로 조절하였다(Fig. 2).

4. 로봇미세수술 과정 구분

미세혈관문합의 과정을 실제 문합 과정(actual anastomosis process)과 문합 간 과정(interval process)으로 구분하였다. 실제 문합 과정은 봉합침(needle)이 한쪽 혈관을 통과하기 직전에서부터 결찰(tie)이 완료된 시점으로 보았다. 문합 간 과정은 결찰된 봉합사를 절단하고 다시 봉합침을 잡는 것, 필요한 혈관 정리를 하는 것을 포함한 다



Fig. 2. Robot arm and camera set up for robotic microanastomosis. Robot arm 1, 2 are black diamond micro forceps. Diamond forceps serve as the Jeweler forceps, vessel dilator and microneedle holder. Robot arm 3 is a Potts scissor, which acts as a micro metzenbaum and scissor. In robotic microsurgery, the scissor arm should be positioned outside the operation field to prevent collisions between instruments and to facilitate optimal view for surgeons. When performing the cut, arm 2 is replaced with arm 3 and arm 3 is brought into the field. Camera 4 adjusts the magnification by shifting the focal length.

음 문합의 전 단계까지 시행되는 것으로 정하였다. 이러한 구분의 이유는 실제 문합 과정이 끝나고 문합 간 과정으로 이행될 때 카메라를 이동하고 클러치로 로봇 팔을 변경해야 했기 때문이다. 봉합 과정의 시간 분석은 위의 과정을 순서대로 측정하였다.

5. 자료분석 및 통계

저자들도 처음 시행하는 분야로 모든 과정은 사진촬영을 시행했다. 로봇시스템에서 수술자가 조작할 수 있는 스크린을 촬영하였다. 사진촬영 영상과 트레이닝센터 예약 시간으로 훈련 시 시간을 계산하였다. 돼지 다리의 동맥 문

합 1회에 대해서 지원을 받아 동영상 촬영을 하여 혈관문합 과정에 대한 시간을 분석하였다. 또한 미세수술 과정에서 술기 평가 항목으로 사용한 봉합사의 개수를 평가하였다. 한 명의 수술자(J.W.H)에 의하여 로봇수술 미세수술을 진행하였으며, 혈관문합 시 보조자는 없었다. 통계분석의 평균과 표준편차는 Microsoft Excel 2010 (Microsoft, Redmond, WA, USA)을 이용하였다.

결과

로봇을 이용한 실제 미세수술 훈련을 시행하기 전까지 시뮬레이션 훈련을 2시간씩 총 3차례 시행하였다. 로봇 팔의 움직임, 카메라 조절, 클러치 사용을 통한 로봇 팔 변환, 여러 각도의 봉합연습을 시행하여 로봇수술 장비에 익숙해지는 과정이 필요하였다. 이후 인조혈관과 생체재료를 사용하여 로봇미세혈관수술 훈련을 시행하였다. 또한 유리피판술을 이용한 두경부 재건을 2017년 평균 월 2.7예, 2018년 평균 월 3.1예 시행으로 꾸준히 미세혈관수술을 익숙하게 유지하였다.

로봇미세수술 훈련은 첫 번째는 인조혈관을 이용하였고, 이후 닭 날개, 돼지 다리를 이용하여 총 5회의 연습과정을 가졌다(Table 1). 혈관문합 연습은 총 5회 시행하였다. 혈관문합 연습은 총 8개 시행하였으며, 1회 혈관문합 시간은 31-57분이 소요되었다. 사용한 봉합사 숫자는 초기에 봉합사의 손상으로 1개 이상 사용했으나 4, 5회 연습에서는 1개가 사용되었다. 실제 로봇수술 장비를 세팅하고 미세혈관수술 연습 전 단계 준비하는 것에 많은 시간이 소요되었다. 전체 훈련시간은 2시간을 계획하고 시행하였으나, 형평에 맞게 진행하였다. 혈관문합을 위한 훈련시간은 연습재료가 변할 때마다 세팅과 익숙해지는 시간이 소요되었으나, 횟수를 거듭할수록 혈관문합 시간은 단축되었다. 정확한 봉합사 끊어짐을 조사하지 못하여 사용한 봉합사의 수를 기록하였다. 봉합사를 조작하거나 결찰할 때 봉합사가 끊어져도 길이가 충분하면 계속 사용하였다. 따라서 사용

한 봉합사 수가 봉합사 손상(break) 횟수를 의미하지는 않았다. 훈련 초반에는 사용한 봉합사가 많았으나, 4회와 5회에는 하나의 봉합사로 훈련을 종료할 수 있었다.

실제 수술을 감안하여 로봇 팔과 카메라 방향은 측상방 45도 정도에서 접근하게 세팅하였다(Fig. 3). 두경부암 제거 후에 혈관문합을 시행하게 된다면 실제 시야는 측면에서 접근할 가능성이 높다. 로봇을 이용한 경부곽청술(neck dissection)을 시행할 경우 이개후방절개(retroauricular incision)를 통해서 시행한다. 따라서 로봇수술을 이용한 미세혈관문합은 혈관을 측면에서 접근하게 된다.

모든 과정을 한 종류 기구인 다이아몬드 포셉으로 모두 조작해야만 했기 때문에 혈관 박리에서도 몇 가지 노하우가 필요하였다. Jeweler 포셉보다 다이아몬드 포셉이 크기 때문에 혈관을 잡을 수 있게 혈관외막 일부는 남겨놓았다. 박리를 너무 심하게 할 경우 혈관을 잡기 어렵거나, 혈관을 직접 잡아 손상을 받을 수 있었다. 로봇 팔의 포셉이 잡는 것과 평는 것, 두 가지 과정에서 중간 과정을 조절하기가 쉽지 않았다. 따라서 혈관 내경을 벌릴 때는 상당한 주의가 필요했다. 혈관문합 시 봉합침이 혈관을 통과하기 위하여



Fig. 3. After robotic neck dissection with retroauricular incision, the anastomotic surgical field should be approached laterally. Considering the actual surgery, the robot arm was set at an angle of 45 degrees.

Table 1. Robotic microsurgery training performance table

	Material	Anastomosis	Total training time including preparation	Pure training time for anastomosis	Time for 'one' anastomosis
1st	Artificial blood vessel	2	2 hr	1 hr 06 m	33 m
2nd	Chicken wing	2	1 hr 50 m	1 hr 04 m	32 m
3rd	Pig leg	2	2 hr 30 m	1 hr 54 m	57 m
4th	Pig leg	1	1 hr 10 m	50 m	50 m
5th	Pig leg	1	58 m	31 m	31 m

혈관 내경 안쪽에서 반대힘(counter support)으로 받쳐주는데 이때 봉합침이 다이아몬드 포셉에 직접 닿지 않게 주의해야 한다(Fig. 4).

로봇미세수술은 촉각에 대한 피드백이 없고 온전히 모니터에 보이는 시각정보로 결정해야 한다. 실제 기구와 기구, 봉합침이 충돌했을 때 생각보다 그 충격이 크다. 따라서 봉합침이 주변 로봇 팔과 충격 시 쉽게 손상되어 사용할 수가 없었다. 카메라의 배율은 고정되어 있으며, 초점거리 변화로 배율을 조절하였다. 미세혈관문합 할 때는 통상 3-5 cm 거리, 봉합사를 잡거나 컷할 때에는 10-15 cm 거리를 두었다. 실제 조절은 초점거리를 계측하여 결정하는 것은 아니다. 술자가 모니터에서 적정한 수술시야를 확보하는 정도에서 카메라 이동량을 결정하였다.

실제 문합 과정과 문합 간 과정을 구별해서 본다면, 실제 문합 과정은 통상적인 혈관문합의 과정과 유사하였다. 양 측 다이아몬드 포셉 로봇 팔을 이용하여 봉합사를 주고 받을 때, 동시에 봉합사를 잡지 않도록 주의해야 했다. 만약 동시에 잡아서 당길 때 봉합사가 끊어지는 경우가 발생하였다. 실제 수술에서는 양 손으로 동시에 봉합사를 잡을 일은 거의 없다. 그러나 로봇수술 시스템에서는 포셉이 수술자의 손을 대신하면서 동시에 원래 임무인 포셉의 역할도 하기에 이에 대해 익숙해지는 과정이 필요하다. 저자는 시뮬레이션 연습에서 해당 부분을 상당히 시간을 들여 연습하였다. 봉합사를 다른 로봇 팔로 건네줄 때, 다른 한쪽 로봇 팔에서도 잡았다면 건네준 로봇 팔은 완전히 풀어준 상태에서 조작하였다. 즉, 1번 팔에서 2번 팔로 건네 준 봉합사는 1번 팔에서 봉합사가 완전히 물리지 않은 것을 확인 후 2번 팔을 조작하였다. 3-5 cm 초점거리에 카메라를 위치했을 때 로봇 팔끼리, 혹은 카메라와 충돌할 수 있다. 이

를 감안하여 세팅 때 미리 로봇 팔 위치를 확인해봐야 했다.

오른손으로 조작하는 2번 팔과 3번 팔은 혈관문합 시야에서 각각 멀리 두고 충돌이 일어나거나 서로의 수술장(field)을 방해하지 않게 두어야 했다(Fig. 2). 3번 팔인 포츠 가위는 혈관문합 시에는 문합 부위 수술장에 있어선 안 되는데 좁은 공간에서 2개의 로봇 팔이 3번 팔에 방해받거나 충돌할 수 있기 때문이다. 봉합사 절단을 위해서는 3번 팔인 포츠 가위로 2번 팔과 변경해야 한다. 이때 3번 팔이 시야에 들어와야 클러치를 이용하여 변경시킬 수 있다. 그러므로 문합 간 과정 첫 단계는 카메라를 후방으로 이동시켜 시야를 넓게 확보해야 했으며 이때 교체된 기준의 2번 팔은 포츠 가위와 충돌을 방지하기 위하여 멀리 위치시켜야 했다. 결과적으로 문합 간 과정은 수술 팔의 이동과 교체, 카메라 이동으로 시야를 확보하는 세팅 시간이 소요되었다. 이후 봉합사 정리와 혈관 정리 등 다음 혈관문합을 위한 준비까지 해야 하기에 실제 문합 간 과정은 미세문합 과정보다 시간이 많이 소요되었다.

처음 로봇미세혈관문합은 인조혈관을 이용하였다. 닦 날개를 사용한 로봇혈관문합에서 비교적 작은 혈관이었으나, 로봇으로 충분히 가능하였다. 이후 돼지 다리를 이용하여 혈관문합을 시행하였다. 시행 완료 후 문합 부위를 절단하여 내경에서도 문합 결과를 확인하였다(Fig. 5). 혈관문합 전체 과정 촬영은 3번째 돼지 다리를 이용한 훈련에서 첫 번째 문합 시에만 시행하였다. 이때는 로봇미세수술 술기는 인조혈관, 닦 날개를 이용한 훈련을 시행한 이후이다. 돼지 다리 혈관은 통상 지름 2-3 mm의 두께를 가지기에 성인에서 시행되는 대부분의 피판 혈관 내경과 비슷하거나 작은 정도이므로 혈관문합 실전 연습으로는 적절하였

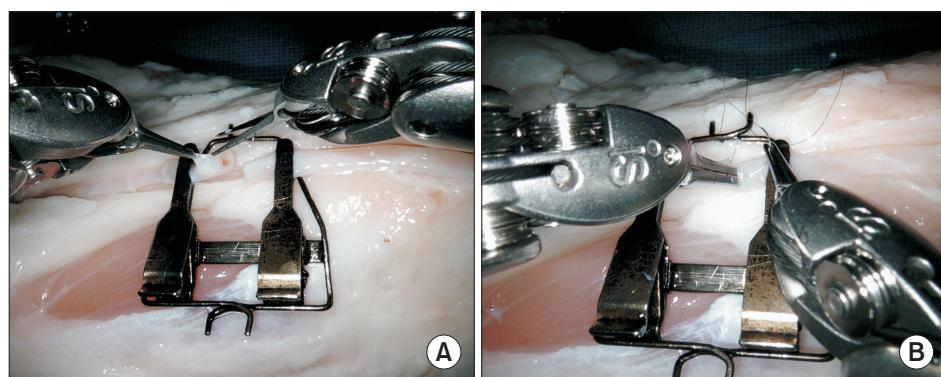


Fig. 4. Robotic microsurgery. (A) Vessel preparation and skeletonization were successful with micro robotic instruments. Adventitia layer was partly left for holding. (B) Robotic microanastomosis. Care should be taken not to open suddenly when placing diamond forceps inside the vessel. Also, surgeons should make sure that the suture needle does not hit the instrument and be damaged.

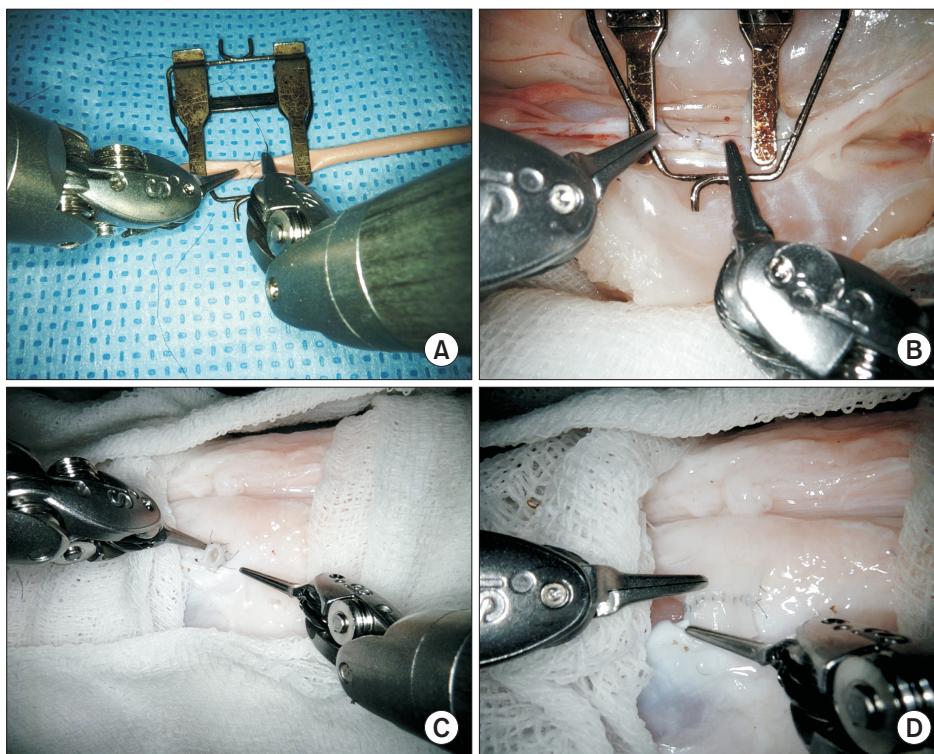


Fig. 5. Microanastomosis training material for robotic microsurgery training. (A) Practice model using artificial blood vessels. (B) Practice model using the chicken wing. (C) Practice model using the porcine leg. After robotic microsurgery, authors cut the area around anastomosis and check the internal diameter. (D) Anastomosis was confirmed by complete excision of blood vessels.

다. 총 7개의 봉합을 시행하였으며, 비디오 분석으로 실제 문합 과정과 문합 간 과정을 시간 측정하였다. 실제 문합 과정은 각 봉합 별로 평균 2분 15초 소요되었다. 7개 봉합 과정의 시간은 15분 44초 소요되었다. 그러나 문합 간 과정은 상당히 많은 시간이 소요되었다. 각 문합 간 과정, 즉 간격은 평균 2분 55초가 소요되었고, 전체적으로 17분 27초가 소요되었다. 1개의 혈관문합을 위한 전체 소요시간은 33분 11초였다(Table 2).

고찰

로봇수술의 영역이 확대되면서 두경부암 영역에서의 로봇수술도 획기적으로 증가하였다. 초기에 stage I, II인 종양에 주로 시행되었다면 최근에는 stage III 이상의 병기에도 로봇수술이 시행되고 있다¹⁵⁻¹⁷. 이렇게 로봇수술로 제거할 수 있는 병변이 커지면서 재건수술의 필요성도 커지고 있다. 따라서 장기적으로는 로봇수술을 이용한 재건, 특히 로봇수술을 이용한 미세혈관문합술에 대한 필요성도 커지고 있다.

두경부암에서 로봇수술은 2가지로 구분된다. 구강을 통한 종양적출술(transoral robotic surgery, TORS)과 이개후방 절개를 통한 경부곽청술 두 개의 종류로 이뤄진다^{5,18,19}. 수술자에 따라 TORS만 하고 경부곽청술은 통상적 방법인 앞치

Table 2. Timeline for first porcine vessel microanastomosis

	Actual anastomosis process	Interval process
1st Suture	3 m 16 s	
Interval		2 m 46 s
2nd Suture	2 m 27 s	
Interval		4 m 43 s
3rd Suture	1 m 43 s	
Interval		1 m 55 s
4th Suture	2 m 21 s	
Interval (posterior part set-up)		4 m 50 s
5th Suture	2 m 14 s	
Interval		1 m 32 s
6th Suture	1 m 07 s	
Interval		1 m 41 s
7th Suture	2 m 36 s	
Average	2 m 15 s±41 s	2 m 55 s±1 m 30 s
Sub total	15 m 44 s	17 m 27 s
Total	33 m 11 s	

마절개(apron incision)를 통해 시행하기도 한다. 로봇수술 후의 재건수술도 3가지로 구분된다. 첫째는 로봇을 이용하지 않고 술자가 직접 시행하는 재건수술, 둘째는 피판 고정은 로봇수술로 시행되고, 미세혈관문합은 술자가 직접 시행하는 재건수술, 셋째는 피판 고정과 미세혈관문합 모두를 로봇으로 시행하는 로봇재건수술로 구분된다. 현재까지는 첫 번째 방법인 기존의 수술자가 직접 시행하는 재건수술이 가장 많이 사용되고 있다. 피판 고정만을 로봇수술로 시행되는 것도 많이 시도되고 있다.

그러나 성형외과 영역이 주로 외부에 드러난 조직 및 장기를 다루기에 로봇수술의 필요성이 다른 영역에 비하여 떨어지고, 이로 인하여 성형외과 의사가 로봇수술에 익숙하지 않기 때문에 그 발전 속도는 다른 영역에 비하여 느리다^{20,21}. 또한 수술의 개념상 절제하는 것과 재건하는 것의 차이도 로봇수술이 재건 영역으로 확대되는 것을 제한하는 측면도 있다. 제거하는 술기는 견인하는 기구와 제거하는 에너지기구(energy device)가 들어가는 공간이면 충분하다. 그러나 재건하는 것은 봉합을 위한 공간이 필요하기 때문에 제거하는 술기보다 넓은 수술 공간이 필요하다. 즉 보이면 제거할 수 있으나, 보인다고 재건할 수 있는 것은 아니다. 이 부분은 경부곽청술을 이개후방절개로 이뤄진 이후에 시행하는 것에서 더욱 그렇다. 아직까지는 이개후방절개를 통해서 술자가 직접 미세혈관봉합술을 시행하고 있다¹⁹. 그러나 장기적으로 술자의 자세, 미세혈관문합의 결과를 위해서도 긍정적이지 않다. 따라서 이 부분을 극복하기 위해서는 재건 영역에서도 로봇재건수술, 로봇미세수술의 필요성을 증가시킨다.

현재까지의 발표된 로봇재건수술 연구나 논문은 아직 초창기 단계이다. 로봇재건수술에서 미세혈관문합술에 대한 부분도 다루고 있으나, 시행하는 기관, 의료진 그룹, 술자가 제한적이기에 적은 술자의 연구나 한정된 연구자에 국한되고 있다^{12,14}. 그 이유는 일단 비용이 고가이며, 시설을 갖춘 병원이 제한적이다. 또한 성형외과 영역에서는 로봇수술을 흔하게 접하지 않으며, 이 때문에 로봇을 재건 영역에서 구성(set-up)하는 것에 시간이 오래 걸린다²¹. 여기서 구성은 단순히 기계적인 것과 수술자 뿐만 아니라, 간호사, 마취과, 보조의사(assistant doctor)까지 여기에 투입되는 인력 모두를 포함한다. 또한 술자가 직접 시행하는 수술보다 로봇재건수술, 로봇미세수술이 시간이 오래 걸리는 문제도 있다. 이러한 이유로 로봇재건수술 논문에서 미세혈관문합술에 대한 부분은 명확하게 다루지 않는 측면도 있으며, 보조의가 로봇 옆에서 보조하는 경우도 많다. 그럼

에도 불구하고 큰 흐름에서 봤을 때 로봇을 이용한 재건수술과 미세수술도 성형외과 영역에서 받아드려야 할 부분이다.

저자들은 실질적인 도움이 되기 위하여, 가장 많이 사용되고 있는 Da Vinci Xi 모델을 이용하였고, 단계별 훈련 과정을 조사하였다. 또한 인공혈관뿐만 아니라 실제 임상에 적용할 수 있고 혈관 내경이 비슷한 생물재료를 사용하였다. 로봇수술을 이용한 미세수술은 로봇수술 장비에 대한 훈련과 미세수술에 대한 훈련이 모두 이뤄져야 한다. 저자들은 이 두 단계 훈련 과정으로 로봇수술의 미세수술 훈련을 시행하려는 재건의에게 도움이 되고자 본 연구를 시행하였다.

로봇수술을 이용한 미세혈관 술기에서 기존의 술자가 직접 하던 것과 가장 큰 차이는 촉감에 대한 피드백이 전혀 없다는 것, 로봇 팔의 겸자가 완전히 잡거나 완전히 놓는 것 외에 중간 정도의 단계가 없다는 것이다. 이것은 현재 로봇수술 장비의 한계로 항상 지적되는 부분이다. 현재까지의 로봇수술 장비에서 한계는 다이아몬드 포셉으로 모든 미세수술기구의 역할을 해야 했다. 니들홀더의 역할로서는 충분하지만 해당 기구로 혈관을 잡거나 내경을 벌리기에는 한계가 있었다. 따라서 혈관 외막 박리 시 일부 외막을 혈관에 남겨 손잡이 역할을 하게 하였다. 한편으로는 남겨진 외막이 혈관문합 과정 중에 내경으로 말려들어가지 않을 정도는 제거해야 했다. 다이아몬드 포셉으로 중간 정도로 벌리는 것을 유지하기도 쉽지 않아 혈관 내경을 벌리려고 할 때는 포셉의 한쪽 부분만 삽입하거나 아예 포셉을 닫은 상태에서 혈관 내경으로 삽입해야 했다. 포츠 가위로 혈관 박리를 하는 것에는 큰 어려움은 없었다.

촉감이 없는 부분 때문에 봉합사를 잡을 때 두 로봇 팔로 동시에 잡을 경우에는 상당히 주의해야 했다. 결찰을 시행할 때는 끝까지 양쪽 실을 당기는 것이 아니라 적절한 수준까지 당기고 마무리해야 했다. 이때 시각으로 보는 것으로 피드백을 받아야 했기 때문에 기존의 미세혈관문합술에 어느 정도 익숙해지는 것이 반드시 필요했다. 결찰을 시행할 때 첫 번째 매듭을 하나의 매듭으로 시행하면 간혹 느슨하게 되는 경우가 있는데 두 번째 매듭으로 마무리할 때 좀 더 세게 결찰하면 첫 번째 매듭까지 더욱 조여지게 하기 때문에, 로봇수술에서는 피하는 것이 좋겠다. 왜냐하면 촉감이 없기 때문에 세게 실을 잡은 상태에서 당겨지게 되면 적정한 긴장이 어느 정도인지 느껴지지 않아 봉합사가 끊어지는 경우가 있다. 또한 봉합사가 끊어지기 전에 포셉으로 세게 물린 부위에서 봉합사가 끊어지거나 손상되기도 한다.

문합 간 과정에서 카메라의 이동과 로봇 팔의 교체, 그리고 사용하지 않는 로봇 팔의 위치잡기가 시간이 소요되는 부분이었다. 로봇수술 시스템에서는 보이지 않는 로봇 팔을 움직이는 것을 제한하고 있다. 왜냐하면 보이지 않는 상태에서 움직일 경우, 환자 및 조직을 손상시킬 위험이 크기 때문이다. 따라서 조작하는 모든 로봇 팔은 수술자 시야에 있어야 한다. 문제는 미세수술을 위하여 카메라 초점거리를 줄였을 때, 사용하지 않는 가위는 시야 밖에 있어 나중에 결찰된 봉합사를 자르기 위해서는 다시 카메라를 후퇴시키고 가위의 로봇 팔이 시야에 들어온 다음 로봇 팔 교체 후 컷을 시행해야 했다. 이때 교체 후 사용되지 않는 다이아몬드 포셉 로봇 팔도 방해되지 않게 혈관문합 수술장 밖에 위치해야 한다. 필요에 따라서는 절단을 위하여 다시 카메라를 전진시켜야 한다. 따라서 문합 간 과정이 아직까지는 상당히 시간을 소요하는 과정이었다.

로봇미세혈관 훈련에서 분석이나 시행 횟수에서 돼지 다리를 주로 이용하였다. 이것은 두경부암에서 주로 사용되는 피판의 혈관 크기가 너무 작을 필요는 없었기 때문이다. 그러나 닭 날개를 사용하여 시행했을 때, 성인 남성 근위지 수지절단 정도의 훨씬 더 가느다란 혈관도 로봇미세수술이 어렵지 않음을 알 수 있었다.

저자의 경험상 기존의 방법에 의한 미세수술 훈련이 되어 있지 않은 술자가 로봇수술로 처음 미세수술 술기를 익히는 것은 바람직하지 않다고 본다. 로봇수술이 장점이 많다고 하더라도 전혀 다른 방법의 시스템에서 수술을 하는 것이라 로봇수술 장비에 익숙해지는 것에도 상당한 시간이 소요된다. 로봇수술 장비에 익숙해진 이후에 기존에 해오던 익숙한 술기에 적용하는 것이기에, 미세수술을 시행하지 않았던 술자가 첫 미세수술 훈련을 로봇으로 하는 것은 적절하지 않다.

현재 로봇수술의 시스템에서 한계는 카메라 초점거리 이동으로만 배율을 조절할 수 있었지만 고배율이 될수록 해상도가 저하되는 단점이 있다. 수술제어반(surgical console)에서 손잡이에 해당하는 주 제어기(master controller)를 다룰 때 떨림은 보정되지만, 조작 시 손은 움직임이 많고 주 제어기를 잡는 것이 지속적으로 들어가게 된다. 만약 혈관문합 시간이 오래 걸린다면 주 제어기의 모양은 미세수술에는 적합하지 않을 수가 있다. 이에 대해서는 향후 개선이 필요할 수 있다.

혈관문합 과정 중에는 혈전 생성을 예방하고 혈관이 마르지 않게 하기 헤파린 등으로 간간히 세척을 한다. 그러나 로봇수술에서는 술자가 혈관 세척을 시행할 수가 없다. 또

한 실제 혈관문합에서는 출혈이 발생할 수 있기 때문에 그 것에 대한 순발력 있는 대응도 필요하다. 하지만 로봇수술에서는 로봇 팔의 움직임과 용도가 정해진 틀 안에서 작업이 되므로, 순발력이 필요한 출혈이나, 혈관 내경으로의 세척이 현재까지는 구현되고 있지 않다. 따라서 현재의 로봇 시스템에서는 보조자가 필요할 수 있다.

가까운 미래에 현재의 수술자가 필요한 보조 역할로서의 로봇수술 시스템을 로봇이 전체 수술을 시행하는 능동형 로봇으로 대체된다고 할 때, 가장 먼저 바뀔 수 있는 분야는 혈관문합 분야로 생각된다. 그 이유는 비교적 수술 공간이 좁고, 혈관의 내경, 두께, 두 혈관 간의 거리 등 비교적 공식화 할 수 있는 요소가 적으며, 술기 자체만은 일정부위의 봉합으로 이뤄지는 비교적 단순한 과정이기 때문이다.

그럼에도 불구하고 본 논문에서는 로봇미세수술 훈련의 가능성과 방법을 혈관문합 훈련 과정을 분석하여 제시하고자 하였다. 또한 훈련 자체에서는 보조자 없이 효율적으로 시행할 수 있음을 보여주고자 하였다. 본 논문은 다양한 방법으로 로봇미세수술 훈련을 하였으나, 한 명의 훈련자가 시행했다는 한계가 있어 일반적으로 미세수술 훈련에서 사용하는 평가항목을 적용할 수는 없었다. 향후 다양한 훈련자에 대한 로봇미세수술의 효용성에 대해서 심도 있는 연구가 필요하겠다.

결론

로봇수술을 이용한 미세혈관문합에 대한 훈련은 로봇수술 훈련과 로봇미세혈관 훈련으로 구분하여 시행하였다. 로봇미세수술 훈련은 기존의 미세수술을 하던 수술자에게 어려운 과정은 아니었다. 그러나 로봇 팔의 교환, 카메라의 이동에 대해서는 좀 더 훈련이 필요하였다. 혈관 재료로 인조혈관과 생체재료를 이용하여 훈련하였다. 기계적으로는 다이아몬드 포셉의 개선, 카메라 해상도의 개선이 장기적으로 필요하였다. 로봇미세수술 훈련을 위해서는 시뮬레이션 교육을 통해 로봇수술 시스템에 적응하는 훈련이 반드시 필요했다. 처음 미세수술을 시작하는 피교육자가 로봇수술 시스템으로 미세수술 훈련을 처음 시행하는 것은 바람직하지 않을 것으로 생각된다.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors have nothing to disclose.

REFERENCES

1. Noaman HH. Microsurgery in children: history, indications, precautions, and differences from that of adults. *Microsurgery*. 2008;28:83-4.
2. Krishnan KG, Dramm P, Schackert G. Simple and viable in vitro perfusion model for training microvascular anastomoses. *Microsurgery*. 2004;24:335-8.
3. Garg A, Dwivedi RC, Sayed S, et al. Robotic surgery in head and neck cancer: a review. *Oral Oncol*. 2010;46:571-6.
4. Genden EM, Desai S, Sung CK. Transoral robotic surgery for the management of head and neck cancer: a preliminary experience. *Head Neck*. 2009;31:283-9.
5. Kim WS, Jittreetat T, Nam W, Sannikorn P, Choi EC, Koh YW. Reconstruction of the segmental mandibular defect using a retroauricular or modified face-lift incision with an intraoral approach in head and neck cancer. *Acta Otolaryngol*. 2015;135:500-6.
6. Hong JW, Kim YS, Lee WJ, Hong HJ, Roh TS, Song SY. Evaluation of the efficacy of microsurgical practice through time factor added protocol: microsurgical training using nonvital material. *J Craniofac Surg*. 2010;21:876-81.
7. Kwon SS, Jeong JH, Chang H, Minn KW. Training of microanastomosis with chicken wing brachial artery. *J Korean Soc Plast Reconstr Surg* 2007;34:274-7.
8. Steffens K, Koob E, Hong G. Training in basic microsurgical techniques without experiments involving animals. *Arch Orthop Trauma Surg*. 1992;111:198-203.
9. Weber D, Moser N, Rösslein R. A synthetic model for microsurgical training: a surgical contribution to reduce the number of animal experiments. *Eur J Pediatr Surg*. 1997;7:204-6.
10. Saleh DB, Syed M, Kulendren D, Ramakrishnan V, Liverneaux PA. Plastic and reconstructive robotic microsurgery--a review of current practices. *Ann Chir Plast Esthet*. 2015;60:305-12.
11. Karamanoukian RL, Bui T, McConnell MP, Evans GR, Karamanoukian HL. Transfer of training in robotic-assisted microvascular surgery. *Ann Plast Surg*. 2006;57:662-5.
12. Selber JC, Alrasheed T. Robotic microsurgical training and evaluation. *Semin Plast Surg*. 2014;28:5-10.
13. Chalmers R, Schlabe J, Yeung E, Kerawala C, Cascarini L, Paleri V. Robot-assisted reconstruction in head and neck surgical oncology: the evolving role of the reconstructive microsurgeon. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*. 2018;80:178-85.
14. van Mulken TJM, Boymans CAEM, Schols RM, et al. Preclinical experience using a new robotic system created for microsurgery. *Plast Reconstr Surg*. 2018;142:1367-76.
15. de Almeida JR, Genden EM. Robotic assisted reconstruction of the oropharynx. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*. 2012;20:237-45.
16. de Almeida JR, Park RC, Villanueva NL, Miles BA, Teng MS, Genden EM. Reconstructive algorithm and classification system for transoral oropharyngeal defects. *Head Neck*. 2014;36:934-41.
17. Loevner LA, Learned KO, Mohan S, et al. Transoral robotic surgery in head and neck cancer: what radiologists need to know about the cutting edge. *Radiographics*. 2013;33:1759-79.
18. Song HG, Yun IS, Lee WJ, Lew DH, Rah DK. Robot-assisted free flap in head and neck reconstruction. *Arch Plast Surg*. 2013;40:353-8.
19. Arora R, Verma VK, Mishra KS, Bhowe H, Kapoor R. Reconstruction with free flaps in robotic head-and-neck onco-surgeries. *Indian J Plast Surg*. 2018;51:283-9.
20. Hassanein AH, Mailey BA, Dobke MK. Robot-assisted plastic surgery. *Clin Plast Surg*. 2012;39:419-24.
21. Nehme J, Neville JJ, Bahsoun AN. The use of robotics in plastic and reconstructive surgery: a systematic review. *JPRAS Open*. 2017;13:1-10.

로봇재건수술을 위한 미세수술 훈련

홍종원 · 신동우 · 이동원 · 이원재

연세대학교 의과대학 성형외과학교실 인체조직복원연구소

목적: 최근 로봇수술(robotic surgery)의 발전으로 내장 장기수술뿐만 아니라 두경부암 수술 영역으로 발전하면서 두경부 재건을 시행하는 경우도 늘어났다. 저자들은 새로운 로봇수술 시스템에서 미세혈관문합 훈련을 시행하여 얻은 경험을 분석, 공유하고자 하였다.

방법: Da Vinci Xi 모델로 로봇미세혈관문합 훈련을 시행하였다. 먼저 시뮬레이션 교육(Da Vinci Skill Simulator)으로 기본적인 로봇수술 술기를 익힌 후 실제 연습은 인조혈관, 닭 날개, 돼지 다리를 사용하여 시행하였다.

결론: 시뮬레이션 훈련은 총 3회 시행하였고, 혈관문합 연습은 총 5회 시행하였다. 혈관문합 연습은 총 8개 시행하였으며, 1회 혈관문합 시간은 31-57분이 소요되었다. 돼지 다리로 연습한 혈관문합시간 분석에서 실제 문합 과정은 한 봉합 당 2분 15초±41초가 소요되었다. 혈관문합 간 과정은 2분 55초±1분 30초로 로봇 팔의 교환, 카메라 이동 등으로 혈관문합보다 많은 시간이 소요되었다.

결과: 로봇미세수술 훈련은 기존의 미세수술을 하던 수술자에게 어려운 과정은 아니었다. 그러나 로봇 팔의 교환, 카메라의 이동에 대해서는 좀 더 훈련이 필요하였다. 또한 기계적으로는 다이아몬드 포셉의 개선, 카메라 해상도의 개선이 장기적으로는 필요하였다.

색인단어: 미세수술, 로봇, 혈관문합, 훈련

접수일 2019년 8월 28일 수정일 2019년 10월 1일 게재확정일 2019년 10월 16일

교신저자 홍종원

03722, 서울시 서대문구 연세로 50-1, 연세대학교 의과대학 성형외과학교실 인체조직복원연구소

TEL 02-2228-2210 FAX 02-393-6947 E-mail hsaturn@hanmail.net

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7762-0940>