

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/355442154>

Application of robots in general surgery

Article in *Journal of the Korean Medical Association* · October 2021

DOI: 10.5124/jkma.2021.64.10.678

CITATIONS

0

READS

23

4 authors, including:



Hyung-Il Kim

Yonsei University

208 PUBLICATIONS 3,767 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Investigation on immune monitoring parameters as a prognostic biomarker in gastric cancer malignancies [View project](#)



Investigation on the tumor infiltrating lymphocytes according to cancer phenotype change in synchronous, metachronous, metastatic gastric cancer [View project](#)



외과 영역에서 로봇 수술의 적용

김진경* · 양승윤* · 김성현 · 김형일
연세대학교 의과대학 외과학교실

Application of robots in general surgery

Jin Kyong Kim, MD · Seung Yoon Yang, MD · Sung Hyun Kim, MD · Hyoung-Il Kim, MD
Department of Surgery, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Background: Application of robotic surgery in the field of general surgery has been increasing. This paper is an overview of the current uses and future perspectives of robotic surgery in four major divisions—endocrine, upper gastrointestinal, hepato-biliary-pancreatic (HBP), and colorectal surgery.

Current Concepts: In endocrine surgery, cosmetic advantage is the highest priority when selecting a surgical approach for thyroidectomy. Currently, the transaxillary route is the most common approach. The introduction of the single-port system could maximize the advantages of this technique. In upper gastrointestinal surgery, the use of robots has the advantage of better retrieval of lymph nodes, less bleeding, earlier discharge, and less complications than the laparoscopic approach. However, a more prospective comparative trial is required to confirm those findings. In the HBP field, the indications of robotic surgery have expanded, starting with cholecystectomy to more challenging procedures, such as donor hepatectomy and pancreaticoduodenectomy. Meticulous dissection using robots could provide benefits to patients. In colorectal surgery, robotic surgery is an excellent technical tool for minimally invasive surgeries for rectal cancers, especially in male patients with narrow, deep pelvises. However, further studies are required to confirm the impact of robotic surgery on rectal cancers.

Discussion and Conclusion: Robots are used to provide optimal surgical outcomes. Investigating new technologies and innovative surgical procedures is the highly important for a surgeon in the era of minimally invasive surgery.

Key Words: Robot surgery; Endocrine surgical procedures; Gastrointestinal surgery; Colorectal surgery

서론

외과 수술 영역에서 복강경 수술이 처음 도입될 당시 개

복 수술에 비교하여 복강경이 가지고 있는 장점과 단점에 대해 많은 논란이 있었지만, 많은 임상 결과와 인식의 변화로 인해 현재로서는 복강경이 개복에 비하여 가지고 있는 장점, 즉, 빠른 회복, 재원기간 감소, 경감된 통증, 미용 등에 대하여는 어느 정도 인정되고 있다. 복강경의 보다 고도화된 버전이라고 간주할 수 있는 로봇은 그 숫자가 점진적으로 늘다가 최근에는 더 빠르게 그 숫자가 늘고 있다.

외과에서는 2005년 담낭 용종에 대하여 로봇을 이용한 담낭절제술을 첫 시작으로 2005년 위절제술, 2006년 대장절제술, 2007년 갑상샘 절제술이 우리나라에서 처음으로 시작되었다. 2020년을 기준으로 현재 우리나라에는 23

Received: August 11, 2021 Accepted: September 14, 2021

Corresponding author: Sung Hyun Kim, E-mail: OHLIEBE@yuhs.ac
Hyoung-Il Kim, E-mail: CAIRUS@yuhs.ac

*These two authors contributed equally to this study as co-first authors.

© Korean Medical Association

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.

대의 da Vinci Si system (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA, USA), 65대의 da Vinci Xi, 8대의 da Vinci X, 8대의 da Vinci SP가 65개의 병원에 설치되어 있으며, 2000년 한 해 8,000건이 넘는 로봇 수술이 외과 영역에서 시행되었다. 외과 영역 중 가장 많은 로봇 수술을 시행하는 내분비, 위장관, 간담췌, 대장항문 각각에서 로봇의 사용에 대한 분석은 많이 있었으나, 외과 영역에서의 거시적인 시야로 로봇의 현황과 그 의미를 분석한 문헌은 전무하다. 이 논문은 현재 우리나라 외과 영역에서 로봇을 가장 많이 사용하고 있는 4개 영역의 최근 동향과 앞으로의 응용 방향을 전망하고자 한다.

내분비외과

갑상샘 암에서의 로봇 수술은 미용적 목적이 뚜렷하다는 점에서 다른 외과 영역에서의 로봇 수술과 차별화되는 측면이 있다. 로봇 수술을 선택하는 대부분의 갑상샘 환자들은 시각적으로 잘 노출되는 경부의 상처를 완벽하게 가리고자 하는 열망이 강하며, 수술자가 수술의 안정성이나 합병증 정도를 고려하는 것과 별개로 미용 효과를 최우선 순위에 놓는 경우가 많다. 특히 갑상샘 암은 젊은 여성에게 호발하는 특성과 더불어 수술 후 예후가 좋은 것으로 알려져 있어, 상처를 숨기기 위한 목적으로 타겟 장기에서 먼 옆 목[1], 겨드랑이[2], 유륜[3], 귀 뒤[4], 경구강[5] 등을 이용하여 내시경 혹은 로봇을 이용하여 접근하는 수술방법들이 지속적으로 개발되며, 그 숫자도 계속 증가하고 있다 (Figure 1). 이 중 국내를 비롯하여 미국, 유럽 등 전 세계적으로 가장 많이 시행되고 있는 술기는 겨드랑이를 통한 로봇을 이용한 무기하 액와접근법(gasless transaxillary thyroidectomy)으로[6-9], 이 논문에서는 해당 술기를 주로 기술하겠다.

내시경적으로 액와의 절개를 이용하여 갑상샘을 절제하는 술기는 2004년부터 시행되었다[2,10]. 이 술기는 환자들의 미용적 목적을 만족시키며 술기적으로 안전한 것으로 확인되었지만, 기구가 완전히 고정되지 않은 채 좁은 경부

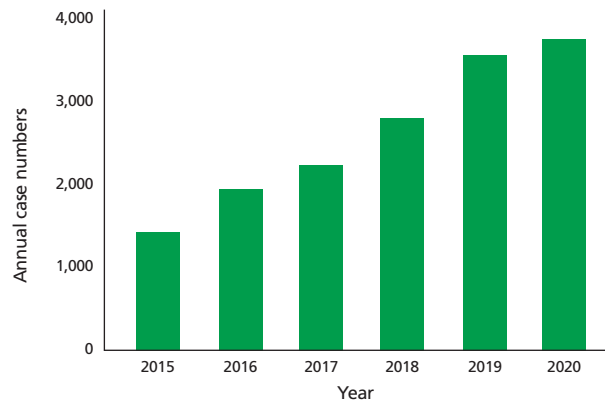


Figure 1. Annual number of robotic endocrine surgery performed in Korea.

내부를 다루다 보니 수술자에게 상당한 피로감을 주며, 오랜 시간이 걸렸고, 외측 경부 임파선 광청술 등의 광범위한 수술을 시행하기에는 기술적으로 부담이 컸다[11]. 이에 2007년 로봇 장비를 이 술기에 적용하면서[12], 수술 중 확대된 안정적인 시야 확보와 자유로운 기구의 움직임이 가능해졌고, 로봇 갑상샘 수술이 내시경 수술의 한계를 극복할 수 있었다[13,14]. 로봇 갑상샘 수술은 내시경적 갑상샘 수술뿐만 아니라 경부 절개를 통한 고식적 갑상샘절제술, 외측 임파선 광청술과 비교해서도 수술 후 합병증과 암의 치료적 측면에 있어서 비슷한 수술결과를 보인다는 점이 확인되어, 환자와 수술자 모두에게 만족을 줄 수 있는 술기로 자리매김하고 있다[15-18].

국내에서 시행한 연구에서 무기하 액와접근법을 이용한 로봇 갑상샘 수술의 학습곡선은 내시경 수술에 숙련된 수술자와 내시경 경험이 없는 수술자 모두에게 고무적인 결과를 보여주었고[19,20], 해외에서 시행한 연구에서도 첫 10건의 수술 사례 이내에 빠르게 습득할 수 있는 것으로 확인되어[21], 로봇 경험이 없는 외과의들도 도전이 가능하다는 것을 시사하였다.

액와를 통한 갑상샘 수술에 있어서 내시경에 비해 로봇이 갖는 우월성이 뚜렷하고 수술비용이 차이가 많이 나기 때문에 전향적 무작위 연구가 어려운 측면이 있다. 또한 로봇을 원하는 환자군은 상처를 보이지 않게 하겠다는 목적이 분명하기 때문에 경부를 통한 수술과의 전향적 연구도 현실적으로 불가능한 것으로 보인다.

로봇을 이용한 무기하 액와접근법에 대하여, 겨드랑이에 서 목에 이르는 플랩의 범위가 넓다는 점과 겨드랑이와 반대쪽에 위치한 갑상샘의 절제가 기술적으로 어렵다는 비판이 있다[22]. 하지만 2018년 12월, 단일 포트에 4개의 유연한 팔이 장착된 da Vinci SP가 도입되면서 이 의혹들은 상당 부분 해소될 것으로 보인다. SP 시스템을 이용한 무기하 액와접근법을 소개한 논문은 첫 10개의 증례에 대한 것이 발간되어 있고[23], 후속으로 200례에 대한 논문이 발간 예정이다. 세브란스병원 단독으로도 SP가 도입된 지 2년만에 이용하여 700여가 넘는 갑상샘 수술을 시행하였고 수술 후 환자의 만족도가 높아 그 응용이 점차 확대될 것으로 생각된다.

위장관외과

초기 위장관에서의 로봇 수술은 세브란스병원에 국한되어 있었으나 2016년을 기점으로 타병원 수술 숫자가 많아지기 시작하여 이제는 많은 병원에서 로봇을 이용한 위 절제술을 시행하고 있다(Figure 2). 다른 분야도 마찬가지로 개복과 복강경을 비교하였을 때 가지는 장점만큼이나 복강경과 로봇을 비교하였을 때 어떠한 장점을 가지는지에 대한 논의가 있었다. 위암 수술에서 개복과 복강경을 전향적으로 비교한 문헌을 분석해 보면, 수술시간이 길어지고, 림프절 복구율(lymph node retrieval)이 낮아지는 단점이 있지만 출혈이 적고 재원기간이 짧아지며, 통증 또한 줄어든다는 보고가 있었다[24,25]. 이러한 전향적 무작위 비교 연구는 현실적으로 불가하다. 로봇은 수술비용이

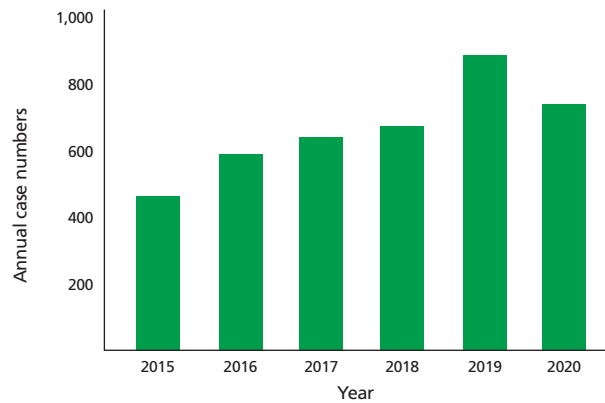


Figure 2. Annual number of robotic gastrectomy performed in Korea.

복강경과 비교가 어려울 정도로 비싸기 때문이다. 현재까지 보고된 로봇 관련 전향적 연구는 Table 1과 같이 무척 제한적이다[26-31]. 그 중 복강경과 비교한 다기관 전향연구는 단 한 개이며, 무작위 연구는 아니고 로봇 환자 한 명이 등록될 때마다 복강경 환자 한 명을 나란히 등록하는 형식으로 이루어진 전향연구이다. 그 결과 복강경 수술에 비하여 로봇은 비용이 더 비싸고 수술시간은 더 오래 걸리는데 다른 지표, 림프절, 출혈, 합병증, 재원기간 등은 차이가 없었다[26]. 후향적 연구에서 보고되었던 로봇의 장점인 많은 림프절 복구율[32,33], 적은 수술 중 출혈[33], 빠른 퇴원[32], 낮은 합병증 발생률[34]이 다기관 전향연구에서도 늘 재현되는 것은 아닌 것으로 생각된다. 그래서 일반적인 환자에서의 단순 비교보다는 로봇의 장점이 극대화되는 상황, 예를 들어, 초기 수술의 학습곡선에서 더 빨리 학습이 완료되는 장점[35], 또는 수술이 어려운(비만하고 광범위 림프절절제술이 필요한) 환자에서 개복, 복강경에 비하여 좋은 생존율[36] 등이 보고되고 있어, 로봇 수술이 도움

Table 1. Prospective studies on robotic gastrectomies

Study	Journal	Country	Group (R/L)	Primary endpoint
Uyama et al. (2019) [27]	<i>Gastric Cancer</i>	Japan	330 R	Major complication rate <3.2%
Hosoda et al. (2019) [28]	<i>J Surg Res</i>	Japan	22 R	Safety
Lee et al. (2017) [29]	<i>Surg Endosc</i>	Korea	19 R	Major complication rate
Tokunaga et al. (2016) [30]	<i>Surg Endosc</i>	Japan	120 R	Safety
Kim et al. (2016) [26]	<i>Ann Surg</i>	Korea	223 R/211 L	Descriptive comparison
Tokunaga et al. (2014) [31]	<i>Gastric Cancer</i>	Japan	18 R	Safety

R, robotic; L, laparoscopic.

이 되는 환자군을 찾는 연구가 진행 중이다.

일본 쪽에서는 로봇이 더 안전하다는, 다시 말해 낮은 합병증을 가지는 것으로 가설을 세우고 이를 검증하는 연구가 주로 진행되고 있다[37]. 특히 2019년 보고된 330명의 로봇 환자 데이터는 복강경의 주요 합병증 발생률인 6.4%의 절반이 안 되는 2.5%의 합병증 발생률을 보였다[27]. 비록 로봇 단독 연구이고, 비교대상인 복강경의 결과는 문헌상의 내용이었다는 것이 한계이지만, 후속으로 준비하고 있는 JCOG1907 (UMIN000039825, MONA LISA study)는 다기관 무작위 3상 연구로 디자인하였으며, 1,040명의 환자를 등록할 예정이며 결과를 기대해 볼만 하다.

로봇 수술에서도 축소 포트(single-site)를 이용한 수술 결과가 보고되었는데, 이는 일반적으로 5개의 투관침을 이용하는 로봇에 비하여 2개의 투관침을 이용하는 로봇 수술 결과를 보고한 것으로 2개의 투관침으로도 충분히 안전하게 위절제 수술이 시술될 수 있음이 증명되었고[29], 복강경에 비하여 적은 출혈, 더 많은 림프절 복구율, 낮은 재입원 비율을 보여서 초기 환자에서 환자에게 도움이 될 가능성이 높음을 보였다[38]. 그리고 로봇은 형광 보조 수술에도 이용될 수 있음이 보고되었는데[39], 수술 전 날 내시경으로 종양의 위치를 내시경 클립으로 표시하면서 암 주변에 인도시아닌그린(indocyanine green)을 점막하에 주입하면 24시간 동안 위 주변 림프절에 침착되어 다음날 수술 중 fire-fly라는 적외선 카메라 시스템으로 인도시아닌그린이 림프절에 침착되어 수술 중 림프절을 가시화하게 됨으로써 더 많은 림프절을 더 안전하게 절제 가능할 수 있는 되는 것이다. 위암에서 로봇의 사용에 있어 현재의 주된 연구는 복강경보다 안전한 수술임을 확인하는 연구, 축소 포트 또는 SP를 이용한 축소 포트 수술, fire-fly를 이용한 형광 보조 수술의 응용에 모아지고 있다.

간담체외과

간담체 영역에서의 로봇 수술은 타영역에 비해 최근 들어 증가하기 시작하였는데, 이는 긴 수술시간 및 술기가 복

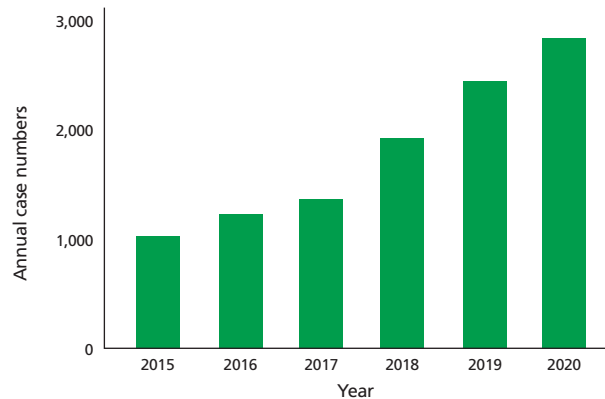


Figure 3. Annual number of robotic hepato-biliary-pancreatic surgery performed in Korea.

잡한 간담체 영역의 수술 특성상 복강경 수술의 표준화가 타영역에 비해 늦게 정립되었기 때문이다(Figure 3) [40]. 하지만 간담체 영역 로봇 수술의 역사는 그렇게 짧지만은 않다. 이는 간담체 영역의 수술 중 비교적 흔하면서도 수술 시간이 짧은 수술인 담낭절제술이 있기 때문인데, 이 수술은 새로운 술기의 도입에 적절한 수술이기에 복강경 수술의 도입 때와 마찬가지로 간담체 영역의 로봇 수술은 로봇 담낭절제술로부터 시작되었다[41].

1997년 벨기에의 Jacques Himpens 박사가 처음으로 다빈치 시스템을 이용한 로봇 담낭절제술을 보고함으로써 간담체 영역의 로봇 수술의 역사가 시작되었다[42]. 국내에서는 2005년 7월 13일 한국 식품의약품안전처의 다빈치 도입 및 사용 승인이 이루어졌으며, 이로부터 2일 후 국내 최초의 간담체 영역의 로봇 수술인 로봇 담낭절제술이 세브란스병원에서 시행되었다[43]. 로봇 담낭절제술도 도입 당시에는 다공시스템(multi-port system)이었지만 최근에는 단일공시스템(SP system)의 도입으로 배꼽에 2.5 cm 정도의 절개창으로도 담낭절제술이 이루어질 수 있게 되어 어느 정도 표준화된 술기가 되었다[44]. 현재 담낭절제술은 간담체 영역에서 이루어지는 로봇 수술의 많은 부분을 차지하고 있다.

로봇 간절제술 영역의 발전도 복강경 간절제술의 발전과 비슷한 길을 걸었다. 초창기 복강경 간절제술의 도입 시 간 구역에 따라 간절제술의 난이도를 정의하였으며, 이에 따라 상대적으로 접근이 용이한 간 좌엽의 수술부터 시도되

었다[45]. 로봇 간절제술도 좌외측구역절제술(left lateral sectionectomy)부터 시작하여 점차 그 적응증이 확대되어 최근에는 간이식 시 공여자 간절제술(donor hepatectomy)도 로봇으로 시행되고 있다[46]. 공여자 간절제술은 공여자의 안전을 위협하지 않는 선에서 최대한 이식이 용이하게 혈관, 담도와 같은 구조물을 적출해야 하는데 로봇을 통한 섬세한 위치 선정 및 간절제를 통해 공여자의 안전에도 도움을 주고 있다[47]. 이렇게 로봇 간절제술의 적응증은 거의 모든 간수술로 확장되었지만, 아이러니하게도 아직까지 cavitron ultrasonic surgical aspirator와 같은 간 절제기가 현재 로봇기계에는 구현되어있지 않다[48]. 현재 수술 시 간 절제는 초음파 기반의 기구를 바탕으로 진행되고 있어 추후 이런 점이 개선 된다면 간절제 영역에서 로봇 수술이 더욱 더 발전할 수 있을 것이다.

로봇 췌장절제술의 도입은 췌장이라는 섬세하게 다루어져야 하는 장기 특성상 복강경으로 하기 어렵고, 합병증이 높은 술기를 대체할 수 있을 것으로 기대하였다. 예를 들어, 비장보존췌미부절제술(spleen preserving distal pancreatectomy) 시 비장 보존을 위해서 비장동맥과 비장정맥을 보존해야 하는데 췌장의 해부학적 특성상 비장정맥을 췌장이 공유하여 많은 관통혈관들이 췌장으로 들어가기에 이를 복강경으로 각각 결찰하며 췌미부절제술을 시행하는 것이 쉽지 않았으며, 복강경으로는 출혈 조절 및 비장보존율이 기대만큼 높지는 않았었다[49]. 로봇 수술의 도입으로 이런 문제들이 많이 해결되었는데, 문헌에 따르면 로봇 수술이 복강경 수술에 비해 비장 보존 췌미부절제술 시행 시 출혈도 적으며, 비장을 보존할 수 있는 비율도 높았다[50]. 다만 최근에는 복강경술기도 많이 발전하여 최근 문헌에서는 이러한 격차가 많이 줄어들기는 하였다[51]. 하지만 췌장 낭종의 적출술과 같이 췌장 실질을 보존하는 수술에서는 여전히 로봇 수술이 강점을 가지고 있다[52].

이런 로봇 수술의 장점을 극대화할 수 있는 영역 중 하나가 췌두부십이지장절제술(pancreaticoduodenectomy)이다. 복강경 췌두부십이지장절제술 시 가장 어려우면서 문제가 되는 부분이 문합이다[53]. 복강경으로 문합을 시행 시 포트의 위치상 일부 영역에서는 이상적인 각도가 나오

지 않는다[54]. 이를 해결하기 위한 여러 술기들이 제시되긴 하였지만, 로봇이 복강경에 비해 관절 자유도가 높기 때문에 문합을 더 정확하고 안전하게 할 수 있다[55]. 아직까지 복강경 췌두부십이지장절제술이 수술의 어려움으로 인해 일부 기관에서만 시행되는 수술이라면 로봇 수술은 이러한 허들을 낮출 수 있는 대안이 될 수도 있겠다[56].

이렇게 간담췌 영역의 로봇 수술은 로봇 담낭절제술을 시작으로 하여 점점 더 그 적응증이 간, 담췌 영역의 많은 수술로 확장되어 현재에 이르게 되었다. 최근에는 증례 논문이긴 하지만 담관 종양 환자에서 간췌두십이지장절제술(hepatopancreaticoduodenectomy)을 로봇으로 시행한 사례도 보고되어 있어 이론적으로는 간담췌 영역의 모든 수술은 로봇으로 시행할 수 있음을 알 수 있다[57]. 다만 아직은 로봇 기기의 보급 및 술기의 일반화가 이루어지지 않은 상황으로 간담췌 영역에서 로봇 수술이 정착하기까지는 조금 더 시간이 필요해 보인다.

대장항문외과

복강경 수술은 기존의 개복 수술과 비교하여 절개창을 최소화하여 수술 후 통증이 적어 빠른 회복 및 입원기간을 단축하였고 복강경을 통한 확대 시야로 세밀한 수술을 할 수 있는 등의 여러 장점으로 대장암에서도 최소침습수술의 근간이 되었다[58,59]. 하지만 복강경 직장암 수술은 골반이 좁거나, 종양이 큰 경우 수술 시야의 확보가 어렵고, 직선 형태인 복강경 기구를 자유자재로 사용하기가 어려워 수술 과정이 쉽지 않기 때문에 좁은 공간에서 입체 시야를 제공하고 사용하는 기구의 움직임이 마치 수술자의 손목 동작과 같이 구현할 수 있는 로봇 수술이 직장암 수술에서 주목을 받게 되었다[60]. 대장암의 로봇 수술의 빈도는 증가하고 있으며(Figure 4), 전 세계적으로 결장암과 직장암의 수술이 로봇 수술의 각각 절반씩을 차지하고 있지만 한국에서 시행되는 대장항문외과 로봇 수술의 90% 이상은 직장암 수술이다.

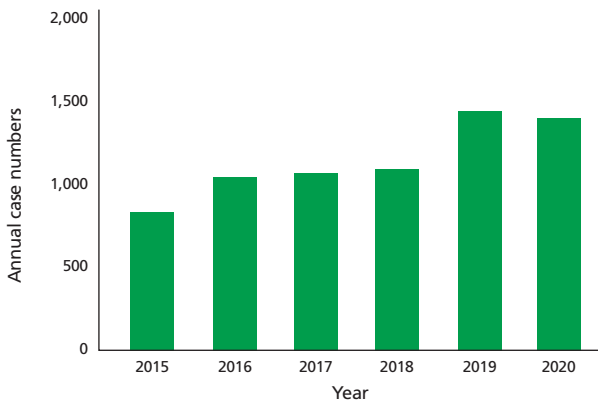


Figure 4. Annual number of robotic colorectal surgery performed in Korea.

1. 로봇 결장암 수술

2002년 로봇 결장암 수술에 대한 첫 보고 이후 여러 연구에서 안전성과 적용 가능성을 보고했다[61,62]. 그러나 이러한 보고의 대부분은 후향적 연구의 결과이며 2009년 발표된 결장암에서 로봇 수술과 복강경 수술의 장단기 성적을 비교한 전향적 임상 연구의 결과는 두 군의 차이는 없었지만 제한된 대상자수를 대상으로 진행한 연구로 결론을 도출하기에는 한계가 있다[63].

최근에는 전향적 임상연구가 아닌 대규모 데이터베이스를 기반으로 한 연구가 보고되었다. 2013년부터 2015년까지 미국외과의사협회(American College of Surgeons)의 National Surgical Quality Improvement Program 데이터에서 로봇 3,864건과 복강경 결장절제술 40,063건을 비교 분석하였다. 이 연구에서 로봇 결장절제술이 복강경 결장절제술보다 더 낮은 개복술 전환율과 더 짧은 입원기간을 보고하였다[64].

국내에서 로봇 결장절제술은 복강경 결장절제술에 비해 가격이 비싸고 명확한 장점이 밝혀지지 않아 로봇 직장암 절제술보다 수술 횟수가 적다. 따라서 일본에서 진행하고 있는 결장암 로봇 수술에 대한 다국적 전향적 연구(Japan Registry of Clinical Trials [JRCT] 1032190036: evaluation for the safety of robotic-assisted colectomy for rectal colon cancer: a multi-institutional, prospective, historical controlled, feasibility study)의 결과가 기대된다.

2. 로봇 직장암 수술

로봇 수술은 좁은 골반강에 위치하며 기능적으로 중요한 신경과 혈관으로 둘러싸인 직장을 섬세하게 수술할 수 있으며, 직장암절제술 후 수술 후 배뇨장애를 감소시키는 등 기능 보존에 탁월하다[65]. 한편, 직장암에 대한 로봇 대 복강경 수술의 무작위대조시험 결과는 하나뿐이며, 이 연구는 2011년에서 2014년 사이에 전 세계 10개국 29개 센터에서 40명의 외과사가 참여하여 1,276명의 환자를 등록했으며, 로봇 그룹과 복강경 그룹에 각각 471명의 환자가 무작위로 할당되었다. 1차 평가 변수인 개복술로의 전환율은 두 그룹 간 통계적으로 유의한 차이가 없었다[66,67]. 소그룹 분석 결과 남성, 비만 환자, 전하방절제술 등 상대적으로 어려운 수술에서 로봇군의 개복술로의 전환율이 유의하게 낮아 어려운 케이스에서 로봇 수술의 가치가 높음을 시사했다. 또한 로봇 수술에 대한 학습곡선 효과의 민감도 분석은 외과사가 로봇 수술을 많이 할수록 복강경 수술보다 전환율이 더 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 본 연구의 결과는 로봇 수술의 임상적 이점이 제한적일 수 있음을 시사한다. 하지만 기술의 혁신과 비용 절감으로 단점을 극복한다면 로봇 직장암 수술은 더욱 발전할 수 있을 것이다.

결론

복강경은 개복 수술에서 일대 혁신을 가져왔고 많은 장점을 가지고 있지만, 단점을 극복하는 과정에서 로봇이 사용되었다. 사실 비용 차이가 많이 나기 때문에 복강경과 로봇이 다른 수술처럼 인식되지만 로봇은 복강경의 한 종류이며 복강경의 단점을 보완한 복강경 2.0 버전이라고 생각할 수 있겠다. 하지만 로봇이 복강경의 단점을 보완했다고 해서, 그리고 외과사가 수술을 더 편하게 수행한다는 다소 주관적인 장점이 더욱 우수한 임상결과로 객관적인 지표까지 변화시킬 정도는 아니었다. 다시 말해서, 아직까지는 더 비싼 로봇 수술이 모든 면에서 더 좋은 결과를 내지는 않았다. 그러므로 로봇이 장점을 낼 수 있는 수술 술기나 환자군을 발굴하는 작업이 필요하다. 한편 최적의 기구

를 사용하고 술기를 끊임없이 개선하는 것이 외과의사의 역할이다. 기존에 개발된 로봇 외에 최근 개발된 장치들은 축소 포트, 형광조영 수술(fluorescence guided surgery), 또 다른 방식의 축소 포트(SP) 시스템들이 있다. 이 기구들은 수술의 가장 이상적인 상태, 최소한의 외과적 충격을 환자에게 주면서 림프절 절제를 광범위하고, 안전하게 하며, 더 낮은 합병증과 적은 외과적 반흔을 남기는 데 도움이 될 것으로 생각된다. 최근 로봇(SP)은 유방암 수술에도 응용되고 있는데[68], 이는 새로운 기구를 이용하여 환자에게 도움이 되는 새로운 수술 술기를 개발한 좋은 예라고 할 수 있겠다. 이러한 로봇이 현재로서는 미국 Intuitive Surgical 회사의 독점적인 공급이 되고 있는데 다행스러운 것은 미래컴퍼니라는 한국 회사도 로봇을 만들고 임상에서 전립샘절제술 28건, 췌십이지장절제술 9건, 담낭절제술 110건, 저위전방절제술 10건, 자궁절제술 8건, 낭샘종절제 10건을 완료하였고, 현재까지는 단 2대의 기계만 병원에 설치되어 임상에서 사용되고 있다[69]. 환자에게 더 많은 편익을 줄 수 있는 수술을 위해서는 좋은 기구를 개발하는 연구진과 좋은 응용을 위한 외과의사의 노력이 필요하며, 많은 사람이 노력하고 있는 한국 외과 의학은 혁신의 현장이 되어가고 있다.

찾아보기말: 로봇수술; 내분비수술; 위장관수술; 결장직장수술

ORCID

Jun Kyong Kim, <https://orcid.org/0000-0001-5121-8462>
 Seung Yoon Yang, <https://orcid.org/0000-0001-8129-7712>
 Sung Hyun Kim, <https://orcid.org/0000-0001-7683-9687>
 Hyoung-Il Kim, <https://orcid.org/0000-0002-6134-4523>

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Inabnet WB 3rd, Jacob BP, Gagner M. Minimally invasive endoscopic thyroidectomy by a cervical approach. *Surg Endosc* 2003;17:1808-1811.
- Yoon JH, Park CH, Chung WY. Gasless endoscopic thyroidectomy via an axillary approach: experience of 30 cases. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech* 2006;16:226-231.
- Lee KE, Rao J, Youn YK. Endoscopic thyroidectomy with the da Vinci robot system using the bilateral axillary breast approach (BABA) technique: our initial experience. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech* 2009;19:e71-e75.
- Singer MC, Seybt MW, Terris DJ. Robotic facelift thyroidectomy: I. Preclinical simulation and morphometric assessment. *Laryngoscope* 2011;121:1631-1635.
- Kim HY, Chai YJ, Dionigi G, Anuwong A, Richmon JD. Transoral robotic thyroidectomy: lessons learned from an initial consecutive series of 24 patients. *Surg Endosc* 2018;32:688-694.
- Kang SW, Lee SC, Lee SH, Lee KY, Jeong JJ, Lee YS, Nam KH, Chang HS, Chung WY, Park CS. Robotic thyroid surgery using a gasless, transaxillary approach and the da Vinci S system: the operative outcomes of 338 consecutive patients. *Surgery* 2009;146:1048-1055.
- Chang EH, Kim HY, Koh YW, Chung WY. Overview of robotic thyroidectomy. *Gland Surg* 2017;6:218-228.
- Kandil E, Attia AS, Hadedeya D, Shihabi A, Elnahla A. Robotic thyroidectomy: past, future, and current perspectives. *Otolaryngol Clin North Am* 2020;53:1031-1039.
- Piccoli M, Mullineris B, Santi D, Gozzo D. Advances in robotic transaxillary thyroidectomy in Europe. *Curr Surg Rep* 2017;5:17.
- Kang SW, Jeong JJ, Yun JS, Sung TY, Lee SC, Lee YS, Nam KH, Chang HS, Chung WY, Park CS. Gasless endoscopic thyroidectomy using trans-axillary approach; surgical outcome of 581 patients. *Endocr J* 2009;56:361-369.
- Miccoli P, Bellantone R, Mourad M, Walz M, Raffaelli M, Berti P. Minimally invasive video-assisted thyroidectomy: multiinstitutional experience. *World J Surg* 2002;26:972-975.
- Kang SW, Jeong JJ, Yun JS, Sung TY, Lee SC, Lee YS, Nam KH, Chang HS, Chung WY, Park CS. Robot-assisted endoscopic surgery for thyroid cancer: experience with the first 100 patients. *Surg Endosc* 2009;23:2399-2406.
- Lee S, Ryu HR, Park JH, Kim KH, Kang SW, Jeong JJ, Nam KH, Chung WY, Park CS. Excellence in robotic thyroid surgery: a comparative study of robot-assisted versus conventional endoscopic thyroidectomy in papillary thyroid microcarcinoma patients. *Ann Surg* 2011;253:1060-1066.
- Lee J, Lee JH, Nah KY, Soh EY, Chung WY. Comparison of endoscopic and robotic thyroidectomy. *Ann Surg Oncol* 2011;18:1439-1446.
- Lee J, Kang SW, Jung JJ, Choi UJ, Yun JH, Nam KH, Soh EY, Chung WY. Multicenter study of robotic thyroidectomy:

- short-term postoperative outcomes and surgeon ergonomic considerations. *Ann Surg Oncol* 2011;18:2538-2547.
16. Lee SG, Lee J, Kim MJ, Choi JB, Kim TH, Ban EJ, Lee CR, Kang SW, Jeong JJ, Nam KH, Jo YS, Chung WY. Long-term oncologic outcome of robotic versus open total thyroidectomy in PTC: a case-matched retrospective study. *Surg Endosc* 2016;30:3474-3479.
 17. Kim MJ, Lee J, Lee SG, Choi JB, Kim TH, Ban EJ, Lee CR, Kang SW, Jeong JJ, Nam KH, Jo YS, Chung WY. Transaxillary robotic modified radical neck dissection: a 5-year assessment of operative and oncologic outcomes. *Surg Endosc* 2017;31:1599-1606.
 18. Kim JK, Lee CR, Kang SW, Jeong JJ, Nam KH, Chung WY. Robotic transaxillary lateral neck dissection for thyroid cancer: learning experience from 500 cases. *Surg Endosc* 2021 May 27 [Epub]. <https://doi.org/10.1007/s00464-021-08526-7>.
 19. Lee J, Yun JH, Nam KH, Soh EY, Chung WY. The learning curve for robotic thyroidectomy: a multicenter study. *Ann Surg Oncol* 2011;18:226-232.
 20. Park JH, Lee J, Hakim NA, Kim HY, Kang SW, Jeong JJ, Nam KH, Bae KS, Kang SJ, Chung WY. Robotic thyroidectomy learning curve for beginning surgeons with little or no experience of endoscopic surgery. *Head Neck* 2015;37:1705-1711.
 21. Lorincz BB, Busch CJ, Mockelmann N, Knecht R. Initial learning curve of single-incision transaxillary robotic hemi- and total thyroidectomy: a single team experience from Europe. *Int J Surg* 2015;18:118-122.
 22. Ruhle BC, Ferguson Bryan A, Grogan RH. Robot-assisted endocrine surgery: indications and drawbacks. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A* 2019;29:129-135.
 23. Kim K, Kang SW, Kim JK, Lee CR, Lee J, Jeong JJ, Nam KH, Chung WY. Robotic transaxillary hemithyroidectomy using the da Vinci SP robotic system: initial experience with 10 consecutive cases. *Surg Innov* 2020;27:256-264.
 24. Takiguchi S, Fujiwara Y, Yamasaki M, Miyata H, Nakajima K, Sekimoto M, Mori M, Doki Y. Laparoscopy-assisted distal gastrectomy versus open distal gastrectomy. A prospective randomized single-blind study. *World J Surg* 2013;37:2379-2386.
 25. Kim YW, Baik YH, Yun YH, Nam BH, Kim DH, Choi IJ, Bae JM. Improved quality of life outcomes after laparoscopy-assisted distal gastrectomy for early gastric cancer: results of a prospective randomized clinical trial. *Ann Surg* 2008;248:721-727.
 26. Kim HI, Han SU, Yang HK, Kim YW, Lee HJ, Ryu KW, Park JM, An JY, Kim MC, Park S, Song KY, Oh SJ, Kong SH, Suh BJ, Yang DH, Ha TK, Kim YN, Hyung WJ. Multicenter prospective comparative study of robotic versus laparoscopic gastrectomy for gastric adenocarcinoma. *Ann Surg* 2016;263:103-109.
 27. Uyama I, Suda K, Nakauchi M, Kinoshita T, Noshiro H, Takiguchi S, Ehara K, Obama K, Kuwabara S, Okabe H, Terashima M. Clinical advantages of robotic gastrectomy for clinical stage I/II gastric cancer: a multi-institutional prospective single-arm study. *Gastric Cancer* 2019;22:377-385.
 28. Hosoda K, Mieno H, Ema A, Ushiku H, Washio M, Song I, Watanabe M, Yamashita K. Safety and Feasibility of Robotic Distal Gastrectomy for Stage IA Gastric Cancer: A Phase II Trial. *J Surg Res* 2019;238:224-231.
 29. Lee S, Kim JK, Kim YN, Jang DS, Kim YM, Son T, Hyung WJ, Kim HI. Safety and feasibility of reduced-port robotic distal gastrectomy for gastric cancer: a phase I/II clinical trial. *Surg Endosc* 2017;31:4002-4009.
 30. Tokunaga M, Makuuchi R, Miki Y, Tanizawa Y, Bando E, Kawamura T, Terashima M. Late phase II study of robot-assisted gastrectomy with nodal dissection for clinical stage I gastric cancer. *Surg Endosc* 2016;30:3362-3367.
 31. Tokunaga M, Sugisawa N, Kondo J, Tanizawa Y, Bando E, Kawamura T, Terashima M. Early phase II study of robot-assisted distal gastrectomy with nodal dissection for clinical stage IA gastric cancer. *Gastric Cancer* 2014;17:542-547.
 32. Kim YW, Reim D, Park JY, Eom BW, Kook MC, Ryu KW, Yoon HM. Role of robot-assisted distal gastrectomy compared to laparoscopy-assisted distal gastrectomy in suprapancreatic nodal dissection for gastric cancer. *Surg Endosc* 2016;30:1547-1552.
 33. Shen W, Xi H, Wei B, Cui J, Bian S, Zhang K, Wang N, Huang X, Chen L. Robotic versus laparoscopic gastrectomy for gastric cancer: comparison of short-term surgical outcomes. *Surg Endosc* 2016;30:574-580.
 34. Suda K, Man-I M, Ishida Y, Kawamura Y, Satoh S, Uyama I. Potential advantages of robotic radical gastrectomy for gastric adenocarcinoma in comparison with conventional laparoscopic approach: a single institutional retrospective comparative cohort study. *Surg Endosc* 2015;29:673-685.
 35. Yang SY, Roh KH, Kim YN, Cho M, Lim SH, Son T, Hyung WJ, Kim HI. Surgical outcomes after open, laparoscopic, and robotic gastrectomy for gastric cancer. *Ann Surg Oncol* 2017;24:1770-1777.
 36. Choi S, Song JH, Lee S, Cho M, Kim YM, Hyung WJ, Kim HI. Surgical merits of open, laparoscopic, and robotic gastrectomy techniques with D2 lymphadenectomy in obese patients with gastric cancer. *Ann Surg Oncol* 2021 Apr 8 [Epub]. <https://doi.org/10.1245/s10434-021-09952-6>.
 37. Kinoshita T, Sato R, Akimoto E, Tanaka Y, Okayama T, Habu T. Reduction in postoperative complications by robotic surgery: a case-control study of robotic versus conventional laparoscopic surgery for gastric cancer. *Surg Endosc* 2021 Apr 12 [Epub]. <https://doi.org/10.1007/s00464-021-08483-1>.
 38. Roh CK, Choi S, Seo WJ, Cho M, Choi YY, Son T, Hyung WJ, Kim HI. Comparison of surgical outcomes between

- integrated robotic and conventional laparoscopic surgery for distal gastrectomy: a propensity score matching analysis. *Sci Rep* 2020;10:485.
39. Kwon IG, Son T, Kim HI, Hyung WJ. Fluorescent Lymphography-Guided Lymphadenectomy During Robotic Radical Gastrectomy for Gastric Cancer. *JAMA Surg* 2019;154:150-158.
 40. Kovid N, Han HS, Yoon YS, Cho JY. Advanced laparoscopic HPB surgery: experience in Seoul National University Bundang Hospital. *Ann Gastroenterol Surg* 2020;4:224-228.
 41. Litynski GS. Erich Muhe and the rejection of laparoscopic cholecystectomy (1985): a surgeon ahead of his time. *JLSLS* 1998;2:341-346.
 42. Himpens J, Leman G, Cadiere GB. Telesurgical laparoscopic cholecystectomy. *Surg Endosc* 1998;12:1091.
 43. Kang CM, Chi HS, Hyeung WJ, Kim KS, Choi JS, Lee WJ, Kim BR. The first Korean experience of telemanipulative robot-assisted laparoscopic cholecystectomy using the da Vinci system. *Yonsei Med J* 2007;48:540-545.
 44. Cruz CJ, Yang HY, Kang I, Kang CM, Lee WJ. Technical feasibility of da Vinci SP single-port robotic cholecystectomy: a case report. *Ann Surg Treat Res* 2019;97:217-221.
 45. Lee MK 4th, Gao F, Strasberg SM. Completion of a liver surgery complexity score and classification based on an international survey of experts. *J Am Coll Surg* 2016;223:332-342.
 46. Choi SB, Park JS, Kim JK, Hyung WJ, Kim KS, Yoon DS, Lee WJ, Kim BR. Early experiences of robotic-assisted laparoscopic liver resection. *Yonsei Med J* 2008;49:632-638.
 47. Rho SY, Lee JG, Joo DJ, Kim MS, Kim SI, Han DH, Choi JS, Choi GH. Outcomes of robotic living donor right hepatectomy from 52 consecutive cases: comparison with open and laparoscopy-assisted donor hepatectomy. *Ann Surg* 2020 Jul 8 [Epub]. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000004067>.
 48. Peters BS, Armijo PR, Krause C, Choudhury SA, Oleynikov D. Review of emerging surgical robotic technology. *Surg Endosc* 2018;32:1636-1655.
 49. Nishino H, Zimmitti G, Ohtsuka T, Abu Hilal M, Goh BKP, Kooby DA, Nakamura Y, Shrikhande SV, Yoon YS, Ban D, Nagakawa Y, Nakata K, Endo I, Tsuchida A, Nakamura M; Study group of Precision Anatomy for Minimally Invasive Hepato-Biliary-Pancreatic surgery (PAM-HBP surgery). Precision vascular anatomy for minimally invasive distal pancreatectomy: a systematic review. *J Hepatobiliary Pancreat Sci* 2021 Feb 1 [Epub]. <https://doi.org/10.1002/jhbp.903>.
 50. Choi SH, Kang CM, Lee WJ, Chi HS. Robot-assisted spleen-preserving laparoscopic distal pancreatectomy. *Ann Surg Oncol* 2011;18:3623.
 51. Rompianesi G, Montalti R, Ambrosio L, Troisi RI. Robotic versus laparoscopic surgery for spleen-preserving distal pancreatectomies: systematic review and meta-analysis. *J Pers Med* 2021;11:552.
 52. Shi Y, Peng C, Shen B, Deng X, Jin J, Wu Z, Zhan Q, Li H. Pancreatic enucleation using the da Vinci robotic surgical system: a report of 26 cases. *Int J Med Robot* 2016;12:751-757.
 53. Kang CM, Lee SH, Chung MJ, Hwang HK, Lee WJ. Laparoscopic pancreatic reconstruction technique following laparoscopic pancreaticoduodenectomy. *J Hepatobiliary Pancreat Sci* 2015;22:202-210.
 54. Navarro JG, Kang CM. Pitfalls for laparoscopic pancreaticoduodenectomy: need for a stepwise approach. *Ann Gastroenterol Surg* 2019;3:254-268.
 55. Napoli N, Kauffmann EF, Vistoli F, Amorese G, Boggi U. State of the art of robotic pancreatoduodenectomy. *Updates Surg* 2021;73:873-880.
 56. Rosemurgy A, Ross S, Bourdeau T, Craigg D, Spence J, Alvir J, Sucandy I. Robotic pancreaticoduodenectomy is the future: here and now. *J Am Coll Surg* 2019;228:613-624.
 57. Chong EH, Choi SH. Hybrid laparoscopic and robotic hepatopancreaticoduodenectomy for cholangiocarcinoma. *J Gastrointest Surg* 2019;23:1947-1948.
 58. Kang SB, Park JW, Jeong SY, Nam BH, Choi HS, Kim DW, Lim SB, Lee TG, Kim DY, Kim JS, Chang HJ, Lee HS, Kim SY, Jung KH, Hong YS, Kim JH, Sohn DK, Kim DH, Oh JH. Open versus laparoscopic surgery for mid or low rectal cancer after neoadjuvant chemoradiotherapy (COREAN trial): short-term outcomes of an open-label randomised controlled trial. *Lancet Oncol* 2010;11:637-645.
 59. Clinical Outcomes of Surgical Therapy Study Group, Nelson H, Sargent DJ, Wieand HS, Fleshman J, Anvari M, Stryker SJ, Beart RW Jr, Hellinger M, Flanagan R Jr, Peters W, Ota D. A comparison of laparoscopically assisted and open colectomy for colon cancer. *N Engl J Med* 2004;350:2050-2059.
 60. Park EJ, Cho MS, Baek SJ, Hur H, Min BS, Baik SH, Lee KY, Kim NK. Long-term oncologic outcomes of robotic low anterior resection for rectal cancer: a comparative study with laparoscopic surgery. *Ann Surg* 2015;261:129-137.
 61. Weber PA, Merola S, Wasielewski A, Ballantyne GH. Telerobotic-assisted laparoscopic right and sigmoid colectomies for benign disease. *Dis Colon Rectum* 2002;45:1689-1694.
 62. Zerey M, Hawver LM, Awad Z, Stefanidis D, Richardson W, Fanelli RD; Members of the SAGES Guidelines Committee. SAGES evidence-based guidelines for the laparoscopic resection of curable colon and rectal cancer. *Surg Endosc* 2013;27:1-10.
 63. Park JS, Kang H, Park SY, Kim HJ, Woo IT, Park IK, Choi GS. Long-term oncologic after robotic versus laparoscopic right colectomy: a prospective randomized study. *Surg Endosc* 2019;33:2975-2981.
 64. Kulaylat AS, Mirkin KA, Puleo FJ, Hollenbeak CS, Messaris

- E. Robotic versus standard laparoscopic elective colectomy: where are the benefits? *J Surg Res* 2018;224:72-78.
65. Kim JY, Kim NK, Lee KY, Hur H, Min BS, Kim JH. A comparative study of voiding and sexual function after total mesorectal excision with autonomic nerve preservation for rectal cancer: laparoscopic versus robotic surgery. *Ann Surg Oncol* 2012;19:2485-2493.
66. Bolton WS, Chapman SJ, Corrigan N, Croft J, Collinson F, Brown JM, Jayne DG. the incidence of low anterior resection syndrome as assessed in an international randomized controlled trial (MRC/NIHR ROLARR). *Ann Surg* 2020 Feb 24 [Epub]. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000003806>.
67. Jayne D, Pigazzi A, Marshall H, Croft J, Corrigan N, Copeland J, Quirke P, West N, Rautio T, Thomassen N, Tilney H, Gudgeon M, Bianchi PP, Edlin R, Hulme C, Brown J. Effect of robotic-assisted vs conventional laparoscopic surgery on risk of conversion to open laparotomy among patients undergoing resection for rectal cancer: the ROLARR randomized clinical trial. *JAMA* 2017;318:1569-1580.
68. Ryu JM, Kim JY, Choi HJ, Ko BS, Kim J, Cho J, Lee MH, Choi JE, Kim JH, Lee J, Jung SM, Shin HJ, Lee J, Park HS. Robot-assisted nipple-sparing mastectomy with immediate breast reconstruction: an initial experience of the Korea Robot-Endoscopy Minimal Access Breast Surgery Study Group (KoREa-BSG). *Ann Surg* 2020 Sep 15 [Epub]. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000004492>.
69. Lim JH, Lee WJ, Choi SH, Kang CM. Cholecystectomy using the Revo-i robotic surgical system from Korea: the first clinical study. *Updates Surg* 2021;73:1029-1035.

Peer Reviewers' Commentary

이 논문은 우리나라 외과 각 분야에서 로봇수술의 역사 및 현재의 로봇수술 적용에 대해 이해하기 쉽도록 간략하게 정리하였고, 로봇수술의 장점과 한계점, 로봇수술의 미래 방향을 제시해 주고 있다. 외과 영역에서 가장 많은 로봇수술을 시행하는 분야인 내분비, 위장관, 간담체, 대장항문외과의 4개 과에서 현재 로봇수술의 의미와 앞으로의 응용성 및 발전 방향을 분석하여 설명하고 있다. 특히 로봇수술의 최근 연구 동향을 소개하면서 외과 영역에서 환자에게 더 많은 편의를 제공할 수 있도록 로봇수술이 강점을 갖는 수술 술기나 환자군 발굴 작업이 필요하다는 점을 제시하고 있다. 이 논문은 로봇수술에 관심이 많은 의사 및 수술을 받을 예정인 환자뿐만 아니라 새로운 의료기기를 개발하려는 기술자들에게도 많은 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

[정리: 편집위원회]