

로봇을 활용한 배전 활선공법 기술분석 및 적용 타당성 연구

Analysis and Applicability Assessment of Robotic Live-Line Electricity Distribution Technology

양 선 제* · 국 태 용* · 박 춘 식** · 서 인 용†
(Seon-Je Yang · Tae-Yong Kuc · Choon-Sik Park · In-Yong Seo)

Abstract - This paper analyzes robotic technology developed for live-line electricity distribution and its applicability to domestic environment. In doing so, available robotic systems developed for the live-line work are thoroughly investigated and compared in terms of from robotic functionality to economic feasibility. To assess the technology readiness for domestic live-line robot, the rubber gloves based direct live-line engineering methods have been also analyzed and mapped into robotic technology requisites. The results are expected as a fundamental data to help with solving the safety and economics issues when considering development and introduction of compact live-line robot for complex domestic electricity distribution environment.

Key Words : Live-Line electricity distribution, Rubber gloves direct Live-Line work, Indirect Live-Line robot

1. 서 론

전문 서비스 로봇기술은 배전선로의 활선작업 분야에서 대체 신공법 기술로서의 가능성을 1980년대부터 인정받아 왔다[1]. 그러나 지난 삼십년 이상 기간의 로봇기술 발달에 비추어볼 때 상대적으로 전 세계 활선작업 로봇의 개발 및 그 적용 사례는 매우 제한적이다. 예를 들면, 미국의 퀀타에너지 서비스의 조사에 의하면 로봇을 활선작업에 활용하는 회사들은 전체 활선작업 중 약 32%의 활선작업에만 로봇을 이용하고 있는 것으로 집계되었다[8]. 이는 매우 적은 수의 전력회사를 대상으로 하는 수요기업의 특수성으로 인한 낮은 경제성과 활선작업 공정의 높은 복잡도가 요인이다. 또한 활선작업 환경이 매우 열악하며 특히 비정형성과 시변 특성을 갖고 기후조건이나 외부 요인에도 많은 영향을 받기 때문이다. 이러한 경제적, 기술적, 환경적 요인들은 활선작업 로봇기술 발전을 지연시키고 기술개발의 난이도를 높일 뿐만 아니라 현장 적용 과정에서 극복해야 할 많은 기술적 문제를 제기한다. 하지만 다른 한편으로는 로봇기술이 활선작업에 적용될 경우 그만큼 많은 기술적 진보로 인한 장점과 혜택을 가져다줄 것을 의미한다.

80년대부터 전문 서비스 로봇의 활용 가능성을 염두에 두고

미국, 일본, 캐나다, 스페인, 프랑스 등에서 로봇기술을 활선작업에 도입하는 연구가 다양하게 진행되었다. 또한 국내에서는 2000년대에 이르러 전기공사협회, 원자력 연구원, KAIST 등에서 활선작업용 보조 로봇암 개발, 활선작업 로봇 원격제어 및 인터페이스 연구, 배전선로 검사로봇 개발 등이 진행된 바 있다. 한국전력의 통계자료에 따르면 지난 5년간 가장 빈도수가 높은 활선공정은 아래의 여섯 공정이다. 따라서 활선작업 로봇의 개발 및 이를 이용한 신공법 기술은 이들 공정을 대체할 수 있는 기술 수준을 요구한다.

표 1 활선공법 활용현황 ('11~'15년)

Table 1 Live-line electricity distribution usage status ('11~'15)
(단위 : 건)

구분	완철 교체	COS 교체	핀애자 교체	현수 애자 교체	전선 압축	전선 절단
전체	63,333	223,127	107,390	103,835	420,904	379,808
연평균	12,667	44,625	21,478	20,767	84,181	75,962

1.1 국외 활선작업 로봇기술 개발 동향 및 현황

미국에서 개발한 TOMCAT(Teleoperator for Operation, Maintenance, and Construction using Advanced Technology) 원격활선작업 로봇은 EPRI(ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE), PECO, SwRI(Southwest Research Institute)가 1979년부터 1983년까지 공동 개발한 138kV~765kV 선로용 1단계

† Corresponding Author : Smart Power Distribution Lab. KEPRI (KEPCO Electric Power Research Ins.), Korea.
E-mail: inyong.seo@kepco.co.kr

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Sungkyunkwan University, Korea .

** CEO of RSCUBE, Korea.

Received : June 26, 2018; Accepted: August 13, 2018

활선작업로봇을 발전시킨 2단계 연구결과물이다. 1984년에 개발을 시작하였으며 1985년부터 필드테스트를 거친 로봇이다. 광과 이버를 도입하였고 상용 로봇 암(KRAFT Telerobotics 社)을 개조하여 제작하였다. 최종 제품의 가격이 30만불 이하인 활선작업로봇을 개발하고자 하였다.

관타 로봇 암(QUANTA ROBOT ARM)은 관타에너지 서비스 및 관타기술에서 개발한 유압구동 방식 로봇 암으로 붐 트럭이나 크레인 차량에 장착하여 사용하는 로봇이다. 작업 가능한 활선라인의 최대전압은 500kV까지이며 지상에서 무선 원격조정 방식으로 조작한다. 이 로봇은 선로구조물수리 및 교체, 라인 스페이서 교체, 절연여자 교체, 전주 교체, 분기선 신설, 긴급 송배전 공사, 부하 플랜트 배전 수리 등 다양한 활선작업 공정에 활용되었다.

HYDRO-QUEBEC 활선작업 로봇은 HYDRO-QUEBEC 연구소에서 2000년까지 진행된 REFLEXE 프로젝트를 통하여 개발된 활선로봇이다. 한 쌍의 원격조작 유압구동로봇과 매우 긴 보조암으로 구성되며 붐위 캐빈에서 조이스틱 또는 마스터 제어기로 조작하고 선로 전압은 25kV(우천시 50kV 작업 방수 및 절연)에서 작업할 수 있다. 이 로봇은 회로차단기 개폐, 묶인 전선 풀기, 보호커버 장착과 같은 활선작업이 가능하다.

ROBTET 활선작업 로봇은 스페인 Madrid University와 Iberdrola, Cobra 공동으로 개발한 배전선로 유지보수를 위한 활선작업 로봇으로 230마력 붐 트럭에 장착되고 최대 전압 69kV의 선로를 대상으로 한다. 붐 트럭에는 유압펌프와 10kW 발전기가 구비되어 있으며 로봇은 차량의 캐빈에서 마스터-슬레이브 방식으로 반자동 원격조작 된다. 캐빈내 조작 인터페이스는 두 개의 포스피드백 6자유도 마스터 암을 사용하며 음성제어 스테레오 비전 영상 디스플레이, 멀티미디어 디스플레이, 마이크-외부스피커 및 위키토키 연결, 그 외 보조장치 등으로 구성된다. 슬레이브 암 플랫폼에는 통신 및 카메라를 위하여 최대 12시간 연속 공급이 가능한 차폐된 전원공급기가 설치되어 있다. 또한 로봇암의 툴을 자동 교체할 수 있도록 특수 툴박스도 장착되어 있다. 선단공구를 추가함으로써 대부분의 활선작업이 가능하다.

프랑스 전력청(EDF, Electricité de France)에서는 1989년에 헬리콥터를 이용한 전력선 네트워크 검사 및 유지보수, 활선 작업을 위한 부서를 창설하였지만 1993년에 활선 로봇 과제가 취소되었다. 이후 프랑스의 톰슨(THOMSON-CSF)과 일본 니소이와이(NISSHO-IWAI), 야스카와(YASKAWA) 등이 1990년대 후반 TST2000 컨소시엄을 구성하였으나 별다른 성과가 없다.

일본은 배전선로의 활선작업을 위한 로봇과 활선작업 보조를 위한 로봇암 개발이 활발하였다. 로봇암의 경우 hold arm, mechanical arm, load-balance arm이 있다. Hold arm은 배전선로의 활선작업 보조를 위하여 고안된 수동식 로봇 암으로 버킷에 장착된 형태로 사용한다. 작업자는 작업대상 전선이나 구조물을 잡고 지지할 수 있도록 홀드암의 선단부를 수동조작한 후 활선작업을 수행한다. 홀드암은 비교적 경량으로 제작되어 조작이 용이하지만 작업범위가 제한적이고 지지할 수 있는 하중도 작은 단점이 있다. Mechanical Arm은 북해도 전력 등 몇몇 전력회사에서 사용하고 있는 활선작업 보조 암으로 바이패스 케이블 등 주로

장력이 걸리지 않는 전선의 절단 및 연결작업시 이 보조 암을 이용하여 전선을 파지할 수 있다. 가격이 저렴하나 기능이 단순하여 활용성이 떨어지는 것으로 알려져 있다. Load-balance arm은 기능이나 적용작업이 홀드 암이나 mechanical arm보다 다양하여 대상물의 파지뿐만 아니라 전선의 절단 및 압착 등을 수행할 수 있고 그 구조도 선단공구부, 선단부 3자유도, 절연부 2자유도, 기본암부 3자유도로 세분화되어 있다. 따라서 선단공구를 작업에 따라 교체할 수 있으며 절연성능은 우천시 작업이 가능한 수준이다. 그러나 기능이 다양한 반면 상대적으로 가격이 비싼 단점이 있다.

일본의 활선작업 로봇으로는, 1980년대 KEPCO(Khushu Electric Power Company)에서 개발한 활선작업 로봇이 있다. 이 로봇은 적극적으로 활용하였으며 Phase 1(1989년) 과 Phase 2(1993년)를 개발하여 도입하였다. Phase 1은 2대의 전동-유압 혼용 7자유도 로봇을 붐 버킷에서 master-slave 방식으로 조작하도록 제작되었으며 Phase 2는 2대의 전동식 7자유도 로봇을 지상의 캐빈에서 조이스틱으로 원격조작하여 운용한다. 원격조작에 필요한 영상데이터와 거리센서 정보를 피드백하기 위하여 여러대의 음성명령 조작 카메라와 레이저 센서를 사용한다. 또한 Phase 2 로봇의 선단공구는 자동교환장치 (Automatic Tool Changer)를 장착하여 자동교환하는 기능을 부여하고 있다. 활선작업의 완전 자동화를 위하여 로봇이 자율적으로 작업을 수행할 수 있는 Phase 3 (2001년) 개발을 시작하였으나 아직 상세한 내용을 공개하지는 않고 있다. Phase 3 로봇을 위한 요소기술로 3차원 물체인식 및 모델링, 동작계획, 시각 피드백과 제어(시각 서보), 임피던스 제어(고전압 환경의 전동로봇에 힘피드백제어를 위한 토크센서 사용 불가) 등을 개발하고 있다.

그리고 일본은 1984년 동경전력에서 붐 캐빈조작 방식 활선작업 로봇과 지상원격조작 방식의 활선작업 로봇을 개발하였으며 이를 위해 Furukawa 전기, Fujikura, Toshiba, Aichi Sharyo 사 등과 공동 협력하였다. 활선작업 로봇을 위한 선단공구로 클램핑, 절단, 피박, 연마, 너트볼트 공구 등을 개발하였다. 이 외에도 AICHI사에서 만든 6.6kV 배전선로용 활선작업 로봇이 있으며, 이는 2 유압구동 원격조작 암을 붐 버킷에서 조작한다. SHIKOKU사에서 단일 유압구동 로봇암을 붐 버킷에서 조작가능한 활선작업 로봇을 개발하였다.



그림 1 관타 활선작업 로봇
Fig. 1 QUANTA, Live-line Robot



그림 2 톰캣 활선작업 로봇
Fig. 2 TOMCAT, Live-line Robot



그림 7 로드-밸런스 암
Fig. 7 Load-Balance Arm

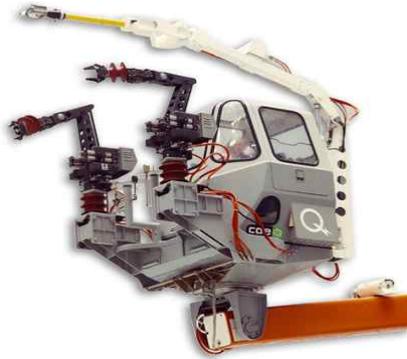
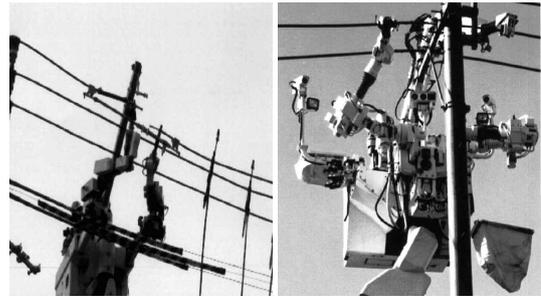


그림 3 Hydro-Quebec 활선작업 로봇
Fig. 3 Hydro-Quebec, Live-line Robot



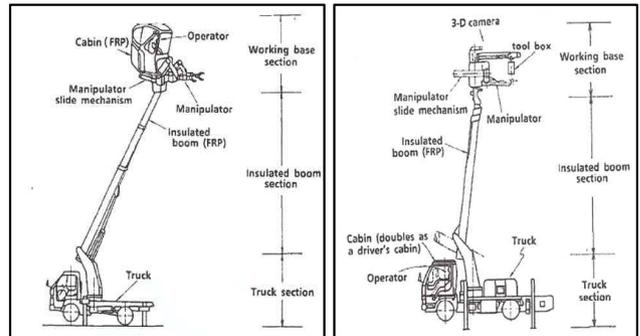
(a) (b)

그림 8 KEPCO 활선작업 로봇 : (a) Phase 1 로봇((b) Phase 2 로봇

Fig. 8 KEPCO, Live-line Robot : (a) Phase 1 robot, (b) Phase 2 robot



그림 4 ROBTET 활선작업 로봇
Fig. 4 ROBTET, Live-line Robot



(a) (b)

그림 9 동경전력 활선작업 로봇 : (a) Phase 1 type 로봇, (b) Phase 2 type 로봇

Fig. 9 TEPCO, Live-line Robot : (a) Phase 1 type robot, (b) Phase 2 type robot



그림 5 홀드 암
Fig. 5 Hold Arm



그림 6 메커니컬 암
Fig. 6 Mechanical Arm

1.2 국내 활선작업 로봇기술 개발 동향 및 현황

국내의 배전선로 활선작업 공정은 대부분 러버 글러브 직접활선 공법과 바이패스 공법, 사선 공법에 의존하고 있고 일부 간접

활선 공법으로 진행되어 왔다. 또한 직접 활선작업에 필요한 작업 공구나 보조 장비도 국내에서 제작되는 것은 일부이고 대부분 일본 등 외국으로부터 수입하여 사용하고 있다. 그러나 최근 가장 위험도가 높은 리버 글러브 직접활선 공법의 폐지가 공식화된 후 이를 대체할 공법의 개발 필요성에 따라 대체 공법으로 핫스틱, 특히 일본의 만능파지스틱을 발전시킨 스마트스틱 공법이 단기적으로 검토되고 있다. 이러한 간접활선 공법은 단기적으로 효용성이 있을 것으로 판단되나 장기적으로는 원격작업에 의한 작업자의 안전을 보장하는 자동화 장치 또는 원격제어 로봇을 이용한 반자동 또는 자동 활선로봇 공법을 위한 기술이 개발되어야 한다.

그동안 국내에서 진행된 최초의 활선작업 로봇 개발 프로젝트는 2001년 12월부터 2003년 11월까지 2년간 전기공사회 주관 및 산업자원부 지원으로 전기연구원이 함께 진행한 활선 작업용 보조암과 신공법 기술 개발과제이다[22]. 해당 과제에서는 유압으로 구동되는 활선작업 보조암과 함께 절단기, 압착기, 클램프, 장선기, 피박기 등 다섯 종류의 선단공구, 조이스틱 조작부 등이 설계 제작되었다.



그림 10 본체 및 보조암
Fig. 10 Body and Assistant Arm



그림 11 선단공구(클램프)
Fig. 11 Tip tool (Clamp)

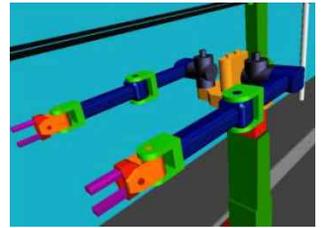


그림 17 활선작업 로봇 시스템의 그래픽모델링
Fig. 17 Graphic modeling of live-line robot system



그림 12 선단공구(절단기)
Fig. 12 Tip tool (Cutter)



그림 13 선단공구(압착기)
Fig. 13 Tip tool (Press)



그림 14 선단공구(장선기)
Fig. 14 Tip tool (Wire grip)



그림 15 선단공구(피박기)
Fig. 15 Tip tool (Sheath)

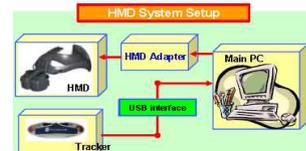


그림 18 활선작업로봇 인터페이스
Fig. 18 Interface of live-line robot

원자력연구원에서는 지식경제부 지원 전력산업연구개발의 일환으로 2003년 4월부터 2007년 2월까지 3년간 ‘배전선로 무정전 활선작업용 매니플레이터 로봇 및 신공법 기술개발’ 과제를 진행

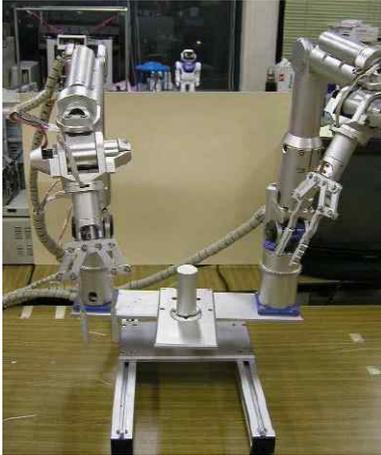


그림 19 실험실용 로봇 시스템
 Fig. 19 Laboratory robot system



그림 20 양팔형 활선로봇 조작 장치 (버킷 전면부)
 Fig. 20 Dual-arm live-line robot operating system (the front side of bucket)



그림 21 양팔형 활선작업 로봇
 Fig. 21 Dual-arm live-line robot

하였다[24]. 해당 과제에서는 활선차량의 버킷에 탑재하여 탑승자가 조작할 수 있는 양팔형 활선작업로봇과 클램핑 툴, 절단기 및 압착기 등 로봇에 탈부착 할 수 있는 선단 공구를 개발하였다. 또한 양팔형 활선로봇의 원격제어를 위한 경량 조이스틱 제어장치를 설계하여 제어편의성을 도모하였다.

1.3 운용 현황 분석 및 평가

국외의 경우, 최초로 활선작업 로봇을 개발한 미국의 경우



그림 22 양팔형 활선로봇 동작모습
 Fig. 22 Operating figure of dual-arm live-line robot

1980년대부터 꾸준한 기술개발과 현장적용을 통한 기술축적과 고도화가 이루어졌다고 볼 수 있다. 1987년 미국 전기 전력연구소(EPRI)를 중심으로 개발된 TOMCAT 로봇은 미국 KRAFT 사 압을 사용하고 있으며 국내뿐만 아니라 일본의 AICHI사의 활선 작업 로봇, 스페인 ROBTET 원격활선작업 로봇시스템에 채택되는 등 외국의 활선작업 로봇에도 적용되었다. 또한 QUANTA TECH 이 개발한 QUANTA ROBOT ARM(Line Master Robotic Arm)은 콰타에너지서비스(QUANTA ENERGIZED SERVICES) 회사의 전송 구조물 수리 및 교체, 절연애자 교체, 라인 스페이서 교체, 가지선 신설, 긴급 송전공사 등의 원격활선 작업에 활용되고 있다. 일본도 1980년대부터 북해도전력, 관서전력, 중부전력, 동경전력, 구주전력 등의 전력회사들이 홀드암, 미케니컬암, 로드 밸런스 암, 수퍼 암 등의 활선작업 보조로봇 뿐만 아니라 활선차량 버킷에 작업자가 탑승하여 제어하는 PHASE I 활선작업 로봇과 지상의 활선차량 내 캐빈에서 원격조작이 가능한 PHASE II 활선작업 로봇을 개발하여 활용하고 있다. 구주전력은 2000년대에 이르러 활선작업의 완전 자동화를 목표로 PHASE III 활선작업 로봇의 개발도 시작하였으나 아직 그 결과는 발표되지 않았다. 이와 같이 일본의 전력회사는 다양한 형태의 활선작업 로봇을 적극적으로 개발하여 활용하고 있는데 그 적용 작업 분야는 전선과지 및 절단, 피복제거, 슬리브 압착, 애자절거 및 개폐기 설치 등 대부분의 배전선로 유지보수 작업을 포함한다. 캐나다는 1990년대에 HYDRO-QUEBEC RESEARCH INSTITUTE에서 원격조작 유압구동로봇을 붐위 캐빈에서 조작하는 방식으로 개발 활용하고 있으며 LineROver 및 LineScout 라는 환선 검사로봇도 적용하고 있다. 프랑스는 EDF(Electricity de France) 주관으로 활선로봇과제제를 시도하고 취소한 이후에는 STH(Services Travaux Helipotes) 부서를 1989년에 창설하여 헬리콥터를 이용한 전력선 네트워크 검사 및 유지보수, 활선작업을 하고 있다. 스페인은 미국 KRAFT사의 로봇팔을 장착한 지상조작 원격활선작업 로봇인 ROBTET을 개발하여 운용하고 있으며 이 로봇을 활용한 특정한 활선작업을 수행할 경우 훈련을 받은 숙련된 조작자가 약 20분정도 소요되는 것으로 보고되고 있다.

위와 같이 해외 활선로봇 기술의 개발과 운용 현황, 사례 분석을 기초로 판단할 때 활선로봇 기술은 직접활선 공법에 대한 대체 간접활선 공법으로서 그 기술적 성숙도가 충분하다. 그러나 국내에 도입되기 위해서는 우선 국내 배전선로 환경에 대한 적합성과 표준 활선공법의 적용 가능성, 국내 배전선로의 활선작업

용역업체 등을 대상으로 하는 경제성과 안전성 등에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

국내의 경우, 1990년대부터 활선작업차와 고무장구와 글러브를 이용한 직접활선작업 공법이 도입된 이후 최근까지 배전선로의 유지보수에 적용되고 있으나 이를 개선하기 위하여 진행된 2000년대 초 기술개발과제의 결과물인 배전선로 활선작업용 보조암과 원격제어 시스템 및 인터페이스, 양팔로봇 등의 상용화 및 활선작업 적용은 전혀 이루어지지 않은 실정이다.

먼저 한국전기공사에서 개발한 배전선로 활선작업용 보조암의 경우 전선의 절단기 및 피박기, 압착기, 클램프, 장선기 등의 다섯 종류의 선단공구를 사용할 수 있으므로 직접 표준활선공법 중 많은 부분 공정을 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 그동안 고무장구를 이용한 직접활선공법과 비교할 때 경제성과 작업의 편의성이 떨어지고 특히 대부분의 공사업체의 영세성 등 여러 가지 이유로 도입되지 못하기는 하였지만 보조암을 활용한 활선공법 절차서는 마련되어 있다.

그러나 현장적용을 염두에 둔 활선작업 보조 로봇암의 공정 절차서까지 준비되었음에도 불구하고 보조암의 무게 및 크기로 인한 조작의 어려움과 근거리 작업으로 인한 안전성의 미흡, 특히 높은 가격으로 인한 낮은 가성비로 경제성을 확보하지 못한 것으로 평가된다.

활선작업 관련 기술개발 과제인 과학기술원에서 개발한 활선작업로봇 원격제어시스템과 인터페이스도 현장에 실적용되기 위해서는 고도화 및 현장 실증 과정을 거쳐야하나 이루어지지 못하고 실험실 수준의 과제로 종료되었다.

또한 원자력연구원에서 개발된 양팔형 활선작업 로봇도 목업 배전선로 환경에서 실험 검증을 하였지만 제품화되지는 못하였다. 양팔 활선작업 로봇은 배전선로 활선작업 로봇의 연구가 열악한 국내 로봇개발 연구로는 비교적 혁신적인 시도였으나 배전선로 적용에 필요한 현장 실증 과정 및 신뢰성 확보의 부재, 비싼 가격으로 인한 경제성의 미확보 및 크고 무거운 로봇으로 인한 운용의 어려움, 버티 내 근접 작업으로 인한 작업 안전성 확보의 미흡 등 여러 가지 요인으로 연구개발 결과가 배전선로 작업 현장에 활용되지 못하였다.

미국과 일본 등 선진국의 활선작업 로봇이 1980년대부터 개발이 시작되었고 30년 이상 현장 실증을 거쳐서 고도화되는 과정을 거쳐 오늘에 이른 것에 비추어 볼 때 위와 같은 국내 기술개발 과제의 결과물을 단기간에 신뢰성을 확보하고 제품화하여 배전선로 작업 현장에 적용할 수 없으리라는 것은 자명하다. 따라서 국내 활선작업로봇 기술의 확보와 직접활선 공법의 대체 실용화를 위해서는 단기적으로 적용할 수 있는 간접활선공법의 확보와 더불어 중장기적인 기술개발 전략의 수립, 점진적이고 꾸준한

기술개발을 통한 실증 및 고도화 과정이 필요하다고 판단된다.

2. 본 론

2.1 활선작업 공정 분석

배전선로의 활선작업은 수용가에 전력을 공급하는 선로를 무정전 상태에서 유지보수 및 관리하기 위한 작업방식으로 직접활선 공법과 간접활선 공법, 바이패스 공법 등이 있다. 본 장에서는 직접활선 공법을 분석하고 이를 대체할 간접활선 공법으로서 활선작업 로봇기술도 비교분석하기로 한다. 대상 공정은 한국전력에서 운용하는 22종류의 직접활선 공법 중 주요 16종의 공법을 1차 분석하였다. 또한 그 외 나머지 방호작업도 기술분석의 완결성을 위하여 2차 분석하여 포함시켰다.

각 활선공법에 대한 공정 기술분석 방법은 우선 작업순서도를 바탕으로 세부작업을 도출하고 각 단계별 세부작업에서 다루는 대상물과 필요 공구, 공구의 기능, 조작자의 조작방식 등을 분석하는 과정을 포함한다. 이는 활선로봇과 작업을 위하여 탈부착되는 선단공구의 기능 및 요구조건 도출, 동작계획과 제어설계 등에 필요한 데이터를 얻기 위한 과정이다.

표 2 직접활선 공법 중 분석 대상 공법

Table 2 Analysis target of live-line electricity distribution

직접활선 공법 중 분석 대상 공법	
1) 전주교체	9) COS 교체
2) 핀장주 완철교체	10) 피뢰기(LA) 교체
3) 내장·인류장주 완철교체	11) 이도조정
4) 장주변경(핀 → 내장)	12) 접퍼선 절단
5) LP애자 교체	13) 전선압축 접속
6) 현수애자 교체	14) 바이패스점퍼스틱 설치
7) 인하선 연결	15) 전선이전
8) 내오손 결합애자 설치	16) 가공지선 설치
17) 전주방호	18) 총선부 방호
19) 건축용 방호관 설치 철거	20) 절연커버 설치
21) 핀장주기별점검	22) 내장인류장주기별점검

	장점	단점
직접활선공법	- 작업시간 감소	- 작업자에 대한 위험성 증가
간접활선공법	- 작업자에 대한 위험성 감소	- 작업시간 증가
로봇활선공법	- 작업자에 대한 위험성 감소 - 작업시간 감소	- 가격

표 3 전주교체 작업 순서도

Table 3 Work flowchart of changing telephone pole

직접활선작업	작업 플로우									
	가완목 설치	LP애자 바인드 철거	가완목 및 전력선 상부이동	기설전주 애자 및 완철철거	건주(완철, 애자 설치)	가완목 하부이동	애자 바인드선 취부	가완목 철거	가공지선, 중성선 이설	기설전주 철거
전주교체										

표 4 전주교체 작업 순서도

Table 4 Analysis chart of changing telephone pole

작업 순서도	세부작업	조작 대상물	필요 공구	공구 기능	조작자
와이어통 새들설치	상부 새들 설치	새들	그리퍼	새들 전주 부착, 쇠고리 핀 끼우기, 걸쇠 당기기	새들을 전주에 부착하고 쇠고리 핀을 끼워 고정
	하부 새들 설치	새들	그리퍼	새들 전주 부착, 쇠고리 핀 끼우기, 걸쇠 당기기	새들을 전주에 부착하고 쇠고리 핀을 끼워 고정
	U형 활차걸이 설치	U형 활차걸이	그리퍼	활차걸이 끼우기	새들에 활차걸이 끼우기
마스터 폴 설치	상부 및 하부 클램프 나비나사 풀기	나비나사	렌치	나사 풀기	새들 상부/하부 나비나사 풀기
	마스터 폴 삽입	마스터 폴, 새들	그리퍼, 렌치	새들에 폴 삽입, 나사 풀고 조이기	새들 나사 풀고 마스터폴을 새들에 삽입하여 나사 조이기
	나비나사 조이기	나비나사	렌치	나사 조이기	새들 상부/하부 나비나사 조이기
	와이어통 밴드 고정	와이어통 밴드	그리퍼, 렌치	밴드 잡아 풀에 부착, 나사 풀고 조이기	마스터폴 두부에 와이어통 밴드 고정
	와이어통 폴크레비스 임시 설치	와이어통 폴크레비스	그리퍼, 렌치	폴크레비스 잡아 풀에 부착, 나사 풀고 조이기	마스터폴 하부에 와이어통 폴크레비스 고정
(생략)					
방호 철거	완철덮개 철거	완철덮개	그리퍼	잡기, 빼기	완철덮개 빼기
	전원측/부하측 전선덮개, 애자덮개 철거	전선덮개, 애자덮개	그리퍼	잡기, 빼기	전선덮개, 애자덮개 빼기
	중성선 방호철거(라인호스, 애자후드, 고무절연블랭킷)	라인호스, 애자후드, 고무절연블랭킷	그리퍼	잡기, 빼기	중성선에서 라인호스, 애자후드, 고무절연블랭킷 빼기

2.1.1 활선공법별 기술분석

각 활선공법에 대한 작업 순서도와 기술분석도에 대해 표 2와 같은 양식으로 정리하였다. 표 3, 4는 22종류의 활선공법 중 하나인 전주교체에 대한 작업순서도와 기술분석도의 예이다[27].

위의 표준 활선공법에 대한 기술분석 결과는 활선로봇 기술 개발 또는 도입을 위한 요구조건을 도출하는 기초가 된다. 즉, 위 분석 결과로부터 활선공법 별로 난이도의 차이를 파악할 수 있을 뿐만 아니라 활선로봇 적용을 위하여 필요한 공구 및 작업계획의 수립도 가능하다. 각 활선공법마다 난이도의 차이는 있고 대체로 전반 16가지 공법이 여러 종류의 선단공구를 필요로 하고 복잡도가 높지만 후반부의 6가지 방호를 위한 공법이 고무블랭킷 등 로봇이 다루어야 하는 대상물체의 유연성으로 인하여 그 작업의 난이도는 상대적으로 높은 것으로 판단된다. 따라서 이러한 분석 결과를 기술 개발 우선순위에 반영하여 기획을 한다면 효율적인 로봇기술의 개발이 가능할 것이다. 또한 아래에서 제시하는 각 선단공구의 동작분석과 작업 대상물의 종류, 공구의 사용빈도 등도 활선작업을 위한 로봇의 개발 및 선정에 필요한 기준 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

2.1.2 활선작업 공구의 동작 분석

분석한 활선공법에서 사용되는 공구와 대상물의 종류 및 사용 빈도는 표 5와 같다. 특정 공구나 조작 대상물의 경우 하나의 공법에서 중복 사용된 경우도 포함된다.

표 5에서 알 수 있듯이 직접활선 작업에서 가장 많이 쓰이는

공구는 그리퍼(클램프)와 렌치이고 선기나 테이핑기는 상대적으로 사용빈도가 낮다. 그러나 위에 나타난 모든 공구는 직접활선 공정을 대체할 간접활선 작업로봇의 선단공구의 기능을 정의하고 설계하기 위하여 필요하다. 이를 위하여 먼저 각 공구의 동작분석을 함으로 동일한 기능의 로봇 선단공구에 필요한 동작변환 관계를 파악하고자 한다.

2.2 활선공정과 로봇기술 비교 분석

2.2.1 로봇의 요소기술 분석

활선작업 로봇은 전문서비스 영역의 한분야로 그 작업 특성은 작업환경의 틀이 일정하지 않고 시에 따른 환경변화를 수반하는 비정형성과 시변(unstructured and time-varying) 특성을 갖는다. 또한 배전선로의 작업 대상물체가 22.9kV 고압선로 및 선로상의 부속품이므로 절연 및 전자파 간섭 차폐 특성 등을 고려하여 활선작업 로봇이 설계되어야 한다.

일반적인 로봇의 기술특성과 비교하여 활선작업용 로봇에 필요한 요소기술과 특징을 간략히 표 6에 나타내었다.

활선작업용 로봇이 일반 로봇과 다른 점은 기구부 본체와 링크, 선단공구 및 센서, 통신부, 원격 작부 등 하드웨어부의 절연 성능이 확보되어야 한다는 점과 그리퍼로 대표되는 선단공구가 매우 다양하므로 자동 공 교환기가 구비되어야 한다는 점이다. 또한 활선작업 로봇내의 전장시스템(제어 및 통신, 센서, 원격조작 장치 등)의 전압에 의한 전자파 차폐 등이 보장되어야 오동작을 예방할 수 있다. 그 외 기술적으로 다양한 상호작용을 요구하

표 6 활선작업용 로봇의 요소기술 및 특징

Table 6 Element technology and characteristics of live-live robot

요소기술		O/X	특징	
구성	세목			
기구부 (설계기술)	본체	0	절연 및 방수	
	링크	0	절연 및 방수	
	그리퍼	0	절연 및 방수 다양한 선단공구	
제어부 (제어기술)	구동기	0	전자파 차폐	
	드라이버	0	전자파 차폐	
	제어기	주행제어	X	
		조작제어	0	힘/위치 피드백
		기능제어	0	
상호작용	X			
인식부 (센서기술)	환경인식	0	비전센서, 독립전원	
	상태인식	0	인코더 등	
	상호작용	X		
입출력부 (인터페이스 기술)	명령전달	0	원격제어	
	상태피드백	0	힘/위치 피드백	
	환경정보전송	0	영상정보	
	모니터링	0	영상정보	
	유무선통신	0	전자파 간섭차폐	
상호작용	X			
절연기술		0	건조/우천시	
방수기술		0	우천시	
전자파 차폐기술		0	광케이블 도입	

표 8에서 알 수 있듯이 활선공정의 작업기능 대부분은 작업 환경의 인식을 기반으로 하며 작업과정에서 로봇의 기구부 대부분이 유기적으로 제어되어야 한다. 활선공정의 작업은 대부분 조작제어의 대상이며 이를 위하여 환경정보 뿐만 아니라 로봇의 내부 상태정보도 피드백 되어야 함을 나타낸다. 이러한 정보의 모니터링과 명령전달, 제어를 위하여필요한 유무선 통신 요소도 필수 기술요소이다.

2.2.3 선단공구별 요구조건

활선작업용 로봇은 일반 로봇의 요소기술을 대부분 필요로 하지만 작업 특성상 그리퍼 또는 클램프로 대표되는 선단공구의 종류가 매우 다양하다는 특징이 있다. 따라서 활선공정별로 필요한 선단공구의 정확한 요구조건을 파악하여 로봇의 선택 또는 설계에 반영하여야 주어진 활선작업을 충실히 수행할 수 있다. 따라서 기술분석에서 얻은 활선작업 공구의 동작분석과 더불어 조작 대상물의 다양한 요구조건을 고려해야 한다.

2.3 활선작업용 로봇의 요소기술 및 요구사항

2.3.1 활선작업 로봇의 요소기술

활선작업 로봇의 작업공정은 전선과 애자 및 금구류의 파지 및 지지, 이동, 전선의 절단, 피박, 압축, 테이핑 등 제한된 종류의 요구기능의 조합으로 이루어져 있다. 따라서 이러한 기능을 만족하는 활선작업용 로봇의 요소기술은 기본적으로 일반 서비스 로봇의 요소기술과 다르지 않다. 다만, 안전한 활선작업을 위한

표 7 공정별 로봇기능 요구조건

Table 7 Requirements of robot function by process

공정#기능	파지	지지	이동 (당기기, 밀기)	조작								
				피박	압축	장선	절단	태입 감기	너트 볼트	나사	바인딩	
전주교체	○	○	○								○	○
핀장주 완철교체	○	○	○								○	
내장·인류장주 완철교체	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
장주변경(핀 → 내장)	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	
LP애자 교체	○	○	○								○	○
현수애자 교체	○	○	○			○						
인하선 연결	○	○	○	○	○					○	○	
내오손 결합애자 설치	○	○	○	○	○					○	○	
COS 교체	○	○	○	○	○					○	○	
피뢰기(LA) 교체	○	○	○	○	○			○	○			
이도조정	○	○	○	○	○	○	○	○				
점퍼선 절단	○	○	○				○					
전선압축 접속	○	○	○	○	○			○				
바이패스 점퍼스틱 설치	○	○	○	○						○		
전선이전	○	○	○								○	
가공지선 설치	○	○	○		○	○				○		
전주방호	○	○	○									
충전부 방호	○	○	○									
건축용 방호관 설치 철거	○	○	○					○				
절연커버 설치	○	○	○					○				
핀장주기별점검	○	○	○									
내장인류장주기별점검	○	○	○									

표 8 기능별 기술 요구조건

Table 8 Technical requirements by function

요소기술	기구부			제어부				인식부				입출력부					
	본체	링크	선단공구	구동기	드라이버	제어기		지능 제어	환경 인식	상태 인식	상호 작용	명령전 달	상태 피드백	환경정보전송	모니터링	유무선 통신	상호 작용
						주행 제어	조작 제어										
파지	○	○	○	○	○	X	○	X	○	○	X	○	X	X	○	○	X
지지	○	○	○	○	○	X	○	X	○	○	X	○	X	X	○	○	X
이동	○	○	○	○	○	X	○	X	○	○	X	○	X	X	○	○	X
피박	○	○	○	○	○	X	○	X	○	○	X	○	○	X	○	○	X
압축	○	○	○	○	○	X	○	X	○	○	X	○	○	X	○	○	X
장선	○	○	○	○	○	X	○	X	○	○	X	○	X	○	○	○	X
절단	○	○	○	○	○	X	○	X	○	○	X	○	○	X	○	○	X
테이핑	○	○	○	○	○	X	○	X	○	○	X	○	X	X	○	○	X

표 9 기능별 기술 요구조건

Table 9 Technical requirements performance and standards of live-line robot (example)

전기 정격		기계정격		구조 및 기능 요구 규격		선단공구 요구 규격	
적용 배전선로 전기 정격	22.9kV	무게	30kg	전원차단시 상태/ 위치 고정 기능	유	장착가능한 선단공구 수	10가지 이상
절연 성능	45kV	로봇본체 무게	20kg	고장시간 평균	연속사용 1000시간	선단공구의 자동 탈부착 기능	자동 톨 교환기 구비
건조 누설 전류	0.5mA	연장로봇팔 무게	10kg	고장수리 시간 평균	12시간	그리퍼 개폐	18cm
우천시 누설전류	0.5mA/10분	부하	6kg	유지보수 간격 평균	48시간	그리퍼 힘	20kg중 이상
코로나 쉐딩	765kV	자유도	암 6 자유도, 선단공구 2 자유도 이상	원격작업 지원	마스터-슬레이브 구조	손목회전부 토크	랜치 토크 20N 이상
개폐서지이차크 최대반동	5cm	조작(위치) 정밀도	0.2cm	피드백 데이터 지원	힘/위치/영상 데이터	절단기 힘	전선의 두께 중 가장 두꺼운 전선 기준
방수 성능	IP68 등급	조작(힘) 정밀도	0.2kg중	기상 대처 능력	우천 및 야간작업 기능	압축기 힘	20N 이상
		조작(속도) 정밀도	0.02m/s	고소작업 가능성	최고 도달높이 및 작업 높이	피박기 힘	5N 이상
		구동방식	유압 또는 전동	적용가능 활선공법 수	16가지 이상		
		장착가능 로봇 팔	4개 이상	이동성 확보	활선차량 직접 장착 또는 붐 및 버킷 탑재		
				사용자 편의성 및 안전고려	지상 원격조작 기능		
				자동 활선작업 지원	활선 작업의 프로그램 기능		
				온도 정격	-10도 ~ +50도		

로봇의 원격조작 및 제어, 통신기술, 비전센서에 의한 모니터링 기술과 작업 요구기능에 맞는 로봇의 선단공구 톨의 설계 및 제작기술, 자동 톨 교환장치 등을 구비해야 하는 점이 다르다. 또한

이들 시스템의 절연 및 신호의 전자과 간섭 차폐 기능 등도 활선작업용 로봇에 필요한 요구기능이다. 따라서 다음과 같은 기술적 요소를 고려해야 한다.

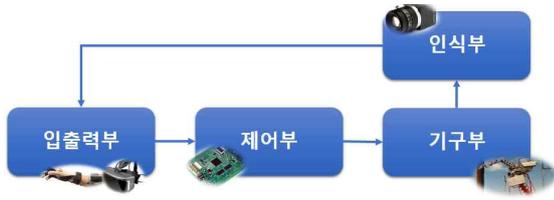


그림 23 지상 원격조작 활선로봇의 블록 구성도
 Fig. 23 Block diagram of ground remote control live-line robot

가. 기구부

본체 및 링크는 로봇 암으로 단순하게 구현할 수 있으며 위치 결정을 위한 3자유도, 선단공구의 방향 조사를 위한 3자유도, 총 6자유도의 최소 운동 자유도가 필요하고 작업의 종류 및 작업 환경에 따라 추가 자유도가 필요한 경우 1자유도 이상의 여유자유도가 요구될 수 있다. 또한 로봇만으로 독자적인 작업을 수행하기 위하여 활선로봇 플랫폼에는 최소한 2개 이상의 로봇팔을 장착할 수 있어야 한다. 직접활선공법의 분석결과에 따라 필요한 공구가 종류별로 슬레이브 로봇의 선단공구로 구현되어야 하며 이를 자유롭게 탈부착할 수 있도록 공구보관 및 자동 탈부착 장치도 설계되어야 한다.

나. 제어부

활선로봇의 제어는 작업자의 안전성을 필요로 하는 작업 특성상 원격제어가 필요하므로 마스터-슬레이브 구조의 힘/토크 센서를 이용한 피드백제어 또는 컴플라이언스 제어가 주이고 필요에 따라 위치제어도 병행될 수 있다. 힘/토크피드백을 위해서는 유압식 구동방식을 사용하는 것이 좋고 전기구동방식은 컴플라이언스 제어가 전자파 신호간섭 방지측면에서 선호된다. 또한 원격제어 피드백 신호의 전자파 차폐를 위하여 데이터 통신케이블로 광파이버를 도입할 필요가 있다.

다. 인식부

반자동 또는 자동 원격조작 활선로봇의 상태인식 및 모니터링을 위하여 슬레이브 단에 주로 비전센서를 장착하여 사용하며 필요한 경우 거리측정 센서를 이용하여 조작 대상물의 거리를 측정하여 마스터부에 피드백함으로써 작업의 모델링 및 자동화에 활용할 수 있다. 비전센서의 경우 필요에 따라 스테레오비전에 광역비전을 추가로 슬레이브 플랫폼에 장착할 수 있다. 일반적으로 제어부와는 분리된 독립적인 전원으로 구동되는 것이 안전하다.

라. 입출력부

활선작업용 로봇의 입출력부는 마스터-슬레이브 구조의 원격조작 시스템의 일부로서 구성되며 명령전달 및 상태피드백, 슬레이브부의 로봇암과 선단공구, 작업대상물 및 작업환경 등의 모니터링을 위한 유무선통신 인터페이스를 제공한다. 입출력부의 마스터부는 조이스틱 및 데이터글러브, HMD 장치, 영상모니터, 컨트롤 조작 패널 등을 구비한다. 또한 필요할 경우 컴퓨터 상에 마이크와 외부스피커 등의 보조장치를 구성할 수 있다. 슬레이브부에 장착된 비전시스템의 데이터를 작업 환경 및 활선로봇의 모델링과 시뮬레이션 등에 활용할 수 있다.

2.3.2 활선작업 로봇의 요구사항

위에서 제시된 22종류의 직접활선 공법과 활선로봇의 요소기술 분석 결과를 바탕으로 간접활선 공법용 로봇의 요구사항을 표 9와 같이 정의할 수 있다.

2.4 활선작업 로봇기술의 적용 타당성 분석

2.4.1 정성적 분석

아래 표 10의 산업 연구원 자료에 따르면 국내 전문서비스 로봇기술 수준, 즉, 활선작업용 로봇 기술은 2016년 현재 일본 및 미국의 기준에는 못 미치지만 90% 이상의 요소기술을 자체 개발할 수 있는 수준인 것으로 추정된다. 또한 지속적인 기술개발이 진행된다면 2020년까지 이들 선진국 수준의 약95% 이상의 수준에 도달할 것으로 판단된다. 따라서 수요기업 중심의 활선로봇기술 개발 및 실용화를 본격적으로 추진할 필요가 있다. 그러나 기술개발 및 현장적용에 30년 이상 걸린 외국의 사례에 비추어 단기간 내에 활선작업 로봇을 개발하고 현장에 투입할 정도의 신뢰성까지 확보하는 것은 가능하지 않으므로 중장기적인 기술 로드맵에 따라 단계적인 개발 계획을 수립하는 것이 타당하다. 즉, 단기적으로는 스마트스티카나 이를 고도화한 경량 활선로봇을 개발하여 간접활선 공정에 투입하고 본격적인 활선작업용반자동 및 자동 로봇은 중장기적인 개발 프로젝트로 진행하는 순차적인 기술개발 전략이 합리적이라 판단된다.

표 10 전문서비스용 로봇의 적용분야별 기술경쟁력 전망
 Table 10 Technological competitiveness perspective for application service robot

적용분야	최고 기술국	한국수준 ('05-'20)	유망기술 분야	최약기술 분야
재난극복 로봇	100 (일본)	70 → 95	화재진압 기술 로봇 메커니즘	구동 메커니즘 자율/원격 이동제어 센서기술
군사용/사회안전 로봇	100 (미국)	60 → 98	환경인식기술 지능제어기술	고강도 경량재료 야외자율주행기술 고용량 전지
활선작업용 로봇	100 (일본, 미국)	50 → 95	HRI 기술 조작공구 기술	자율/원격 제어
건설작업용 로봇	100 (일본, 미국)	80 → 100	환경인식기술 지능제어 기술	고하중 핸들링 로봇 메커니즘
의료용 로봇	100 (미국)	70 → 100	고정밀 센싱기술 정밀제어, HRI	정밀센서 기술 네트워크 기술

자료 : 산업연구원

2.4.2 정량적 분석 및 개발 가능성 검토

국내 활선로봇 기술 수준을 정량적으로 분석하고 자체 개발 가능성을 평가하기 위한 정량적 지표를 도입하고 이를 기초로 도

표 11 TRL(Technology Readiness Level)

Table 11 TRL(Technology Readiness Level)

Level	Phase	Definition	Score
1	Basic Technology Research	Basic principles observed and reported	1 (0.2)
2		Technology concept and/or application formulated	
3	Technology Development	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept	2 (0.4)
4		Component and/or breadboard validation in laboratory environment	
5	Technology Demonstration	Component and/or breadboard validation in relevant environment	3 (0.6)
6		System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)	
7	System Development	System prototype demonstration in a space environment	4 (0.8)
8		Actual System completed and "flight qualified" through test and demonstration (ground or space)	
9	System Test, Launch, and Operations	Actual system "flight proven" through successful mission operations	5 (1.0)

표 12 전문서비스 로봇의 국내 기술 수준

Table 12 Domestic skill level of professional service robots

기술 항목	최고 기술 보유국	최고기술 대비 국내 수준	국내기술 취약 분야
명령입출력	미국/일본	80	Haptic 장치, 감성명령, 생체신호처리, 지능형 입력장치, 통신
지능형 상호작용	미국/일본	70	인공지능, 대화, 접속(터치), 비접촉(거리)
감지 및 인식	미국/일본	85	시각, 청각, 후각, 촉각, 위치인식 등
센서부	미국/독일/일본	70	CCD, CMOS, 자이로, 적외선, 마이크로폰 등
구동부	일본/스위스	70	구동기, 감속기
기구부	미국/독일/일본	80	이동기구, 팔, 손목, 관절, 눈 등
제어부	미국/일본	90	주행, 보행, 지능, Manipulator 등

자료 : 산업연구원

출된 기술수준 분석 결과를 소개하고자 한다. IFR(International Federation of Robotics)의 분류에 따르면 로봇은 제조업용 로봇, 개인서비스용 로봇, 전문서비스용 로봇으로 분류할 수 있고 배전 선로의 활선작업용 로봇은 전문서비스 로봇으로 분류될 수 있다. 전문서비스 로봇은 재난구급, 군사용, 활선작업용, 건설용, 의료용 등 그 적용분야의 특성상 고도의 특화된 로봇기술의 적용이 필요하다. 따라서 배전선로의 활선작업에 로봇을 활용하는 기술의 개발 가능성 검토는 전기분야의 특성상 절연기술과 전자파 차폐기술, 비정형 작업 환경에 대한 로봇기술의 난이도를 고려하여 평가되어야 한다. 또한 활선작업공정의 분석을 통하여 필요한 요소 기술을 도출하여 기술 수준의 분석이 선행되어야 한다.

위에서 도출된 활선공정 기술분석 자료 및 활선작업 로봇의 요구조건을 바탕으로 활선작업용 로봇기술에 대한 TRL(Technology Readiness Level) 분석을 하고자 한다. TRL은 미항공우주국(NASA)에서 제시한 기술수준 분석 지표로서 기술준비 수준을 개념 연구에서 시스템 개발 및 실용화까지 9단계로 나누고 여기에 0.2에서 1점까지 5단계의 점수를 부여하여 평가한다. 아래의 표 11은 NASA의 TRL 지표를 나타낸다. 또한 이러한 개별 기술 척도와 함께 표 11에 주어진 기술 통합 준비 수준인 IRL(Integration Readiness Level)을 적용함으로써 통합 시스템 관점에서 로봇기술을 평가할 수 있다. 즉, 활선작업 로봇을 구성하는 여러 요소 기술의 통합 수준인 IRL(Integration Readiness

표 13 활선작업용 로봇 요소기술의 TRL 및 스코어

Table 13 TRL and score of live-line robot element technology

로봇 요소기술 및 전기기술 (대표 심볼)	심볼	TRL		
		Level	Score	
기구설계 기술(T1)	본체	T11	8	0.8
	암	T12		
	선단공구	T13		
제어기술 (T2)	구동기	T21	7	0.8
	서보 및 조작기술	T22	9	1.0
인식기술 (T3)	비전센서	T31	8	0.8
	힘/토크 센서	T32	7	0.8
	거리 센서	T33	7	0.8
입출력인터페이스(T4)	입출력장치(HMD, Glove, Joystick, Master-Slave)	T41	8	0.8
	통신	T42	8	0.8
전기기술 (T5)	절연(인슐레이션)	T51	9	1.0
	차폐(광파이버 및 쉴드)	T52	9	1.0

Level)을 모델링함으로써 이를 이용하여 SRL(System Readiness Level)을 도출하고 활선작업 로봇의 전체 시스템 관점의 기술 준비 수준을 분석하고 진단하기로 한다. 우선 표 13의 활선로봇 요소기술 별 TRL을 평가하기 위하여 산업연구원의 국내 전문서비스 로봇의 기술수준 분석표 표 12를 참조하였다.

이를 바탕으로 활선작업용 로봇의 요소기술에 대한 TRL 측정 결과를 표 13에 나타내었다. 다음 결과는 활선 작업용 로봇을 위한 모든 요소기술의 수준이 7단계 이상, 즉 프로토타입 로봇 제작 수준 이상인 것으로 평가되고 있음을 보여 준다.

표 13과 같이 기술 준비 수준(TRL)을 평가함으로써 해당 단위 요소기술의 초기 개발부터 상용화까지 단계를 판단할 수 있으나

표 14 Integration Readiness Level(IRL)

Table 14 Integration Readiness Level(IRL)

Level	Definition	Score
1	An Interface between technologies has been identified with sufficient detail to allow characterization of the relationship	1 (0.2)
2	There is some level of specificity to characterize the Interaction (i.e. ability to influence) between technologies through their interface	
3	There is Compatibility (i.e. common language) between technologies to orderly and efficiently integrate and interact	2 (0.4)
4	There is sufficient detail in the Quality and Assurance of the integration between technologies	
5	There is sufficient Control between technologies necessary to establish, manage, and terminate the integration	3 (0.6)
6	The integrating technologies can accept, Translate, and Structure Information for its intended application	
7	The integration of technologies has been Verified and Validated with sufficient detail to be actionable	4 (0.8)
8	Actual integration completed and mission Qualified through test and demonstration, in the system environment	
9	Integration is Mission Proven through successful mission operations	5 (1.0)

로봇기술과 같은 다양한 요소기술의 융합 및 시너지를 필요로 하는 복합 시스템 기술은 단위 기술뿐만 아니라 다양한 요소기술이 적절히 통합될 수 있는지를 평가할 필요가 있다. 이를 평가하는 기준이 표 14에 나타난 IRL(Integration Readiness Level)로서 통합 준비 수준의 평가 척도가 된다.

위에 정의된 TRL 및 IRL 지표를 참조하여 활선작업 로봇의 요소기술의 IRL score 그래프를 나타낸 결과가 그림 24에 주어 져 있다. 모델링을 단순화하기 위하여 각 요소기술의 관계망 그래프에서 물리적으로 직접 통합되는 요소기술 간의 통합 수준 지표는 레벨 9(1.0), 그 외 통합요소 관계는 레벨 8과 레벨 9의 중간 단계(0.9)로 평가하였다.

표 15는 IRL score 그래프 모델을 바탕으로 작성한 스코어 행렬을 나타낸 것이다.

이제 이러한 평가를 바탕으로 활선작업용 로봇의 시스템으로

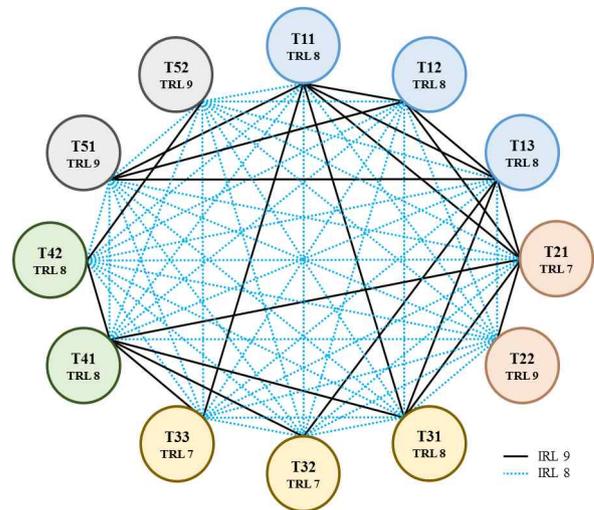


그림 24 활선작업 로봇의 IRL Score Graph
Fig. 24 IRL Score Graph of live-line robot

표 15 활선작업용 로봇 요소기술 IRL 스코어 행렬

Table 15 IRL score matrix of Element technology of live-line robot

로봇 요소기술 및 전기기술 (대표 심볼)		심볼	IRL Score Matrix M(12x12)												
기구설계기술 (T1)	본체	T11	M =	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9
	암	T12		1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9
	선단공구	T13		1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9
제어기술 (T2)	구동기	T21		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9
	서보 및 조작기술	T22		0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
인식기술 (T3)	비전센서	T31		1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9
	힘/토크 센서	T32		0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9
	거리 센서	T33		0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9
입출력 인터페이스 (T4)	입출력장치(HMD Glove, Master-Slave Joystick)	T41		1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
	통신	T42		0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9
전기기술 (T5)	절연(인슐레이션)	T51		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0
	차폐(광파이버 및 쉴드)	T52		1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9
				0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0

서 준비수준을 분석할 수 있다. 그 분석결과는 다음에 주어진 SRL(System Readiness Level)의 평가지표에 따라 그 통합수준 단계가 평가된다. 표 16에 주어진 시스템 통합수준은 개념정의부터 운용까지 5가지 단계로 이루어지고 1단계의 저수준과 2-3 단계의 중간수준, 4-5단계의 높은 수준으로 분류된다.

국내 활선로봇 기술의 시스템 준비 수준의 평가치는 TRL 평가벡터와 IRL 행렬을 기반으로 다음과 같이 측정한다.

$$S = MT \tag{1}$$

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_{12} \end{bmatrix}, M = (m_{ij})_{12 \times 12}, T = \begin{bmatrix} T_{11} \\ \vdots \\ T_{52} \end{bmatrix}$$

여기서 S, M, T는 각각 SRL 벡터, 표 15에 주어진 IRL 행렬, TRL 평가벡터이다. 표 13과 표 15에 주어진 TRL 평가 벡터와 IRL 평가 행렬을 식 (1)에 대입하면 시스템 준비 수준 평가 벡터는 다음과 같이 계산된다.

$$S = MT = \begin{bmatrix} 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 \\ 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 \\ 1.0 & 0.9 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 \\ 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 \\ 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 \\ 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 \\ 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 \\ 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.8 \\ 0.8 \\ 0.8 \\ 0.8 \\ 1.0 \\ 0.8 \\ 0.8 \\ 0.8 \\ 0.8 \\ 0.8 \\ 1.0 \\ 1.0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

따라서 시스템 준비수준 평가 벡터는 식 (3)과 같다.

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \\ S_{10} \\ S_{11} \\ S_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.76 \\ 9.6 \\ 9.76 \\ 9.76 \\ 9.36 \\ 9.58 \\ 9.42 \\ 9.42 \\ 9.66 \\ 9.44 \\ 9.52 \\ 9.36 \end{bmatrix} \tag{3}$$

위 벡터는 12가지 요소기술에 대한 평가치를 포함하므로 평균 값을 구함으로써 활선작업 로봇의 시스템 준비 수준 평가 값을 계산할 수 있다. 즉,

$$SRL = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} \left(\frac{S_k}{12} \right) \tag{4}$$

$$= \frac{1}{12^2} (9.76 + 9.6 + 9.76 + 9.76 + 9.36 + 9.58 + 9.42 + 9.42 + 9.66 + 9.44 + 9.52 + 9.36) = 0.8$$

표 16 System Readiness Level(SRL)

Table 16 System Readiness Level(SRL)

Phase	SRL range	Definition	Readiness level
5	0.9-1.0	Operations & support	High
4	0.8-0.89	Production	
3	0.6-0.79	System development & demonstration	Medium
2	0.4-0.59	Technology development	
1	0.1-0.39	Concept refinement	Low

표 16의 SRL 평가지표에 따르면 위 평가결과는 phase 4의 제품화단계에 해당하여 기술개발 및 시스템의 개발 준비 수준이 높다고 할 수 있다. 따라서 국내 활선로봇 기술과 통합시스템의 국산화 가능성이 높다고 평가된다. 아래 그래프는 활선작업용 로봇 기술에 대한 TRL 및 SRL 평가 결과를 가시화한 것이다.

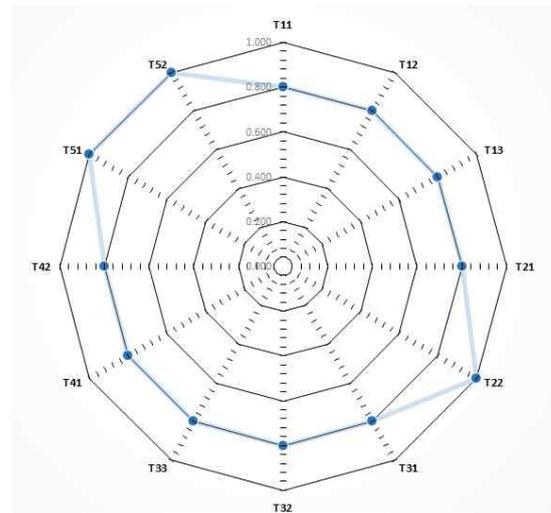


그림 25 활선작업용 로봇의 TRL 분석 그래프
Fig. 25 TRL analysis graph of live-line robot

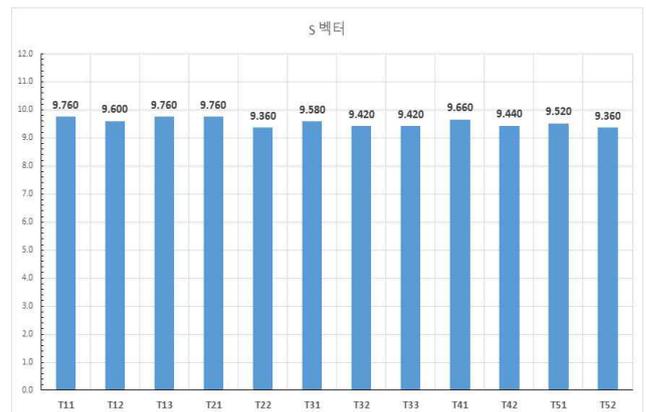


그림 26 활선작업용 로봇의 SRL 분석 그래프
Fig. 26 SRL analysis graph of live-line robot

위에서 얻어진 정량적 분석 결과는 국내 활선로봇 기술에 대한 정성적 평가와 마찬가지로 간접활선 작업을 위한 로봇의 개발이 국내 자체 기술로도 실현 가능함을 보여준다. 그러나 배전선로의 활선작업에 적용하기 위해서는 시제품의 개발뿐만 아니라 검증 및 신뢰성 확보를 위한 충분한 적용기간과 개선과정을 필요로 한다. 따라서 앞 절에서도 언급하였듯이 이 평가를 바탕으로 배전선로 활선작업 환경 및 기술 개발 성숙도에 맞는 단계적인 개발전략을 수립하여 실행할 필요가 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 러버 글러브 직접활선 공법의 대체 공법으로서 로봇을 활용한 배전 활선공법의 기술 현황을 조사하고 간접활선로봇공법의 기술개발 및 도입 가능성을 분석하였다. 기술 개발 현황 분석에서는 전문 서비스로봇의 적용 가능성을 탐색하고, 활선작업 기술 분석을 통한 활선로봇 기술 요구조건을 도출하였으며, 국내 및 해외 기술수준 분석을 통한 기술개발 또는 해외 기술도입 타당성도 비교 분석하였다. 또한 분석 결과를 기반으로 국내 활선로봇 기술의 개발과 실 적용을 위한 요구조건을 제시하였다.

국내 배전 활선 작업의 대체공법으로서 활선로봇 공법의 도입을 위한 정성적 요구조건은 로봇공법의 안전성, 경제성, 사용편의성, 확장성, 작업의 다양성으로 요약할 수 있다. 이러한 기준에서 판단할 때 국내 기술개발과제에서 개발된 활선작업 보조암이나 버킷 탑재형 양팔로봇이 현장에 적용되지 못한 이유는 명확하다. 즉, 크기, 무게, 비용, 사용 편의성 등에서 활선업체 고용주 및 작업자가 도입하기 어려운 측면이 있고 또한 버킷탑승 조작형으로서 작업 안전거리도 만족스럽지 않다. 또한 대부분의 외국 활선로봇도 통신선로 등이 얽혀 있는 국내의 복잡한 배전선로 환경에 적용하기에는 무게나 크기, 비용 측면에서 도입하여 직접 활용하는데 무리가 있다. 일부 활선로봇을 제외하고 22.9kV의 국내 배전선로에 직접 적용할 수 없는 전기규격으로서 대부분의 해외 활선로봇이 도입 후 전기적 기계적 재설계를 필요로 한다. 따라서 복잡도가 다른 다양한 국내의 배전선로 환경에 적용 가능하도록 위의 요구조건을 만족하는 활선로봇 기술의 개발이 시급한 실정이라 할 수 있다.

위에서 제시한 활선작업 로봇의 요구조건을 만족하는 국내 기술 개발 방향의 키워드는 1) 소형화, 2) 경량화, 3) 모듈화, 4) 사용자 중심의 직관적인 인터페이스에 의한 (원격)조작의 용이성, 5) 선단공구의 다양화(다기능 및 전용기능의 선단공구 제공), 6) 경제성이라고 할 수 있다. 이러한 활선로봇 기술의 개발로 다양한 복잡도의 배전선로 환경에 대한 적응성뿐만 아니라 외국의 발전된 활선작업로봇과 동일한 수준의 안전성을 확보할 수 있고 실용성 및 가격 경쟁력 확보도 가능할 것으로 판단된다.

그러나 이러한 조건을 만족하는 활선로봇을 단기간에 개발하여 현장에 투입하는 것은 가능하지 않은게 주지의 사실이다. 이는 외국의 활선로봇 기술이 30여년에 걸쳐 축적되고 현장 적용에 따라 검증되고 발전된 결과라는 사실에서도 명확하다. 따라서

국내 활선로봇 기술 개발도 장기적이고 전략적인 접근이 필요하다고 할 수 있다.

References

- [1] L.E. Parker and J.V. Draper, "Robotic Applications in Maintenance and Repair", *Handbook of Industrial Robotics, Ch.53, 2ND Ed. by Shimon Nof.*, 1998
- [2] Y. Maruyama et.al., "A Hot-Line Manipulator Remotely Operated by Operator on the Ground", *5th IEEE Int. Conf. on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance, ESMO-93*, 1993.
- [3] Y. Maruyama et. al., "MV overhead hot-line work robot", *3rd Int. Conf. on Line Maintenance, ICOLNM- 96, Venice, Italy*, 1996.
- [4] Y. Maruyama, "Robot applications for hot-line maintenance", *Industrial Robot: An Int. Journal of Industrial Robot*, Vol. 27, No 5, MCB University Press., 2000
- [5] S. Murakami, et al., "Application of live line work robots for distribution work: Kyushu Electric's challenges for fully-automated robotic system", *Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 3, pp. 339-344, 2001.
- [6] Electric Power Research Institute(EPRI), "Live-Line Repair with Tomcat", *EPRI Journal*, July/August 1987.
- [7] M. Boyer, "System Integration in Telerobotics: Case Study: Maintenance of Electric Power Lines", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1042-1047, Minnesota, 1996.
- [8] J. Cote and M. Peletier, "Telemanipulator Design and Optimization Software", *Proc. of SPIE, Telemanipulator and Telepresence Technologies*, Vol. 2351, 1995.
- [9] R. Soler, "Robotic Maintenance of the EDF Transmission Network", *Int. Conf. on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, ESMO 1993*.
- [10] Aichi Inc., Aichi Manipulator System Design Feature, Report of AICHI Development Planning Department, 1993.
- [11] R. Aracil et. al., "ROBTET: A New Teleoperated System for Live-Line Maintenance", *6th IEEE Int. Conf. on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, ESMO-95, Ohio, USA*, 1995.
- [12] R. Aracil, L.F. Penin, M.Ferre and A. Barrientos, "ROBTET: Robot for Live-Line Maintenance", *Int. Conf. on Live Maintenance(ICOLIM'96), Venice, Italy*, 1996
- [13] R. Aracil et. al., "Obstacle avoidance for teleoperated robots for live power lines maintenance using artificial

vision”, *IFAC Workshop on Intelligent Components for Vehicles(ICV'98)*, Seville, Spain, 1998.

- [14] R. Aracil, E. Pinto and M. Ferre, “Robots for Live Power Lines: Maintenance and Inspection Tasks”, *15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002*.
- [15] R. Aracil and M. Ferre, “Telerobotics for Aerial Live Power Line Maintenance”, *M. Ferre et. al.(Eds.): Advances in Telerobotics*, STAR31, pp. 459-469, 2007.
- [16] D. Elizondo et. al., “Overview of Robotic Applications for Energized Transmission Line Work-Technologies, Field Projects and Future Developments”, *1st Int. Conf. on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal, Canada*, pp. 1~10, Oct. 2010.
- [17] J. Singh et. al., “New Approaches for Live Wire Maintenance of Transmission Lines”, *MIT int. J. of Electrical and Instrumentation Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 67-71, August 2013.
- [18] J.H. Dunlap et. al., “Robotic Maintenance of Overhead Transmission Lines”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. PWRD-3, No. 3, pp. 280-284, July 1986.
- [19] Technology Readiness Level, A White Paper, NASA, 1995.4.
- [20] J.E. Ramirez-Marquez and B.J. Sauser, “System Development Planning via System Maturity Optimization”, *IEEE Trans. Engineering Management*, Vol. 56, No. 3, pp. 533-548, Aug. 2009.
- [21] K-H. Seok and Y.S. Kim, “A State of the art of Power Transmission Line Maintenance Robots”, *J. Elec. Eng. Tech.*, Vol. 11, pp. 1921-1931, 2011.
- [22] Development of live line robot arm for safety of electricity distribution line, KECA, 2003.11.
- [23] Implementation of remote control system and interface for live line robot system, KAIST, 2004.9.
- [24] Development of live line manipulator robot and new engineering technology for electricity distribution line, KAERI, 2008.10.
- [25] Comparison study of working environment for electricity distribution line, ERIK, 2012.12.
- [26] Analysis of robot industry, KIET, 2012.7.
- [27] Feasibility study of robot arm based live line engineering technology for domestic electricity distribution line, KEPCO, 2016.12.

저 자 소 개



양 선 제 (Seon-Je Yang)

2014.2 : 성균관대학교 전자전기공학과 졸업
 2017.2 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사 수료



국 태 용 (Tae-Yong Kuc)

1988.2 서울대학교 제어계측공학과.
 1990.2 포항공과대학 전자전기공학과 석사.
 1993.2 포항공과대학 전자전기공학과 박사.
 1993.4 삼성항공(주) 정밀기기연구소.
 1993.9 목포대학교 전기공학과.
 1995.3 성균관대학교 정보통신대학 전자전기공학부.



박 춘 식 (Choon-Sik Park)

1987.2 : 한양대학교 전자공학과 학사.
 1989.2 : 한양대학교 대학원 전자공학과 석사.
 2000.3 : JAIST 정보과학연구과 박사.
 2000.4~2001.4 : (주)후지쯔연구소(일본) 연구원.
 2001.5~2002.2 : 서강대학교 영상대학원 연구교수.
 2002.2~2010.6 : (주)하이드로젠파워로봇연구소 연구소장.
 2010.7~현재 : (주)알에스큐브 대표



서 인 용 (In-Yong Seo)

1984.2 : 성균관대학교 전기공학과 졸업.
 1989.8 : 부산대학교 전기전자공학 석사.
 2000.5 : 미국 BROWN 대학교 응용수학과 석사.
 2003.5 : 미국 BROWN 대학교 전기공학과 박사.
 1990.1~현재 : 한전 전력연구원 수석연구원