배전선로 활선작업용 로봇 설계

김창회, 이성욱, 신호철, 김승호
한국원자력연구소

The Design of Robot for Live-line Maintenance of the Distributed Power Line

Changhoi Kim, Sunguk Lee, Hocheol Shin, Sheungho Kim

Abstract - 배전선로의 활선작업은 무전전의 고품질 전력 공급을 위한 필수적인 기술이나 매년 안전사고가 발생하고 있는 위험한 작업 분야이다. 이러한 위험한 활선작업을 로봇이 대신하여 수행하기 위한 연구가 외국에서는 오래 전부터 추진되고 있다. 본 연구에서는 배전선로 상에서 활선작업을 수행하기 위한 로봇을 설계하였다. 선로 상에서 최대한의 작업공간을 확보하면서 작업을 수행토록 하기 위하여 로봇의 탑재 위치에 따른 로봇의 작업성능을 분석하여 로봇의 구조를 설계하였으며 로봇의 기구학적 해석 및 전주 및 완금 등의 부속물과의 간섭을 그래픽 시뮬레이션을 통하여 설계의 타당성을 검증하였다. 개발될 로봇은 배전선로의 애자교체, COS 교체 등의 다양한 분야에서 작업자를 대신하여 활선작업을 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

1. 서 론

전력이 산업 및 경제에서 차지하는 비율이 증가함에 따라 고품질의 전력 공급에 대한 요구가 증가되고 송배전선로의 유지보수를 무정전 상태에서 수행하는 활선공법의 필요성은 지속적으로 증대되고 있다.

활선작업은 무정전 상태에서 전력선을 유지보수하기 위한 작업방법으로서, 국내에서는 1962년 미국 EBASCO 사의 용역자문으로 활선작업이 시작되었다. 1990년도 초부터 국내에 활선작업차가 보급되기 시작하면서 국내의 배전선로 유지보수 작업은 대부분 활선으로 작업을 수행하고 있다. 국내에서 시행되고 있는 직접활선공법은 편리하고 작업시간이 짧게 소요되는 장점이 있는 반면, 적지 않게 안전사고가 발생하고 있는 것이 현실이다. 매년 감전사고는 약 800 건 이상이 발생하여 100 여명이 사망하고 있다. 우리나라의 사회 구조가 선진국형으로 변화되면서 위험 업종에 대한 기피 현상이 점점 심화되고 있으며 인구의 노령화로 인하여 숙련된 작업자의 확보가 점점 어려워질 전망이다. 선진 외국의 경우 작업의 위험성 탈피, 전공인력 감소에 대한 대처, 경제성 확보 등의 목적으로 활성작업을 수행하기 위한 로봇을 개발하였으며, 일본의 경우에는 일부 현장에서 활용하고 있는 것으로 보고되고 있다. 본 논문에서는 외국에서 개발된 활선작업용 로봇의 개발 현황 및 관련 요소 기술을 분석하고 국내 선로 환경을 고려한 활선작업용 로봇의 설계를 수행하였다.

2. 국내외 활선로봇 개발 현황

2.1 외국의 활선로봇 개발 현황

일본의 전력회사들은 활선작업의 위험성으로 인해 작업을 기피하는 현상이 커지고 활선작업자의 확보가 어려워지는 사회적 현상에 대처하기 위한 일환으로서 1980년대 초부터 위험작업을 대신할 수 있는 배전선로 활선작업용 로봇을 개발하기 시작하였다. 개발된 활선작업용 로봇은 작업자를 보조하는 보조암 형태와 양 팔을 이용하여 작업자가 원격조작에 의하여 활선작업을 수행하는 양팔형 매니퓰레이터로 구분된다. 표 1은 일본의 활선작업용 로봇 개발 현황을 보여준다. 이들 중 구주전력의 활선로봇은 93 대가 현장에서 활용 중인 것으로 보고되어 있다. 또한 스페인의 경우 활선작업용 로봇 Robtet을 개발하였으며 미국도 활선작업용 로봇 Tomcat을 개발하였다.

표 1. 일본의 활선 로봇 주요 개발 현황

개발된 로봇	주요 제원	적용 분야
로드밸런스암	자유도 : 8 본체중량 : 70 kgf 절연강도 : 20kV, 취급하중 : 10 kgf 작업반경 : 1.920 m m	작업 범위가 넓고 공구 교체가 가능함에 따라 파지, 절단, 전선압착 등 다양한 작업 가능
SuperArm2	본체중량 : 70 kgf 절연강도 : 20kV, 취급하중 : 10 kgf 작업반경 : 1.920 m m	핫스틱의 역할을 대신할 경량형의 다목적용 보조암
PhaseII	2팔 7 자유도 본체중량 : 85 kgf 구동방식 :전동식 지상 조작 절연강도 : 22 kV	전선 절단, 파지, 피복제거,접속커버 삽입, 접속 슬리비 삽입 및 압착작업
동경전력 로봇	양팔 자유도 절연강도 : 10kV 취급하중 : 30 본체중량 : 65 kg 암길이 : 1.3m	전선 절단, 파지, 피박, 연마, 분기선 취부 및 분기슬리브 압착

2.2 국내 활선로봇 개발 현황

국내에서 활선작업을 위한 로봇을 개발한 사례는 전무하며 한국전기공사협회에서 배전선로 활선작업용 보조암을 개발하였다. 개발된 활선작업용 보조암은 다양한 차종에 설치 가능하고 활선차량의 붐 자체의 상하 방향으로 회전할 수 있는 기능을 활용하기 위하여 활선작업 차량의 기존 붐 설치용 지지박스에서 지지하는 구조로 되어있으며 보조암은 기존 붐의 상하방향 회전 관절과 보조암 자체의 상하방향 회전 관절 및 보조암 자체의 직선방향 변위 관절로 구성되어 있다. 개발된 보조암은 배전선로의 활선작업시 전선의 절단, 전선 피박, 핀애자 교체

등의 작업시 전선을 지지하거나 잡아주는 역할 등 보조적인 작업을 수행할 수 있으며 이를 위한 작업 공구로 전선절단기와 클램프를 개발하였다.

3. 활선작업용 로봇의 설계

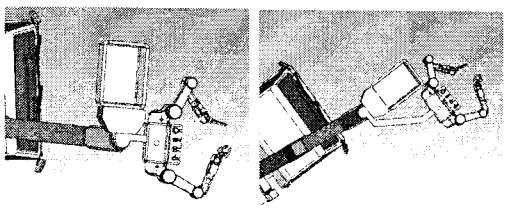
3.1 활선작업 로봇의 설계 조건

국내 선로환경에 적합한 로봇을 개발하기 위해서는 작업현장에 로봇을 투입하기 위한 현장접근성을 고려가 선행되어야 한다. 또한 활선작업시 공법별 사고확률을 도출하여 이에 대한 대비를 하여야 하며 작업 내용에 따른 로봇의 자유도와 필요 공구에 대한 분석을 수행하고 이러한 기술적 검토를 토대로 시뮬레이션을 통하여 작업절차에 대한 검증을 수행함으로써 개발기간을 단축시킬 수 있다.

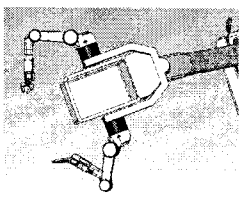
배전선로의 경우 상용화된 활선차량의 붐에 탑재가 가능하도록 로봇을 개발함으로써 개발비용을 줄일 수 있다. 또한 산업용 로봇과 같이 미리 프로그램된 작업 순서에 따라 작업을 수행하기에는 선로조건 및 작업내용이 다양하며, 예상치 못한 상황이 발생할 수 있으므로 이러한 상황에 능동적으로 대처하기 위해여 원격조작 방식으로 작업자와 병행하여 작업을 수행할 수 있도록 로봇을 개발하여야 경제성 및 안전성을 확보할 수 있다. 또한 작업자를 단순 보조하는 역할이 아닌 작업자의 역할을 대신하여 수행할 수 있기 위해서는 사람과 같이 두 팔로 작업이 가능하여야 한다.

3.2 로봇의 탑재 방식 분석

활선작업용 차량의 붐 장치에 로봇을 장착하는 방법은 그림 1에서 보여주는 것처럼 버켓 측면에 수직 혹은 평행하게 장착하거나 버켓 양 측면에 장착하는 방식을 고려할 수 있다. 표 1에서 보여주는 것처럼 각 방식마다 장단점이 있으나 버켓 양 측면에 로봇의 팔이 위치하는 것이 로봇이 작업자와 병행하여 작업을 수행하기 가장 적합한 위치이다.



(a) 수직방향 탑재 (b) 평행방향 탑재



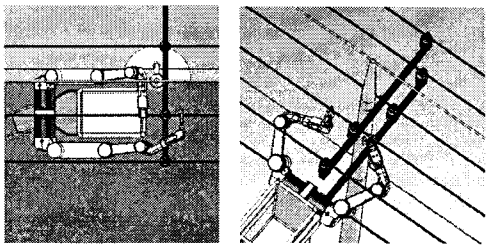
(c) 버켓 측면 탑재

그림 1. 활선차량 붐 장치에 로봇 탑재 방법

국내 배전선로 중 1단 선로의 경우에는 그림 1(c)와 같이 버켓 양 측면에 부착되어도 선로 중앙의 B상 선로에 로봇이 접근하여 작업이 가능하나 2단 선로인 경우 상부의 선로에 대한 작업을 수행하고자 할 경우 버켓 측면의 로봇과 선로와의 충돌로 인하여 접근이 불가능하다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 그림 2(a)와 같이 붐 장치의 윈치 축에 로봇을 설치하고 로봇의 베이스와 어깨부 사이에 오프셋을 두어 로봇의 길이를 확장하거나 그림 2(b)와 같이 윈치축으로부터 버켓 둘레로 지지대를 설치하고 버켓 끝단에 로봇을 설치하는 방법이 있다. 그림 2(b)의 경우에는 로봇 암의 길이를 축소하여 고하중 취급이 가능하다.

표 2. 로봇 탑재 방식 비교

탑재방식	특 징
수직방향 탑재	-구조적으로 안정적 -작업자와 동시 작업 불가능
평행방향 탑재	-작업자와 동시 작업 가능 -윈치 회전축 모멘트 발생
버켓 측면 탑재	-작업자와 동시 작업 가능 -윈치 회전축 비틀림 모멘트 완화



(a) 윈치축 상부 탑재 (b) 버켓 전면부 탑재

그림 2. 버켓 측면에 로봇 탑재 방법

3.3 로봇 구조 설계

활선로봇을 설계하는데 있어 상용화된 산업용 로봇을 활용할 경우 개발 기간을 단축시키면서 신뢰도를 향상시킬 수 있기에 상용 산업용 로봇의 제원을 분석하였으며 일본 덴소사의 VM60B1D-W 로봇의 경우 본 연구에서 개발하고자 하는 로봇과 유사한 제원을 갖추고 있음을 확인하였다. 표 3은 덴소 로봇의 주요 제원과 활선로봇으로 적용을 위한 제원을 비교하였다. 활선작업용 로봇의 경우 산업용 로봇처럼 빠른 작업 속도를 필요하지 않으므로 로봇의 동작속도가 0.5m/sec 되도록 적정한 감속비를 선정하고 로봇 손의 추가 길이를 고려하여 작업반경이 1.5m가 되도록 링크 길이 조절를 조절하며 붐 장치에 부착시 자체 하중을 경량화 및 절연을 위한 FTP 재질 사용토록 하였다. 그림 3은 설계된 로봇의 관절 형태를 보여준다.

표 3. 덴소 로봇의 주요 제원 및 목표 제원

항목	제원	목표 제원	적용방안
자유도	6	동일	
작업반경	1.3m	1.5m	로봇 손 부착, 링크길이 신장
자체하중	78kg	60kg	링크 재료 변경
가반하중	10kg (pull reach)	동일	
동작속도	8.3m/sec	0.5m/sec	감속비 재선정

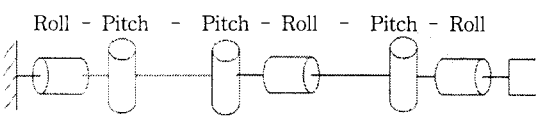


그림 3. 설계된 로봇의 관절 형태

3.4 기구학 해석 및 시뮬레이션

설계된 양팔형 로봇의 손이 도달하는 위치와 방향을 구하기 위해 로봇 관절의 좌표계 설정 및 모델링을 통하여

기구학 해석을 수행하였다. 그림 4는 설계된 로봇의 D-H 모델 좌표계를 보여주며 표 4와 표 5는 D-H 변수를 보여준다.

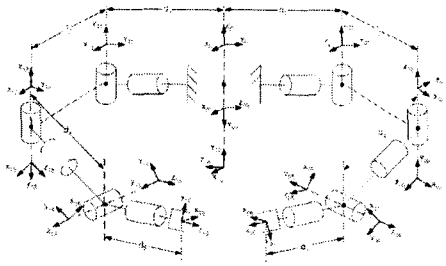


그림 4. 양팔 로봇의 D-H 모델 좌표계

표 3. 왼쪽 팔의 D-H 변수

변환	d	a	θ	α
B→0	0	0	0	-90°
0→1	d_1	0	θ_{01}=0	90
1→2	0	l_2	θ_{02}=90	0
2→3	0	0	θ_{03}=90	90
3→4	d_4	0	θ_{04}=90	90
4→5	0	0	θ_{05}=0	-90
5→6	d_6	0	θ_{06}=90	0

표 4. 오른 팔의 D-H 변수

변환	d	a	θ	α
B→0	0	0	0	90°
0→1	d_1	0	θ_{11}=0	-90
1→2	0	l_2	θ_{12}=-90	0
2→3	0	0	θ_{13}=-90	-90
3→4	d_4	0	θ_{14}=-90	-90
4→5	0	0	θ_{15}=0	90
5→6	d_6	0	θ_{16}=-90	0

설계된 로봇의 기구학적 제원에 근거하여 배선선로 상에서 활선작업시 선로 및 전주 구조물과의 간섭을 확인하여 위하여 그래픽 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5는 전주 측면에서 접근하여 작업을 수행하는 과정을 보여주며 그림 6은 전주 정면에서 전선을 파지하는 과정을 보여준다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 2단 선로의 상부 B상 선로에 접근성 및 전주 및 완금와의 충돌 여부를 검증하였다.

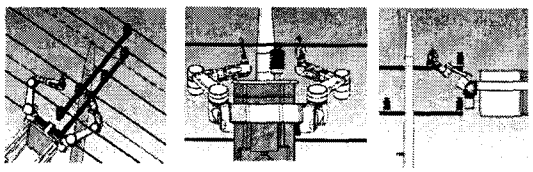


그림 5. 전주 측면에서 접근하여 작업 수행 시뮬레이션

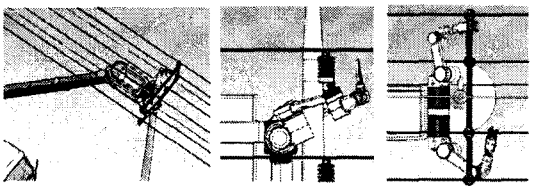


그림 6. 전주 정면으로 접근하여 작업 수행 시뮬레이션

4. 결 론

본 논문에서는 전력선의 무정전 유지보수 작업을 위한 활선작업 로봇을 설계하였다. 국내 선로에 적합한 로봇의 설계를 위하여 국내외의 활선작업 로봇에 대한 개발 현황을 분석하였으며 국내에서 활용되고 있는 활선작업용 차량에 로봇을 탑재하기 위한 최적의 탑재 방법에 대한 분석을 하였고 로봇의 기구학적 형태를 설계하고 이에 대한 기구학적 해석을 수행하였으며 이를 바탕으로 배전선로 및 전주 부속물과의 간섭을 그래픽 시뮬레이션을 통하여 검증하여 설계의 타당성을 확인하였다.

활선공법이 현재는 배전선로에 대해서만 적용되고 있으나 장기적으로는 초고압 송전선로를 포함한 모든 선로에 대하여 활선공법이 적용될 것으로 전망된다. 따라서 1단계로 배전선로 활선작업을 위한 로봇 및 공구를 개발하고 활선작업 관련 기준, 규정, 지침 등을 정비한 후 개발된 로봇의 실증을 통하여 적용 범위를 확대하여야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] 한국전기공사협회, 배전선로 활선작업용 보조암 개발, KEPRI Report KEPRI-99-000, 2001, 12

[2] Shina Tanaka et al, "Work Automation with the Hot - Line Work Robot system Phase II," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp1261-1267, April 1996

[3] Moriyuki Nakashima et al, "Application of Semi - Automatic Robot Technology on Hot-Line Maintenance Work", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 843-850, 1995

[4] L. F. Penin et. all, "Telerobotic system for Live Power Lines Maintenance:ROBTET", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2110-2115, May 1998