

활선 현수애자련 자동 청소 및 점검용 로봇시스템의 개발과 적용

박준영[#], 조병학^{*}, 변승현^{*}, 이재경^{*}

Development of Robot System for Automatic Cleaning and Inspection of Live-line Suspension Insulator Strings and Its Application

Joon-Young Park[#], Byung-Hak Cho^{*}, Seung-Hyun Byun^{*} and Jae-Kyung Lee^{*}

ABSTRACT

To prevent an insulator failure, an automatic cleaning and inspection robot was developed for suspension insulator strings. The robot autonomously moves along the insulator string using the clamps installed on its two moving frames. Especially, unlike the existing cleaning robots using jets of water, the robot system adopts a dry cleaning method using rotating brushes and a circular motion guide. In addition, a mechanized brush bristles and a voltage-balancing contactor are devised to increase cleaning efficiency and to prevent arc generation under live-line conditions, respectively. We confirmed its effectiveness through experiments.

Key Words : Insulator cleaning (애자 청소), Insulator inspection (애자 점검), Dry cleaning method (건식청소), Suspension insulator string (현수애자련), Live-line maintenance (활선 정비)

1. 서론

기간 산업으로서 중요한 역할을 하고 있는 전력산업은 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위하여 송전선로를 고장 없이 운영하는 것이 무엇보다 중요하다. 애자 청소 및 점검 작업은 이를 위한 일환으로서 애자의 절연 저하를 사전에 예방하기 위해 수행되는 작업이다. 하지만, 그 작업이 고압·고소의 위험한 환경 하에서 이루어지기 때문에 작업의 능률과 정밀도가 떨어질 뿐만 아니라 사회적인 3-D 기피 현상과 맞물려 전문인력의 확보가 어려울 것으로 전망되고 있다. 따라서, 첨단 로봇

을 이용한 자동화가 요구되고 있는 실정이다.

이를 위해 일본애자(주)는 활선애자점검로봇¹과 활선애자청소로봇²을 개발하였으며, 중부전력과 사국전력에서 사용하고 있다.³ 그리고 중국에서는 500kV DC 송전선 애자청소용 로봇⁴을 개발하여 90년도 초반부터 적용하고 있고, 이탈리아에서도 유사한 로봇시스템⁵을 개발한 사례가 있다. 반면, 국내에서는 벽면 이동 로봇과 같이 고소(高所) 작업용 로봇^{6,7}이 개발된 사례는 있지만, 활선 애자청소로봇의 개발에 성공한 사례는 아직 없다.

하지만, 전술한 기존의 주수식(注水式) 애자 청소로봇들은 애자 청소를 위하여 물을 사용한다는

접수일: 2007년 3월 27일; 게재승인일: 2007년 9월 7일

교신저자: 한전전력연구원 수화력발전연구소

E-mail: asura@kepco.co.kr Tel: (042) 865-5393

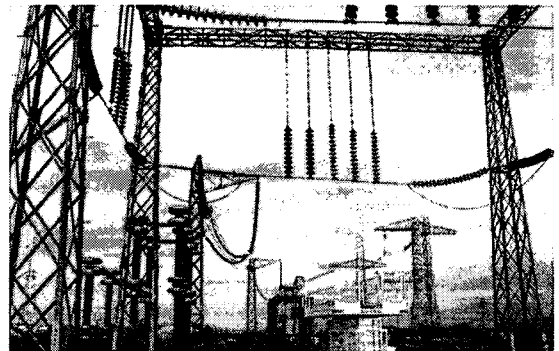
* 한전전력연구원 수화력발전연구소

공통점을 가지고 있기 때문에, 충분한 세정을 위하여 많은 양의 물을 필요로 한다. 이로 인하여 특히 송전선로가 산악지대나 해상에 위치한 경우에는 그 적용과 운용에 사실상 어려움을 가지고 있으며, 도회지에서는 오염된 세정수의 비산(飛散)으로 인해 민원이 유발될 수 있다. 또한, 물을 공급하기 위한 물탱크와 물 분사 기구들을 탑재해야 하므로 기구부의 경량화가 어려운 실정이다. 특히, 애자 점검에 사용되는 기존의 절연저항 측정기는 교류 바이패스 콘덴서를 시험대상 애자에 병렬로 접속하는 방식을 채용하고 있어서 대상 애자의 분담전압을 불필요하게 상실시킨다.

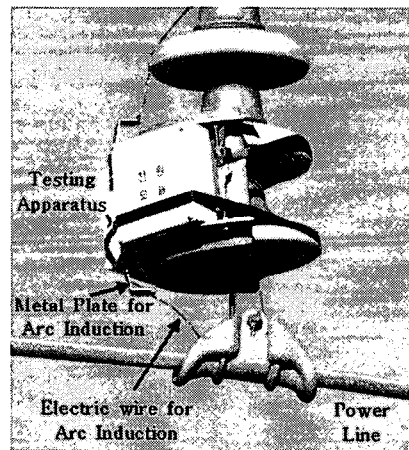
상기한 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 물을 사용하지 않는 건식청소 방식과 애자의 절연기능 유지가 가능한 점검 방법을 채용하여 345kV 송전선로의 현수애자련을 위한 활선 애자 청소 및 점검용 로봇 시스템을 개발하였다. 본 로봇은 클램프를 사용하여 애자련을 따라 자율 주행하면서, 회전 브러시와 CM Guide (Circular Motion Guide)를 사용한 건식 청소방식으로 애자표면을 직접 청소한다. 뿐만 아니라, 본 로봇의 회전 브러시에는 청소 효율을 향상시키기 위한 기계화 브러시모(mechanized brush bristles)와 활선 상태에서 아크의 발생을 방지하기 위한 등전위 접촉자(voltage-balancing contactor)를 장착하고 있다. Table 1 은 전술한 기존의 활선애자 청소로봇과 한전 전력연구원이

개발한 로봇의 메커니즘 및 특징의 비교를 보여준다. 또한, 본 논문에서는 로봇을 애자련 위에 설치 및 철거하기 위해 개발된 설치·철거 기구를 함께 소개하고, 기능 및 모의현장 성능시험과 고창전력 시험센터에서 수행한 활선 성능시험의 결과를 통해 개발한 로봇시스템의 효용성을 보인다.

2. 작업 환경 분석



(a) Gochang power testing center



(b) Installation of Testing Apparatus

Fig. 1 Control/communication function tests

Table 1 Comparison of mechanism characteristics between robot developed by KEPRI and existing robots

개발 국가	일본	중국	이탈리아	KEPRI
Tether	공압 호스	공압 호스	물 공급용 절연호스	없음 원격조정
세정 방법	공압 주수 세정방식	공압 주수 세정방식	주수 세정방식	회전 브러시
포획 애자	2.5개	2.5개	3개	2개
점검 기능	별도의 로봇 이용	없음	없음	절연저항 측정방식
구동 방식	Cap Clamp	Roller Wheel	Caterpillar	Porcelain Skirt Clamp

실제 로봇 개발에 앞서, 활선 초고압 환경이 제어기와 무선통신장치에 미치는 영향을 분석하기 위하여 한국전력공사의 고창전력시험센터에서 제어/통신 시험을 수행하였다. 시험 장치는 제어 및 통신 모듈(2.4GHz, 10mW), 전원 모듈, 소형 카메라, 탈착 가능한 아크 유도기로 구성되어 있다. Fig. 1

은 고장전력시험센터의 송전애자용 옥의 실증 시험설비와 애자련에 시험 장치를 장착한 모습을 보여준다. 시험은 (1) 사선 상태 (2) 활선 상태(아크 미발생, 아크 유도기 미장착) (3) 활선 상태(아크 발생, 아크 유도기 장착)의 경우에 대해 수행하고, 그 결과를 비교하였다.

먼저 제어 기능을 시험하기 위하여 가압 전·후에 원격으로 시험 장치에 장착된 릴레이를 제어해보았으며, 현재의 릴레이 상태를 수신 받아 릴레이의 동작 여부를 확인해 보았다. 그 결과 아크를 유도시킨 경우를 제외하고는 활선 상태에서도 원격제어가 잘 이루어짐을 확인하였다. 하지만, 아크가 발생한 경우에는 원격제어의 성공률이 20%에 그쳤으며 종종 잘못된 신호를 받기도 하였다.

다음으로, 무선통신 기능을 시험하기 위하여, 소형 카메라의 영상을 무선통신을 통해 받아 보았다. 실험 결과, 활선 상태에서 아크가 미발생한 경우에는 가압 전·후 모두 깨끗한 영상을 수신 받을 수 있었던 반면, Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 아크 유도기를 장착하여 일부러 아크를 발생시킨 경우에는 노이즈가 굉장히 많은 영상을 얻었으며 영상도 쉽게 수신 받을 수 없었다.

이상의 실험 결과는 로봇이 실제로 활선 상태에서 적용되기 위해서는 아크 발생 방지를 위한 장치가 장착되어야 함을 보여준다.

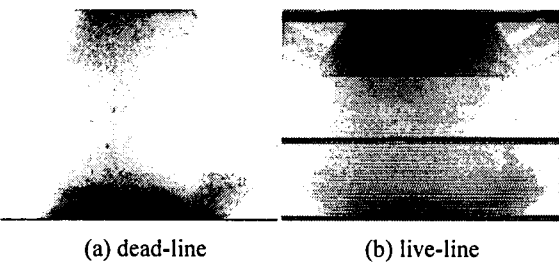


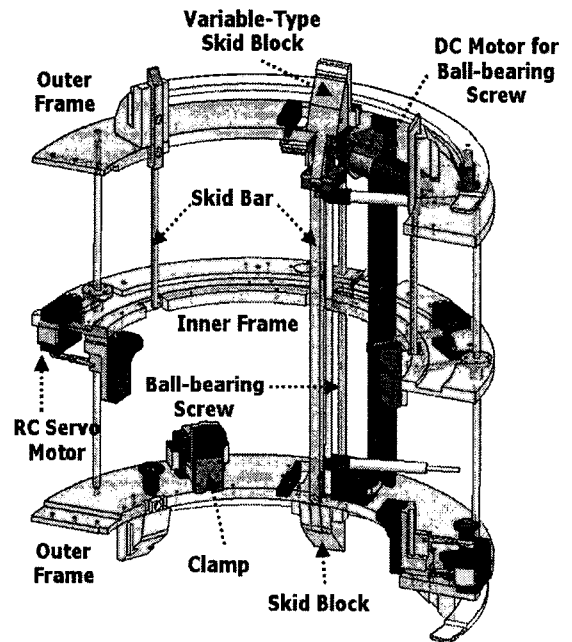
Fig. 2 Test results of communication function when arc is generated

3. 로봇의 기구학적 설계

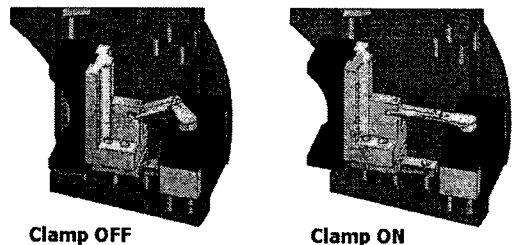
3.1 이동 메커니즘의 설계

이동 작업은 애자련을 따라 단순히 직선 운동만을 하므로 볼스크류를 이용하여 구현하였다. 또한, 이동을 위하여 로봇을 외부 프레임부와 내부 프레임부로 구성하고, 각각에 장착된 클램프를 사

용하여 애자의 자기(瓷器) 부분을 교대로 잡으면서 이동하도록 하였다. 이 클램핑(clamping) 방식은 포획애자수가 2개 이내로 기존 메커니즘에 비해 절연 측면에서 우수하며, 기구부가 프레임의 역할을 겸해 구조가 간단하고 로봇의 경량화가 가능하다. Fig. 3은 설계된 로봇의 이동 메커니즘을 보여준다. 클램프는 RC 서보 모터를 통해 구동되는 2개의 링크 구조로, 애자 자기 부분을 클램핑할 때 2자유도의 링크가 기계적으로 뒤로 밀리지 않게 하기 위하여 특이점(singularity)에 빠지도록 설계하였다.



(a) Detailed design



(b) Clamping operation

Fig. 3 Kinematic design for moving mechanism

3.2 청소 메커니즘의 설계

먼저 건식 청소를 위한 브러시로는 애자의 청소 면이 원형이라는 점과, 애자의 밑면이 오손물이 부착되기 쉬운 복잡한 형상으로 되어 있다는 점을 고려하여 회전형 브러시를 선택하였다. 다음으로, 회전 브러시가 원형의 애자 면을 따라 이동하면서 청소하기 위해서는 애자 캡(cap) 주위로 360도에 걸쳐있는 원형의 가이드 레일이 필요하다. 하지만, 실제로 로봇을 애자면에 장착하기 위해서는 이러한 구조의 가이드 레일은 적용이 불가능하므로, 가이드 레일 대신에 2개의 회전 브러시가 장착된 CM Guide를 애자 캡 주위를 따라 원 운동시킴으로써 청소 작업을 수행하는 구조로 설계하였다.

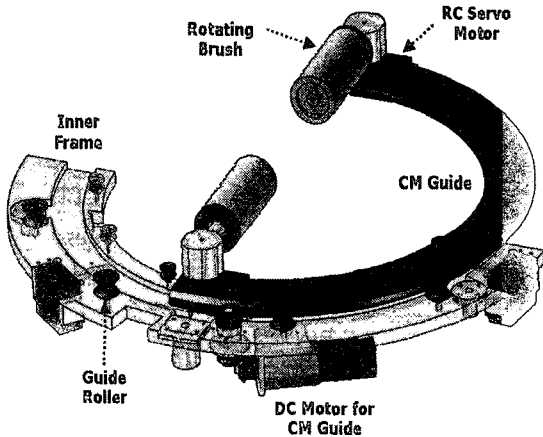


Fig. 4 Kinematic design for cleaning mechanism

Fig. 4는 상세 설계된 청소 메커니즘을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 회전 브러시가 장착된 CM Guide는 내부 프레임 위에서 베벨기어-평기어의 조합에 의해 구동된다. 브러시의 회전에는 소형 DC 모터를 사용하였고, 브러시의 개폐 동작에는 RC 서보 모터를 사용하였다.

3.3 점검 메커니즘의 설계

점검 메커니즘은 Fig. 5와 같이 RC 서보 모터에 의해 구동되는 회전축과, 회전축에 장착된 2개의 점검봉으로 구성되어 있으며, 회전축을 회전시킴으로써 애자의 캡에 점검봉을 접촉시켜 애자의 절연 저항 값을 측정하도록 설계하였다.

Fig. 6은 점검 메커니즘과 연계하여 사용되는 절연저항 측정기의 구성을 보여준다. 본 측정기는 애자의 절연기능을 유지시키기 위하여 교류 바이패

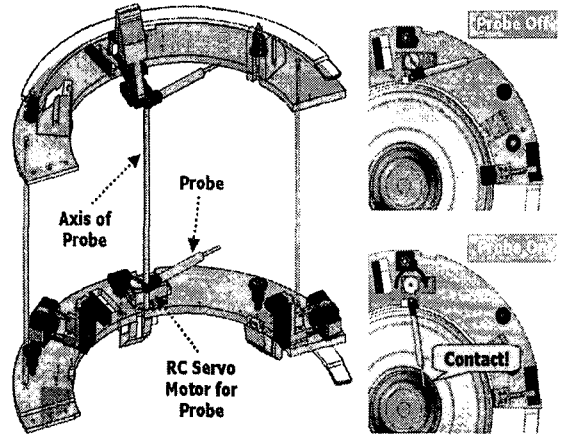


Fig. 5 Kinematic design for inspection mechanism

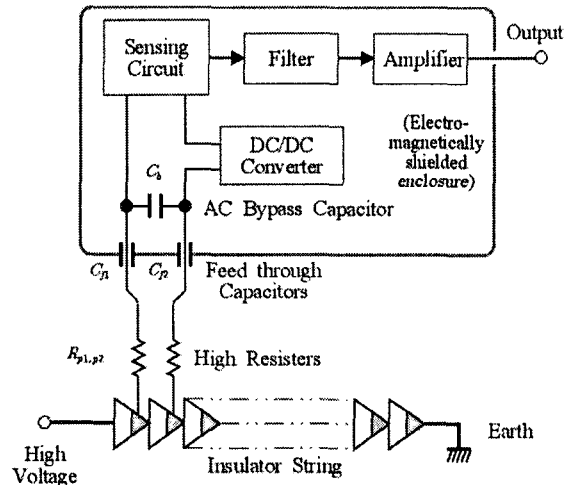


Fig. 6 Configuration of live-line insulator tester

스 콘덴서 C_b 가 각각 $150M\Omega$ 의 값을 가지는 저항 R_{p1} 과 R_{p2} 를 통해 측정대상 애자에 접속되도록 설계되어 있다. 그리고, 관통형 콘덴서 C_{f1} 과 C_{f2} 가 측정 신호선에 설치되는데, 이들의 한쪽 단자는 전자회로를 감싸는 전자기 차폐체(electromagnetic shield)에 접속되어 있다. 이 콘덴서들은 절연저항 측정기가 점검봉에 접속되어 사용될 경우 측정기의 전자회로에 유입되는 누설전류를 전자회로 외함(전자기 차폐체)으로 우회시켜 전압 상승에 의한 전자회로의 고장을 방지하는 역할을 수행한다.

3.4 결합 메커니즘의 설계

현수애자면에 로봇을 장착하기 위해서는 Fig. 3

(a)와 같은 구조를 가지는 로봇의 윙 2조가 결합되어 서로 개폐가 가능한 구조이어야 한다. 이를 위하여 결합 메커니즘은 일종의 캠-팔로우어(cam-follower) 구조를 사용한다. Fig. 7은 상세 설계된 현수애자런용 결합 메커니즘의 모습이다.

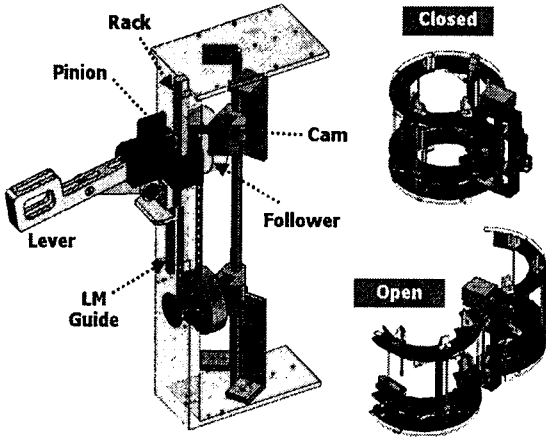


Fig. 7 Kinematic design for wing connection mechanism

구동 원리를 상술하면 다음과 같다. 먼저 레버를 돌려서 회전시키면, 레버와 링크로 연결된 LM Guide(Linear Motion Guide)가 직선 운동을 하게 되고 LM Guide의 슬라이더(slidebar)에 장착된 랙(rack)이 직선 운동을 하게 된다. 이 움직임은 피니언(pinion) 기어의 회전운동으로 변환되고, 피니언 기어는 원통형의 팔로우어와 결합되어 있기 때문에 팔로우어가 회전하게 된다. 팔로우어가 회전함에 따라 팔로우어에 장착된 두 개의 핀(pin)이 직선형으로 파여진 캠을 따라서 움직이므로써 캠을 회전시킨다. 최종적으로 캠이 회전함에 따라 각각의 캠에 장착된 로봇 윙의 외부 프레임이 회전하여 로봇 윙이 서로 열리거나 닫히게 된다.

3.5 기계화 브러시 모

처음 개발 시에는 회전 브러시의 모로 단순히 SUS 재질의 모를 부착하여 사용하였다. 하지만, 청소 작업을 반복 수행할 경우 모가 서로 얽히게 되어 청소 효율이 떨어지는 현상이 발생하였다. 이는 복잡한 형상의 애자 밀면 깊숙한 곳까지 닦기 위해 부득이하게 모의 길이가 너무 길어짐으로 인해 나타나는 현상이었다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여, 현수애자런

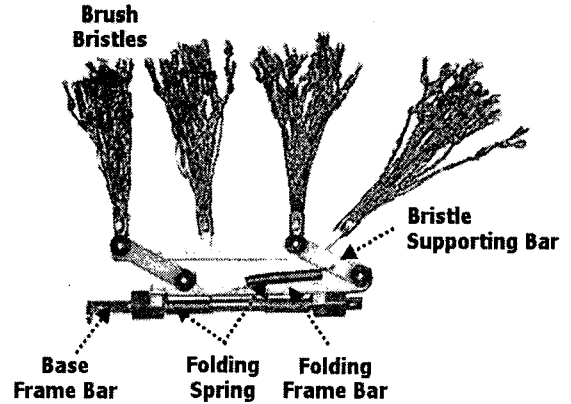


Fig. 8 Mechanized brush bristles

용 로봇의 개발 시에는 복잡한 굴곡 형상의 애자 밀면 청소에 적합하도록 Fig. 8과 같은 기계화 브러시 모를 고안하였다. 기계화 브러시 모는 회전 브러시 위에 2조가 180도 간격으로 장착된다. 보다 자세히 설명하면, 기계화 브러시 모는 베이스 프레임인 취부금구(base frame bar)와 브러시 모 사이에 (1) 전·후 회전이 가능한 접이식 프레임바(folding frame bar)와 (2) 좌·우 회전이 가능한 모 지지대(bristle supporting bar)로 연결함으로써 브러시 모의 유연한 움직임을 가능하게 해주는 구조를 가지고 있다. 따라서 브러시 모는 회전 브러시가 회전하는 동안 원심력에 의해 펼쳐지는 동시에 복잡한 굴곡 형상의 애자 홈을 따라 유연하게 좌우로 이동이 가능하므로, 애자 홈의 측면과 브러시 모 사이에서 발생하는 불필요한 마찰을 최소화하여 전력손실을 줄이고 브러시 모가 부러지는 것을 방지한다. 또한, 청소작업 수행 시 브러시 모에 마찰력이 가해지더라도 모 지지대는 항상 회전 브러시 원통의 둘레에 수직으로 세워지도록 기계적으로 설계가 되어 있어 청소효율을 향상시킨다. 기계화 브러시 모는 브러시가 비회전(非回轉) 시에는 수납이 용이하도록 접이용 스프링들에 의해 각각 회전 브러시의 축방향과 원주방향으로 접힌다.

3.6 등전위 접촉자(아크 방지 장치)

본 로봇의 경우 브러시를 이용하는 특성 상 애자 사이에 금속 재질의 브러시를 삽입 시 금속인 애자 캡과의 사이에서 일어나는 아크로 인해 전자기 장애(electromagnetic interference)가 심각할 정도로 발생하게 된다. 이로 인해 로봇과 원격제어기

사이의 무선통신기능이 상실되거나 로봇에 탑재된 마이크로프로세서가 오동작할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 9의 등전위 접촉자를 개발하였다. 등전위 접촉자는 회전 브러시의 끝단에 장착되어 브러시 삽입 시 더듬이 형상의 접촉자가 애자 캡에 접촉되며, 회전 브러시가 회전하더라도 접촉자가 회전하지 않고 애자 캡과의 접촉을 지속적으로 유지할 수 있도록 접촉자와 브러시 사이에 슬립링이 부착되어 있다. 등전위 접촉자의 역할을 살펴보면, 일종의 피뢰기로서 브러시 삽입 시 발생하는 아크의 크기를 감쇄시킬 뿐만 아니라, 로봇과 대상 애자를 등전위로 만드는 역할을 수행하여 청소 시 가압부에 브러시 모가 접촉하더라도 로봇이 안전하게 청소작업을 수행할 수 있게 한다.

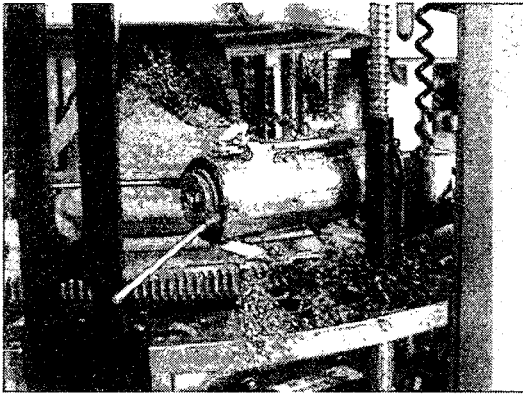


Fig. 9 Voltage-balancing contactor

4. 로봇의 동역학적 설계

4.1 재료의 선정

로봇의 기구부를 살펴보면, 그 역할과 특성에 따라서 다음과 같이 크게 네 부분으로 나뉘어진다.

- 마찰력이 작아야 하는 부품: 스키드바, 스키드 블록 등
- 고강도를 요구하는 부품: 기어, 가이드 롤러, 볼스크류 등
- 뒤틀림이 적어야 하는 부품: CM Guide, 클램프, 결합 기구 등
- 로봇의 골격을 유지하는 부품: 외부 프레임, 외부 프레임 간의 연결판 등

각 부품들의 재료는 그 역할과 특성에 적합하

도록 선정하였다. 마찰력이 작아야 하는 부품은 매우 가벼우면서도 마찰 계수가 0.07~0.11로 매우 작은 엔지니어링 플라스틱을 사용하였다. 고강도를 요구하는 부품들은 탄소강을 사용하였고, 뒤틀림이 적어야 하는 부품들에는 탄소강보다 가벼우면서 강도가 높은 알루미늄 합금을 사용하였다.

마지막으로 전체적인 골격을 유지하는 로봇의 외부 프레임 부분은 로봇 전체 부피의 상당한 부분을 차지하므로, 골격을 유지하기 위해 높은 강도를 가지면서도 로봇의 무게를 줄이기 위하여 가벼운 재료로 선정하였다. 이를 위하여 다양한 엔지니어링 플라스틱들의 물성을 조사하였고, 선별된 재료들의 비교 분석을 통해서 비중, 강도뿐만 아니라 다른 특성들도 로봇 프레임에 적합한 재료를 최종적으로 선정하였다. 그리고, 실제 프레임 제작에 앞서 MSC.visualNastran을 이용한 FEM 분석을 통해 선정된 재료가 로봇 프레임으로서 적합한지를 검증하였다. 이 때, 분석 조건은 각 로봇 원에 9kg씩, 총 18kg 정도의 하중이 외부 프레임의 하판에 균일하게 가해지고 있다고 가정하였다. Fig. 10은 그 결과로서 최대 변위가 단지 1.06mm 이고, 최대 응력은 14.1MPa로 선정한 재료의 인장강도 118MPa의 12% 정도의 값에 불과함을 알 수 있다. 이 결과는 선정된 재료가 로봇 프레임에 매우 적합하다는 것을 보여준다.

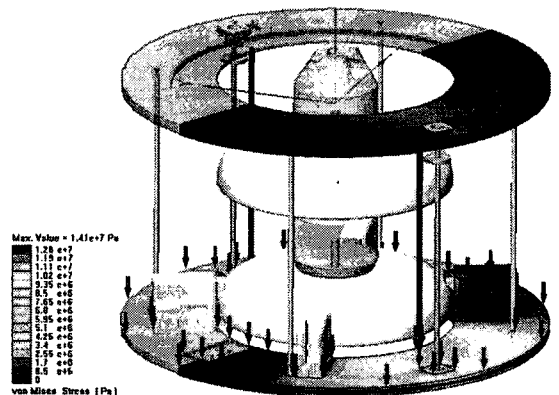


Fig. 10 FEM analysis of engineering plastic for robot frame

4.2 모터의 선정

먼저 볼스크류 모터와 기어를 선정하기 위하여 로봇 원의 무게가 최대 10kg(이동 기구부와 청

소 기구부가 각각 5kg)이고 각각의 기구부가 이동하는 데에 2.7 초가 소요된다고 가정하면, 이동에 필요한 힘과 속도는 다음과 같다.

- 힘 : $5\text{kgf} = 5 \times 9.81 = 49.05 \text{ N}$
- 속도 : $170\text{mm} / 2.7 \text{ sec} = 0.063 \text{ m/s}$

상기의 힘과 속도를 내기 위해 필요한 기어드 모터의 토크와 각속도를 볼스크류의 기하학적 관계로부터 구하여 보면 다음과 같다.

토크 = 0.1031Nm, 각속도 = 945rpm

다음으로, CM Guide 구동 모터와 기어를 선정하였다. 이 때, CM Guide 의 동역학은 비선형으로 그 모델링과 해를 구하는 것이 매우 어렵기 때문에, MSC.visualNastran 을 이용한 모의실험을 통해 CM Guide 구동에 필요한 최대 토크를 계산하였다. 그리고, 모터의 각속도는 CM Guide 의 회전속도 3rpm 과, CM Guide 와 구동 평기어 사이의 기어 비 19:1 로부터 구하였다. 최종적으로 구해진 CM Guide 구동 모터와 기어의 사양은 다음과 같다.

토크 = 0.1294Nm, 각속도 = 57rpm

마지막으로, 회전 브러시의 구동 모터와 기어는 다음의 조건을 만족하도록 선정하였다.

- (1) 기어드 모터의 길이가 작업 대상인 210kN 애자의 청소 면의 폭 80mm 보다 작을 것.
- (2) Air duct 청소에 사용되는 브러시의 회전속도가 570~2000rpm⁸ 인 것을 감안하여 브러시의 최대 회전 속도를 2000rpm 로 설정함.
- (3) 소형 · 경량이면서 가급적 토크는 클 것.

회전 브러시의 구동 모터와 기어로는 상기의 조건을 모두 만족하는 DC 모터와 기어를 선택하였으며, 출력되는 최대 토크는 0.033Nm, 최대회전속도는 2150rpm, 총 길이는 70.0mm 이다.

4.3 센서의 선정

로봇의 작업 위치는 상단 애자 클램핑 위치, 점검 위치, 청소 위치, 하단 애자 클램핑 위치로 나뉘어지며, 이러한 작업 위치의 감지는 외부 프레임에 대한 내부 프레임의 상대적인 위치 감지를 통해 이루어질 수 있다. 이를 위하여 외부 프레임 상 · 하판 사이에 센서 장착판을 설치하였으며, 이 센서 장착판에는 작업 위치 별로 리미트 스위치를 장착하였다. 다음으로, 청소를 위해 CM Guide 를 구동하기 위해서는 CM Guide 의 중립 위치 및 회

전 방향을 감지할 수 있어야 한다. 이를 위해 청소 기구부의 내부 프레임에 초소형 리미트 스위치를 장착하였다.

4.4 배터리의 선정

로봇 구동을 위한 배터리 선정은 전력이 소요되는 로봇 구성 요소인 (1) 모터, (2) 제어기, (3) 센서, (4) 절연저항 측정장치 별 소요전력의 합산을 통해 로봇의 구동에 필요한 총 소요전력을 구하였다. 그리고, 이와 함께 배터리의 용량과 무게 및 사용 시간을 고려하여 결정하였다. 배터리는 최종적으로 5 시간 연속 로봇 구동이 가능한 용량인 11.1V 5000mAh 의 리튬폴리머 배터리 4 개를 사용하기로 결정하였다.

5. 제어 시스템

로봇의 제어 시스템은 Fig. 11 과 같이 크게 호스트 제어 시스템과 로컬 제어 시스템으로 구성된다. 로봇 원격제어 및 감시를 위한 호스트 제어 시스템은 Windows XP 기반의 Tablet PC 로 구성되어 사용자에게 MMI 를 제공하고 무선 랜 통신을 통해 로컬 제어 시스템에 명령 커맨드를 주며, 로컬 제어 시스템으로부터 로봇의 운전 데이터 등을 받아 관리하게 된다. 로봇에 장착되는 로컬 제어 시스템은 Atmel 사의 Atmega128 을 이용하여 구성되는 임베디드 시스템으로, 3 개의 마이크로컨트롤러를 채용하여 크게 마스터 제어기와 슬레이브 제어기 2 개로 구성된다. 로컬 제어 시스템은 로봇을 직접 제어하고 로봇이 처리하는 I/O 를 모니터링 하는 역할을 하며, 마스터 제어기와 슬레이브 제

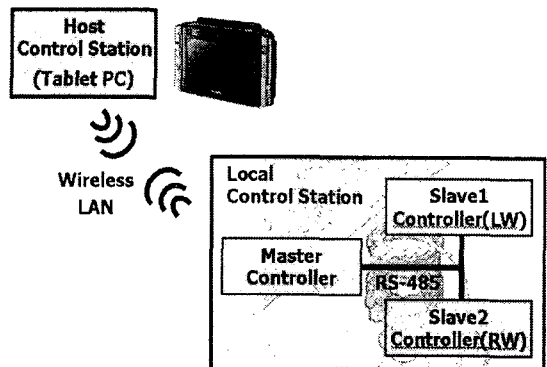


Fig. 11 Control system

여기 간의 인터페이스는 시리얼 통신(RS-485)을 통해서 구현되어 있다. Fig. 12는 로봇이 모든 클램프를 닫아 애자를 잡음으로써 애자런에 장착된 경우 로봇이 애자런 아래 방향으로 내려가면서 청소 작업을 수행하기 위한 제어 알고리즘을 보여준다. 이 제어 알고리즘은 로봇이 애자런의 맨 마지막 애자에 도착할 때까지 반복적으로 적용된다.

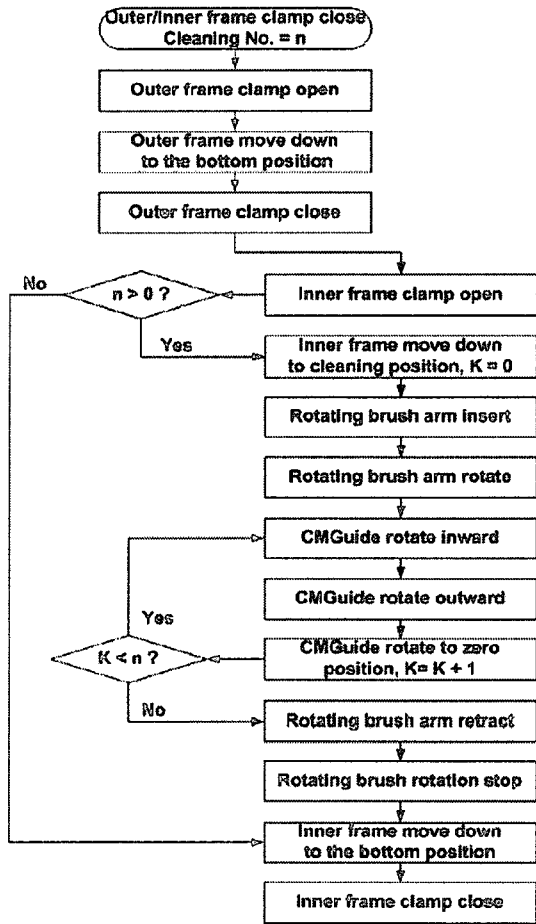


Fig. 12 Control algorithm for cleaning an insulator with a downward movement

6. 응용 소프트웨어

로봇의 소프트웨어는 크게 사용자 인터페이스와 실시간 로봇 원격 제어 및 감시기능을 수행하는 IncroTeleOp, 로봇을 직접 제어하는 IncroRobot으로 구성된다.

IncroTeleOp는 호스트 제어 시스템에서 구동되며, Fig. 13과 같은 MMI로 구성되어 있다. 그 구성을 살펴보면, 대상 철탑의 정보를 입·출력하는 철탑 정보 모드, 원격 제어를 통해 청소 및 점검을 수행하는 로봇 제어기 모드, 점검 작업결과를 출력하기 위한 애자 검사 모드와, 로봇을 수동으로 제어하거나 로봇의 현재 구동 상태를 확인하기 위한 로봇 정보 모드로 이루어져 있다.

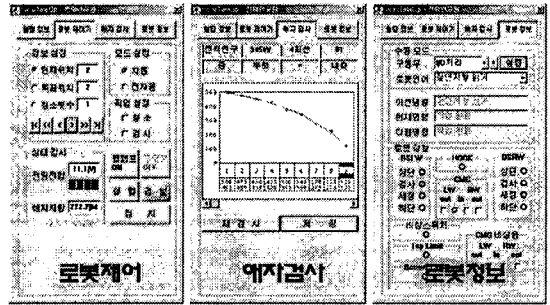


Fig. 13 Man-machine interface for host control station

IncroRobot은 로컬 제어 시스템에 탑재되는 제어 프로그램으로, 로봇을 제어하고 감시하는 기능 외에 호스트 제어 시스템과의 통신 및 로봇언어의 번역 등의 역할을 수행한다. IncroTeleOp와 IncroRobot 간 각종 정보의 전달은 무선 랜 통신에 의해 이루어진다.

7. 설치 · 철거기구

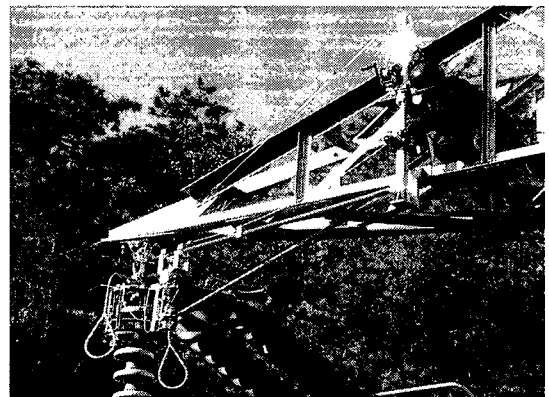


Fig. 14 Installation of robot on insulator string

국내 345kV 철탑은 상부에 선로가 있을 경우

이격거리가 확보되지 않기 때문에 작업자가 철탑 암 끝까지 진입할 수 없는 구조를 갖고 있다. 따라서 개발된 로봇을 실제로 활선 애자련에 적용하기 위해서는 작업자의 안전을 고려하여 원거리에서 로봇을 애자련에 설치 또는 철거하기 위한 기구가 필요하다. Fig. 14 는 개발된 설치·철거기구와 그 적용 모습을 보여준다. 본 기구를 이용하여 로봇을 설치 및 철거할 경우 2 명의 작업자가 필요하며 소요 시간은 2 분 내외이다.

8. 시험

8.1 청소효율 측정시험

애자 시료로는 오손도 $0.506\text{mg}/\text{cm}^2$ 의 E 등급 애자를 사용하였고, 로봇에 의한 청소 작업을 수행한 후 필세법(筆洗法)에 의해 오손도를 측정하였다. Table 2 는 전술한 절차의 실험을 통해 얻은 로봇의 청소효율 측정시험 결과이다. 이 표로부터 볼 수 있듯이 E 등급의 오손애자라도 2 회의 청소 작업만 수행하면 B 등급의 결과를 얻을 수 있었으며, 5 회를 청소할 경우에는 A 등급(청소효율 88.8%)의 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

Table 2 Test results on cleaning performance

Cleaning no	Conductivity ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Contamination level(mg/cm^2)	Efficiency (%)	Class
1	1268	0.173	65.8	C
2	717	0.098	80.7	B
3	701	0.096	81.1	B
4	615	0.084	83.4	B
5	414	0.056	88.8	A

8.2 절연저항 측정시험

애자 점검 시험은 다양한 절연저항 값의 애자를 구하기가 어려우므로, 두 애자의 캡 사이에 $0\text{M}\Omega$, $10\text{M}\Omega$, $47\text{M}\Omega$, $100\text{M}\Omega$, $220\text{M}\Omega$, $320\text{M}\Omega$ 의 기준 저항을 각각 병렬로 연결하여 이 저항 값을 측정하는 방식으로 진행하였다. Fig. 15 는 그 실험 결과로, 측정 오차의 평균은 0.006V 이고 최대 오차는 0.0688V 이었다. 따라서 측정 범위인 5V 범위에서 최대오차는 1.32%로서 신뢰성이 매우 높은 것을 알 수 있다.

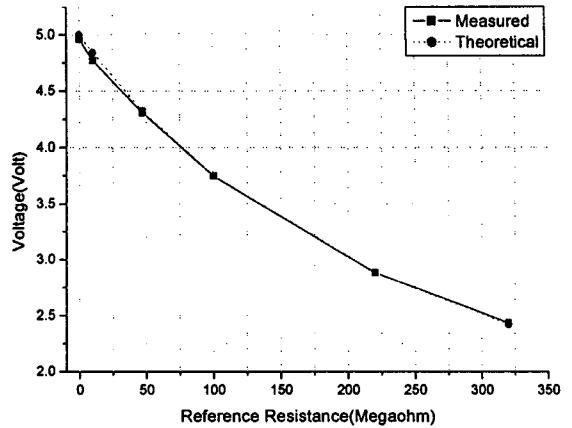


Fig. 15 Test results on inspection performance

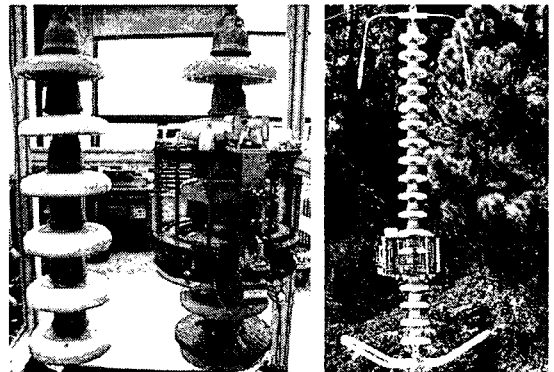


Fig. 16 Performance tests in mockup facilities

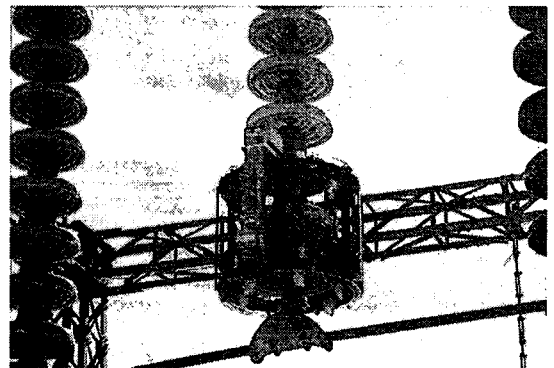


Fig. 17 Live-line performance test

8.3 모의현장 및 활선 성능시험

로봇의 모의현장 성능시험은 Fig. 16 과 같이 애자련 간이시험설비와 모의철탑설비에서 수행하였다. 시험 결과 로봇은 애자련 상에서 주행/청소/

점검 작업을 성공적으로 수행하였고, 애자 1 개에 대하여 청소(1 회)/점검/이동 작업을 수행하는 데에 31 초가 소요되었다. 최종적으로 활선 성능시험을 Fig. 17 과 같이 고창전력시험센터에서 수행하였으며, 활선 상태에서도 로봇이 모든 작업을 정상적으로 수행하는 것을 확인하였다.

9. 결론

본 연구에서는 현행 주수식 세정방식의 문제점을 해결하기 위하여 건식청소방식을 사용하는 345kV 송전선로의 현수애자런용 청소 및 점검용 로봇을 개발하였다. 본 로봇은 회전 브러시와 CM Guide 를 사용하여 애자표면을 직접 청소할 뿐만 아니라, 애자의 절연기능이 유지 가능한 절연저항 측정 방식을 통하여 애자 점검 작업도 수행한다. 또한, 청소 효율 향상을 위한 기계화 브러시 모와 활선 상태에서 아크 발생 방지를 위한 등전위 접촉자를 장착하고 있다. 개발한 로봇은 최종적으로 활선 성능시험을 통해 애자 청소 및 점검 작업을 성공적으로 수행함을 보였으며, 함께 개발한 설치·철거기구를 이용하여 로봇이 애자런에 성공적으로 설치 및 철거됨을 보였다. 본 로봇 시스템은 추후 실용화를 거쳐 상용화되면 송전선로의 안정적인 운영에 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업에 의하여 전력연구원(대흥전력)과 공동으로 개발한 송전선로 활선 애자청소 및 점검용 자동화 시스템 개발에 관한 기술개발결과임을 밝혀둔다.

참고문헌

1. Yoshio, S., Hiroshi, M., Fumio, K. and Mitsuharu, O., "A self-advancing deficient insulator detector," JP Patent 5006718, 1993.
2. Yoshida, A., "Hot-line insulator washing robot for transmission lines," Proc. of IERE Workshop on Robotized Hot Line Maintenance, 1988.
3. Sahaku, K., "Application of hot-line insulator washing robot to insulators in the 500kV central west power transmission lines of Shikoku Electric Power Co.," Electric Field Technology, Vol. 34, No. 403, pp. 51-54, 1995.
4. Yi, H. and Jiansheng, C., "The research of the automatic washing-brushing robot of 500kV DC insulator string," Proc. of IEEE 6th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live-Line Maintenance, pp. 411-424, 1993.
5. Paris, L., "Equipment to carry out maintenance operations, particularly washing, on insulator chains of high voltage electric lines," U.S. Patent 5 119 851, 1992.
6. Han, S. C., Yi, H. C. and Kim, E. C., "Study on the Design Constraints of the Wall-Climbing Mobile Robot Using Permanent Magnetic Wheels (Part 1 - Design Guideline)," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 69-76, 2004.
7. Han, S. C., Yi, H. C. and Kim, E. C., "Study on the Design Constraints of the Wall-Climbing Mobile Robot Using Permanent Magnetic Wheels (Part 2 - Design of Mobile Vehicle)," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 77-84, 2004.
8. Holopainen, R., Asikainen, V., Tuomainen, M., Bjorkroth, M., Pasanen, P. and Seppanen, O., "Effectiveness of duct cleaning methods on newly installed duct surfaces," Indoor Air, Vol. 13, Issue 3, pp. 212-222, 2003.