

### 345kV 송전선로 활선 현수애자런 청소로봇 시스템의 개발 및 적용

박준영\*, 조병학, 변승현, 이재경, 박두용  
한국전력공사 전력연구원

### Development of Cleaning Robot System for Live-line Suspension Insulator Strings in 345kV Power Lines and Its Application

Joon-Young Park, Byung-Hak Cho, Seung-Hyun Byun, Jae-Kyung Lee, and Doo-Yong Park  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - To prevent an insulator failure, an automatic cleaning robot was developed for suspension insulator strings. The robot autonomously moves along the insulator string using the clamps installed on its two moving frames, and 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. Moreover, a manual tool for its installation and removal is presented. We confirmed its effectiveness through experiments.

#### 1. 서 론

기간산업으로서 중요한 역할을 하고 있는 전력산업은 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위하여 송전선로를 고장 없이 운영하는 것이 무엇보다 중요하다. 애자 청소 작업은 이를 위한 일환으로서 애자의 절연 저하를 사전에 예방하기 위해 수행되는 작업이다. 하지만, 그 작업이 고압·고소의 위험한 환경 하에서 이루어지기 때문에 작업의 능력과 정밀도가 떨어질 뿐만 아니라 사회적인 3-D 기피 현상과 맞물려 전문 인력의 확보가 어려울 것으로 전망되고 있다. 따라서 첨단 로봇을 이용한 자동화가 요구되고 있는 실정이다.

하지만, 기존의 주수식(注水式) 애자 청소로봇들은 애자 청소를 위하여 물을 사용한다는 공통점을 가지고 있기 때문에, 충분한 세정을 위하여 많은 양의 물을 필요로 한다[1-3]. 이로 인하여 특히 송전선로가 산악지대나 해상에 위치한 경우에는 그 적용과 운용에 사실상 어려움이 있으며, 도회지에서는 오염된 세정수의 비산(飛散)으로 인해 민원이 유발될 수 있다. 또한, 물을 공급하기 위한 물탱크와 물 분사 기구들을 탑재해야 하므로 로봇 기구부를 경량화하기가 어렵다.

본 논문에서는 상기한 문제점들을 해결하기 위하여 물을 사용하지 않는 건식청소 방식을 채용하여 개발한 345kV 송전선로의 현수애자런을 위한 활선 애자 청소로봇 시스템을 소개한다. 또한, 본 논문에서는 로봇을 애자런 위에 설치 및 철거하기 위해 개발된 설치·철거 기구를 함께 소개하고, 모의현장 성능시험과 고장전력시험센터에서 수행한 활선 성능시험의 결과를 통해 개발한 로봇시스템의 효용성을 보인다.

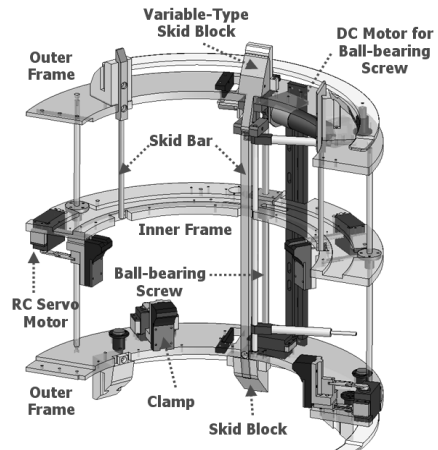
#### 2. 로봇 기구부의 설계

##### 2.1 이동 메커니즘의 설계

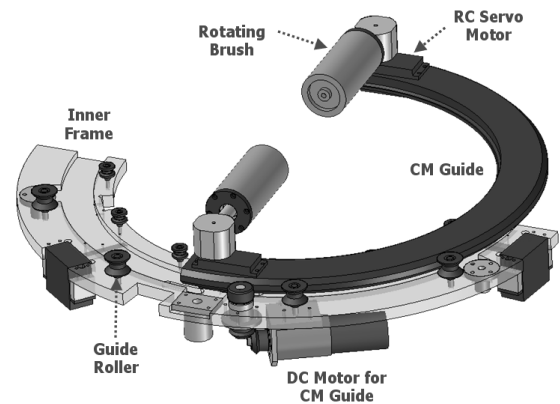
이동 작업은 애자런을 따라 단순히 직선 운동만을 하므로 볼스크류를 이용하여 구현하였다. 또한, 이동을 위하여 로봇을 외부 프레임부와 내부 프레임부로 구성하고, 각각에 장착된 클램프를 사용하여 애자의 자기(瓷器)를 교대로 잡으면서 이동하도록 하였다. 이 클램핑(clamping) 방식은 포획애자수가 2개 이내로 기존 메커니즘에 비해 절연 측면에서 우수하며, 기구부가 프레임의 역할을 겸해 구조가 간단하고 로봇의 경량화가 가능하다. 그림 1은 설계된 로봇의 이동 메커니즘을 보여준다. 클램프는 RC 서보 모터를 통해 구동되는 2개의 링크 구조로, 애자의 자기를 클램핑할 때 2자유도의 링크가 기계적으로 뒤로 밀리지 않게 하기 위하여 특이점(singularity)에 빠지도록 설계하였다.

##### 2.2 청소 메커니즘의 설계

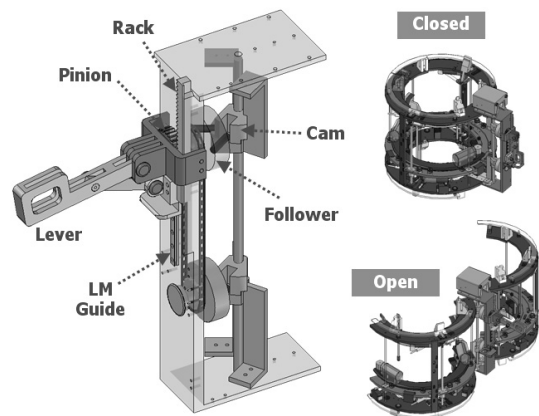
그림 2는 상세 설계된 청소 메커니즘을 보여준다. 먼저 건식 청소를 위한 브러시로는 애자 청소 면의 형상을 고려하여 회전형 브러시를 선택하였다. 다음으로, 회전 브러시가 원형의 애자 면을 따라 이동하면서 청소할 수 있도록 내부 프레임 위에서 베벨기어-평기어의 조합에 의해 구동되는 CM Guide(Circular Motion Guide)를 사용하였고, 이 위에 2개의 회전 브러시를 장착하였다. 브러시의 회전에는 소형 DC 모터를 사용하였고, 브러시의 개폐 동작에는 RC 서보 모터를 사용하였다.



<그림 1> 로봇의 이동 메커니즘



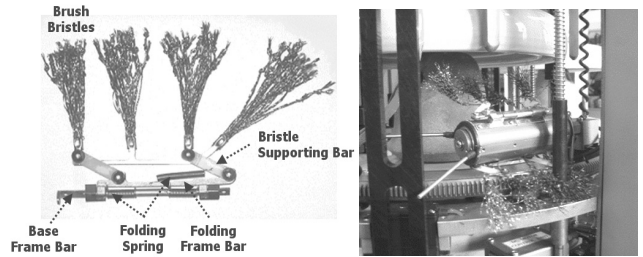
<그림 2> 로봇의 청소 메커니즘



<그림 3> 로봇의 결합 메커니즘

### 2.3 결합 메커니즘의 설계

현수애자련에 로봇을 장착하기 위해서는 그림 1과 같은 구조의 로봇의 링 2조가 결합되어 서로 개폐가 가능한 구조이어야 한다. 그림 3은 현수애자련용 결합 메커니즘으로, 그 구동 원리는 다음과 같다. 먼저 레버를 회전시키면, 레버와 링크로 연결된 LM Guide(Linear Motion Guide)가 직선 운동을 하게 되고 LM Guide의 슬라이더(slider)에 장착된 랙(rack)이 직선 운동을 하게 된다. 이 움직임은 피니언(pinion) 기어의 회전운동으로 변환되고, 피니언 기어는 원통형의 팔로우어와 결합되어 있어 팔로우어가 회전하게 된다. 팔로우어가 회전함에 따라 팔로우어에 장착된 두 개의 핀(pin)이 직선형으로 파여진 캠을 따라서 움직임으로써 캠을 회전시킨다. 최종적으로 각각의 캠에 장착된 로봇 링의 외부 프레임이 회전하여 로봇 링이 서로 열리거나 닫히게 된다.



〈그림 4〉 (a)기계화 브러시 모(左) (b)등전위 접촉자(右)

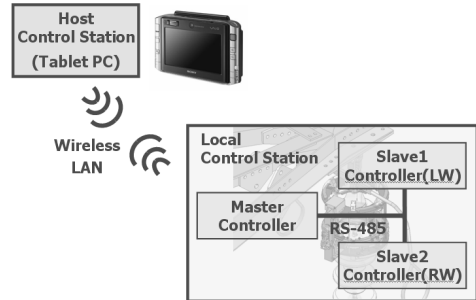
### 2.4 기계화 브러시 모와 등전위 접촉자

로봇의 청소 효율을 높이기 위하여 복잡한 굴곡 형태의 애자 밀면 장소에 적합하도록 그림 4a의 기계화 브러시 모를 고안하였다. 기계화 브러시 모는 모 자체의 유연한 움직임이 가능한 구조로 설계되어 있어 회전 브러시가 회전하는 동안 원심력에 의해 펼쳐지는 동시에 복잡한 굴곡 형태의 애자 홈을 따라 유연하게 좌우로 이동하면서 청소할 수 있다. 따라서 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 돌레에 수직으로 세워지도록 기계적으로 설계가 되어 있어 청소효율을 향상시킨다.

회전 브러시에는 전술한 기계화 브러시 모와 함께, 금속 재질의 브러시를 애자 사이에 삽입 시 금속인 애자 캡과의 사이에서 발생하는 아크로 인한 전자기 장애(electromagnetic interference)를 해결하기 위한 등전위 접촉자가 장착되어 있다. 등전위 접촉자는 회전 브러시의 끝단에 장착되어 브러시 삽입 시 더듬이 형태의 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 브러시 모가 접촉하더라도 로봇이 안전하게 청소작업을 수행할 수 있게 한다.

### 3. 제어 시스템

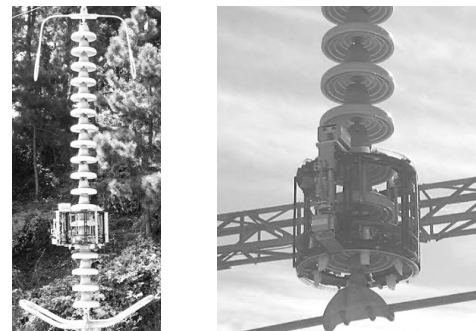
로봇의 제어 시스템은 그림 5와 같이 크게 호스트 제어 시스템과 로컬 제어 시스템으로 구성된다. 호스트 제어 시스템은 Windows XP 기반의 Tablet PC로 구성되어 사용자에게 MMI를 제공하고 무선 랜 통신을 통해 로컬 제어 시스템에 명령 커맨드를 주며, 로컬 제어 시스템으로부터 로봇의 운전 데이터 등을 받아 관리하게 된다. 로봇에 직접 장착되는 로컬 제어 시스템은 로봇을 직접 제어하고 로봇이 처리하는 I/O를 모니터링하는 역할을 하며, 마스터 제어기와 슬레이브 제어기 간의 인터페이스는 시리얼 통신(RS-485)을 통해서 구현되어 있다.



〈그림 5〉 로봇의 제어 시스템

### 4. 실험

로봇의 모의현장 성능시험은 그림 6a와 같이 모의철탍설비에서 수행하였다. 시험 결과 로봇은 애자련 상에서 청소 및 이동 작업을 성공적으로 수행하였고, 애자 1개에 대하여 청소(1회)/이동 작업을 수행하는 데에 24초가 소요되었다. 최종적으로 활선 성능시험을 그림 6b와 같이 고장전력시험센터에서 수행하였으며, 활선 상태에서도 로봇이 모든 작업을 정상적으로 수행하는 것을 확인하였다. 그림 7은 설치·철거기구를 이용하여 로봇을 애자련에 설치하는 과정을 보여준다.



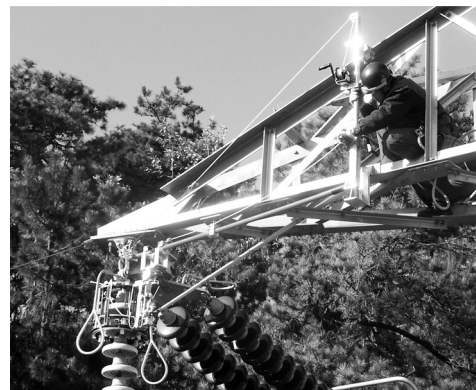
〈그림 6〉 (a) 모의현장 성능시험(左) (b) 활선 성능시험(右)

### 5. 결론

본 연구에서는 현행 주수식 세정방식의 문제점을 해결하기 위하여 건식청소방식을 사용하는 345kV 송전선로의 현수애자련용 청소로봇을 개발하였다. 본 로봇은 회전 브러시와 CM Guide를 사용하여 애자표면을 직접 청소할 뿐만 아니라, 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 설치철거기구를 이용하여 로봇이 애자련에 설치 및 철거됨을 보였다.

### 후 기

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업에 의하여 한전전력연구원 (주)대흥전력과 공동으로 개발한 송전선로 활선 애자 청소 및 점검용 자동화 시스템 개발에 관한 기술개발결과임을 밝힌다.



〈그림 7〉 로봇의 설치 과정

### [참 고 문 헌]

[1] Yoshida, A., "Hot-line insulator washing robot for transmission lines," Proc. of IERE Workshop on Robotized Hot Line Maintenance, 1988.  
 [2] 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.  
 [3] Paris, L., "Equipment to carry out maintenance operations, particularly washing, on insulator chains of high voltage electric lines," U.S. Patent 5 119 851, Jun. 9, 1992.