Development of Live-line Insulator Inspection Robot System for both Suspension and Tension Insulator Strings

박 준 영[†] · 이 재 경^{*} · 오 기 용^{**}
(Joon-Young Park · Jae-Kyung Lee · Ki-Yong Oh)

Abstract - In our previous paper, we developed an insulator inspection robot system for a suspension insulator string in the 345kV power transmission line. However, this robot cannot be applied to a tension insulator string, because its constituent insulators are different in diameter and height from those of a suspension insulator string. To solve this problem, we developed a new live-line insulator inspection robot system that is applicable to both suspension and tension insulator strings. We confirmed its effectiveness through live-line performance tests.

Key Words : Insulator, Inspection, Robot, Suspension insulator string, Tension insulator string

1. 서 론

애자련(Insulator String)은 다수의 애자(Insulator)가 서로 연결되어 구성된 절연체로 송전선로의 철탑과 고압 전선 사이에 설치되어 전선을 지지해주는 역할을 수행한다. 상기 애자련은 애자들의 연결 방향에 따라 크게 중력방향으로 연결된 현수애자련(Suspension Insulator String)과 중력에 수직 방향으로 연결된 내장애자련(Tension Insulator String)으로 나누어진다. 애자련을 구성하는 애자는 고전압, 기계적, 열적 스트레스 또는 염분·진에에 의한 오손(Pollution) 등으로 인해 점차 열화되기 때문에, 애자의 절연 성능 저하를 사전에 예방하기 위해 애자 점검 작업이 주기적으로 실시되고 있으며 이를 위한 애자 점검로봇들이 개발되고 있다.

일본 NGK 애자는 그림 1과 같이 활선상태에서 자율적으로 애자련을 이동하면서 불량애자를 검출하는 자주식 불량애자검출기를 현수애자련과 내장애자련에 대하여 각각 개발하였다[1, 2]. 일본 후지구라에서는 NGK 애자에 비해 경량화와 이동성을 향상시킨 내장애자련용 검사장치를 개발하였다[3]. 한국전력공사는 현수애자련 주행을 위한 Wheel-Leg 구동 방식을 고안하여 구조가 간단하고 애자련 주행 시 절연 성능이 우수하며 소형, 경량화를 통해 작업의 신뢰성과 능률을 향상시킨 활선 현수애자련 정밀 점검용 로봇을 그림 2와 같이 개발하였다[4, 5]. 또한 한국전력공사는 하나의 구동기(actuator)만으로 내장애자련 주행이 가능한 매우 단순화된 구조의 활선 내장애자련 주행로봇도 개발하였다[6].

(a) 현수애자련용

(b) 내장애자련용

그림 1 일본 NGK 애자의 자주식 불량애자검출기구

Fig. 1 Self-advancing deficient insulator detector for tension insulator strings

(a) 프로토타입

(b) 시작품

그림 2 한국전력공사의 활선 현수애자련 정밀 점검용 로봇

Fig. 2 Insulator inspection robot for live-line suspension insulator string

표 1 기존 애자 점검로봇의 적용 대상

Table 1 Application target of the existing insulator inspection robots

종류	NGK 애자		후지구라	한국전력공사	
	로봇1	로봇2		로봇1	로봇2
적용 애자련	현수	내장	내장	현수	내장

† 교신저자, 정회원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 · 공박
E-mail : asura@kepcoco.kr

* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임보연연구원

** 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

접수일자 : 2011년 2월 28일

최종완료 : 2011년 5월 12일

그림 3 로봇의 작업 대상인 345kV 송전선로용 애자의 종류
Fig. 3 Insulators for 345kV power transmission lines

전술한 애자 점검로봇들은 표 1에서 보여주듯이 현수애자련과 내장애자련 중에서 어느 한 종류만을 그 적용 대상으로 하고 있다. 이는 그림 3과 같이 현수애자련과 내장애자련은 그 구성 애자의 직경과 높이가 서로 다르므로 동일한 로봇으로 상기 두 종류의 애자련을 모두 주행 가능하도록 설계하기가 쉽지 않기 때문이다. 하지만, 이와 같이 특정 애자련을 대상으로 개발된 로봇들을 실제 송전선로에서 적용할 경우 다음과 같은 운영상의 문제점이 존재한다.

(1) 국내 송전선로의 경우 대부분의 첩탑들이 산악지역에 위치해 있어 작업 대상 첩탑에 도달하기까지 많은 시간과 노력이 소요되고, 또한 현수애자련과 내장애자련이 혼재해 있어 로봇을 실제 현장에 적용하기 위해서는 대상 첩탑까지 현수애자련용과 내장애자련용의 로봇 2대를 모두 운반해야 하는 문제점이 있다. 이는 현장 운송, 운전 및 작업 효율성 측면에서 매우 바람직하지 않다.

(2) 로봇은 고가의 첨단 장비이므로 현수애자련용과 내장애자련용 로봇을 각각 구매하는 것은 구매 비용뿐만 아니라 향후 운영 및 유지보수 측면에서도 매우 바람직하지 않다.

본 논문에서는 상기와 같은 종래 로봇의 문제점을 해결하기 위하여 동일한 로봇으로 높이와 직경이 서로 다른 현수애자련과 내장애자련에 모두 적용 가능하도록 세계 최초로 개발된 현수애자련/내장애자련 겸용 활선애자 점검로봇 시스템을 소개하고 현수애자련/내장애자련 시험설비에서 수행한 기능 시험 및 활선 성능시험을 통하여 그 효용성을 보인다.

2. 로봇 기구부 개발

2.1 개념 설계

본 절에서는 동일 로봇으로 서로 다른 규격의 애자련에 모두 적용 가능한 로봇 메커니즘의 도출 과정을 설명한다.

먼저 기구부 설계의 첫 단계로서 로봇의 애자련 주행 메커니즘을 결정하였다. 애자련을 주행하는데 특화된 이동 메커니즘으로는 Wheel Type, Cap Clamp Type, Caterpillar Type 등이 존재한다. 경제성 측면에서 로봇의 이동 속도를 고려한다면, 구름형 메커니즘인 Wheel Type과 Caterpillar Type의 이동 속도가 가장 빠르다. 하지만, Caterpillar Type은 구동 특성 상 2개 이상의 Caterpillar가 대칭적으로 존재하여야 하며 미끄러지지 않게 큰 힘으로 눌러주어야 하기 때문에, 이동 메커니즘으로는 Wheel Type이 가장 적합하다고 결론을 내렸다.

그림 4 개발된 로봇들의 구동축 간 거리
Fig. 4 Distances between driving shafts of KEPCO robots

다음으로, 애자의 높이와 직경이 서로 다른 경우에 적용될 수 있는 로봇 메커니즘을 고안하고자 하였다. 그림 3에서 볼 수 있었던 것처럼 내장애자련용 애자는 현수애자련용 애자에 비해 높이와 직경이 더 크다. 먼저 높이 측면에서 기존에 애자련 별로 개발된 한국전력공사의 로봇들을 다시 살펴보면, 그림 4와 같이 2개의 구동축을 가지고 있고 이 축간의 거리가 적용 대상 애자의 높이에 정확히 맞추어 고정되어 있기 때문에 높이가 서로 다른 애자에는 적용이 불가능하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 개발되는 로봇은 1개의 구동축을 가지되 구동 Wheel의 길이가 가변이 되어 다양한 높이에 대응할 수 있는 구조로 결정하였다.

마지막으로 직경에 대한 관점에서 그림 4를 살펴보면, 현수애자련용 로봇은 현수애자련용 애자의 직경에 맞춰서 로봇 프레임이 설계되어 있고, 2련으로 구성된 내장애자련용의 경우에는 직정보다는 2련 애자 간의 간격에 맞춰서 로봇 프레임 구조가 설계되어 있다. 여기서, 설계에 한 가지 더 고려해야 할 사항이 나오는데 현수, 내장애자련 모두 2련 애자련이 존재하기 때문에 로봇은 2련 애자련에도 적용 가능해야 한다는 것이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 로봇은 애자련 수에 관계없이 적용될 수 있도록 기본적으로 1련 애자련을 적용 대상으로 하기로 하였고, 대신 2련 내장애자련을 주행할 경우에는 로봇이 애자련에서 떨어지지 않도록 탈부착 가능한 보조 스키드바를 장착하기로 결정하였다. 이와 같이 애자련 종류에 관계없이 1련 애자련을 적용 대상으로 할 경우에는 애자 직경에 상관없이 적용 가능해야 하므로, 로봇 프레임 자체가 유연성(flexibility)을 가지는 가변 구조로 설계하기로 결정하였다.

상기한 로봇의 개념 설계 내용을 정리하면 다음과 같다.

- ① 1련과 2련 애자련에 모두 적용 가능하도록 기본적으로 1련 애자련을 대상으로 설계가 되어야 하고, 2련 내장애자련 주행 시에는 탈부착 가능한 스키드바를 장착하여 주행을 보조한다.
- ② 애자 높이에 상관없이 적용 가능하도록 구동축이 하나이어야 한다. 구동 메커니즘으로는 Wheel Type이 적합하다.
- ③ 애자 직경에 상관없이 적용 가능하도록 로봇 프레임은 가변적인 구조이어야 한다.

2.2 상세 설계

그림 5는 전술한 개념 설계를 기반으로 상세 설계된 로봇 기구부를 보여준다. 로봇 기구부는 핀휠(Pinwheel) 구동 메커니즘을 채택한 구동 모듈, 점검 모듈, 전체적인 로봇 프레임 구성하는 좌·우측 윙 모듈, 제어기 모듈, 배터리 모듈, 탈착형 보조 스킵드바 모듈로 구성된다.

그림 5 현수/내장애자련 겸용 로봇 기구부의 상세 설계
Fig. 5 Detailed design of robot mechanism

그림 6 현수애자련과 내장애자련에 적용된 모습(동시 표기)
Fig. 6 Application to suspension and tension insulator strings

그림 6은 로봇 기구부가 현수애자련과 내장애자련에 각각 적용된 모습을 하나의 그림으로 표현한 것이다. 개발된 로봇 기구부의 원형 프레임은 기본적으로 직경이 큰 내장애자련용 애자의 직경에 맞추어 설계가 되어 있으며, 직경이 작은 현수애자련에도 로봇의 설치가 가능하도록 윙 모듈의 조인트(Joint) 부분에 탄성력이 강한 용수철(Spring)이 장착되

어 있다. 현수애자련에 로봇 기구부를 설치할 경우 그림 6의 우측에서 볼 수 있듯이 로봇의 윙이 용수철의 탄성력으로 인해 애자 자기 부분을 힘 있게 눌러줌으로써 로봇이 애자련에서 떨어지지 않고 장착되어 있도록 한다. 내장애자련의 경우에는 항상 2련의 애자가 중력 방향에 수직으로 설치되어 있어서, 로봇 기구부가 내장애자련을 주행할 때에만 중력에 의해 중심을 잃고 애자련에서 떨어지는 경우가 발생하지 않도록 탈착 가능한 보조 스킵드바 모듈을 로봇 구동 모듈의 측면에 장착한다.

그림 7 로봇 기구부의 주행 모습 및 점검 위치
Fig. 7 Climbing procedure of robot mechanism

그림 7은 고안된 Pinwheel Type 로봇 기구부의 주행 과정을 보여준다. 즉, 로봇 중앙의 구동 모듈에 장착된 2쌍의 Pinwheel들을 회전시켜 애자련을 주행하면서 점검 위치에서 점검 모듈을 구동시켜 각 애자의 정밀 점검 작업을 수행한다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 로봇기구부는 핀휠들을 90도 회전시킬 때마다 애자 1개를 주행하도록 설계되어 있다.

2.3 구동 모듈

그림 8은 전술한 로봇의 구성 중 구동 모듈의 구조를 보여준다. 구동 모듈은 2쌍의 길이 조절이 가능한 핀휠들을 회전시켜 애자련 주행 기능을 수행하며, 로봇 설치 또는 철거용 고리가 구동 모듈의 상부와 중앙에 1개씩 장착되어 있다. 2쌍의 핀휠들을 구동하기 위한 2개의 DC 모터가 장착되어 있으며(구동기용 펌기어와 핀휠용 펌기어가 맞물려 구동됨), 센서로는 각 핀휠들의 기준 자세 검출을 위하여 리미트 스위치가 1개씩 장착되어 있다. 또한, 로봇 상·하부 방향에 애자가 존재하는지 여부를 감지하기 위하여 거리측정센서가 구동 모듈 상·하부에 1개씩 장착된다.

그림 8 구동 모듈의 구조

Fig. 8 Structure of actuation module

2.4 점검 모듈

그림 9는 점검 모듈의 구조를 보여준다. 점검 모듈은 RC 서보 모터에 의해 구동되는 회전축과, 회전축에 장착된 2개의 점검봉, 측정함으로 구성되어 있으며, 애자의 전기적 특성을 측정하기 위하여 RC 서보 모터에 의해 회전축을 회전시켜 애자의 캡(cap)에 점검봉을 접촉시킴으로써 점검 기능을 수행한다. 측정함에는 애자의 전기적 특성을 측정하기 위한 전자회로가 탑재되어 있다.

그림 9 점검 모듈의 구조

Fig. 9 Structure of inspection module

2.5 Double Wheel 구조

로봇 기구부를 제작하여 실제 주행시험을 수행해본 결과, 현수애자선을 주행할 경우에는 중력으로 인해 그림 7에서 볼 수 있는 것처럼 편회의 바퀴 부분과 애자 자기 부분이 항상 접촉하면서 움직이는 반면, 중력방향에 수직인 내장애자선을 주행할 경우는 그렇지 않을 수도 있다. 로봇 기구부가 내장애자선을 그림 10(a)와 같이 전원측에서 접지측으로

주행할 때에는 편회의 바퀴 부분이 애자 자기 부분과 접촉하면서 자연스럽게 이동하지만, 이와 역방향인 접지측에서 전원측으로 주행할 때에는 로봇 몸체가 위쪽 방향으로 살짝 들리면서 애자 자기 부분을 넘어가는 상황이 발생하기도 한다. 이는 그림 11(a)에서 볼 수 있듯이 Single Wheel 구조에서는 바퀴가 달리지 않은 측의 편회 길이가 바퀴가 달린 측의 편회 길이보다 짧기 때문에, 그림 10(a)의 점선 원에서 볼 수 있듯이 바퀴가 달리지 않은 측의 상대적으로 짧은 편회의 길이로 인해 자연스럽게 주행하지 못하고 모터의 구동력으로 로봇 몸체가 살짝 들리면서 애자 자기 부분을 넘어가기 때문이다. 또한, 편회가 애자 자기 부분을 넘어간 후에도 그림 10(b)와 같이 편회의 몸체 부분이 애자 자기 부분과 접촉하면서 이동하게 되어 상대적으로 큰 구동력을 요구할 수 있다.

그림 10 Single Wheel 구조를 이용한 내장애자선 주행 모습
Fig. 10 Moving along tension insulator string using single wheel structure

그림 11 바퀴 구조에 따른 Pinwheel 길이의 변화
Fig. 11 Length of pinwheel according to wheel structure

이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 그림 11(b)와 같은 Double Wheel 구조를 고안하였다. 전술한 Single Wheel 구조와 달리, Double Wheel 구조는 그림 11(b)에서 확인할 수 있듯이 양쪽 방향에 모두 Wheel이 장착되어 있고, 특히 내장애자선의 방향성을 고려하여 Single Wheel 구조에서 바퀴가 달리지 않았던 측의 편회 길이가 더 길도록 Wheel이 추가로 장착되어 부드럽게 주행하는 것을 가능하게 한다.

3. 로봇 제어 및 점검부 개발

3.1 로봇 제어 시스템

로봇의 전체 제어 시스템은 그림 12와 같이 크게 ① 로봇의 제어기 모듈 내에 장착되어 직접 로봇을 제어하는 로컬 제어 시스템, ② 사용자가 로봇을 원격으로 제어하기 위한 리모컨, ③ 로봇 원격 제어, 감시 및 점검 결과 수신을 위한

Windows XP 기반의 Tablet PC로 구성된다. Tablet PC로도 로봇 원격 제어가 가능하긴 하지만, 애자 점검의 실제 작업 현장이 철탑 위인 점을 감안하여 사용자의 작업 효율 및 편의성 향상을 위하여 리모컨을 통해서도 로봇 제어가 가능하도록 하였다. 여기서, 리모컨과 로컬 제어 시스템 간, 그리고 Tablet PC와 로컬 제어 시스템 간의 데이터 송수신은 각각 433MHz RF 통신과 블루투스 무선 통신을 통해 수행된다.

그림 12 로봇 제어 시스템(좌측부터 로컬 제어 시스템, 리모컨, Tablet PC)

Fig. 12 Robot control system

3.2 애자 점검 시스템

애자 점검 시스템은 그림 9에 보이는 로봇 점검 모듈의 측정함 내에 장착되는데, 활선 상태에서 애자에 인가되는 분담 전압(distribution voltage)과 애자의 절연 저항(insulation resistance)을 점검 모듈의 회전축에 장착된 2개의 점검봉들을 통하여 직접 측정하는 역할을 수행한다.

그림 13 애자 점검 시스템의 구조

Fig. 13 Structure of live-line insulator tester

측정 원리에 대하여 간략하게 설명하면, 활선 상태에서 송전선로의 고전압은 전원측으로부터 철탑의 접지측까지 애자련을 따라서 U자형으로 분포하게 되며, 애자련의 애자들은 각각 전압을 분담하게 된다. 활선애자 점검모듈은 측정을 위해서 먼저 고전압 발생기(high voltage converter)로 약 2000V의 직류 전압을 발생시켜 피측정 애자의 양단에 인가한다. 이 때, 각 애자의 분담전압을 유지시키면서 측정

작업을 수행하기 위하여 활선애자 점검모듈은 300MΩ의 고저항을 통하여 애자의 전압을 측정한다. 이 고저항을 통하여 교류 신호와 직류 바이어스 신호가 같이 유입되게 되는데, 절연저항 측정기는 이 중 직류 바이어스 신호를 측정하고 분담전압 측정기는 직류 바이패스 커패시터(capacitor)를 이용하여 순수 분담전압 신호인 교류신호를 추출한 후 그 크기를 측정한다. 신호 안정화부(signal conditioner)는 수신된 분담전압, 절연저항 신호를 증폭 및 필터링 하며, 수신된 신호를 이용하여 신호 취득의 트리거 신호를 생성하는 역할을 수행한다.

4. 제작 및 시험

제작된 현수/내장애자련 검용 활선애자점검로봇 시스템은 3.35Kg의 무게를 가진다. 그림 14는 현수애자련/내장애자련 모의시험설비에서 수행된 로봇 시스템의 기능 시험으로, 개발된 로봇 시스템은 현수애자련과 내장애자련에서 주행과 애자 점검 작업을 성공적으로 수행하였다.

(a) 현수애자련용

(b) 내장애자련용

그림 14 모의시험설비에서 수행된 로봇 시스템의 기능시험
Fig. 14 Functional tests of robot system in mock-up facilities

(a) 현수애자련용

(b) 내장애자련용

그림 15 로봇 시스템의 활선 성능시험

Fig. 15 Live-line performance test

최종적으로 로봇 시스템의 활선 성능시험을 수행하였다. 먼저 그림 15(a)와 같이 18개의 애자로 구성된 현수애자련 시험환경을 구축하고 345kV로 실제 가압한 활선 상태에서 로봇 시스템의 활선 성능시험을 실시하였다. 로봇은 접지측에서 전원측을 향하여 내려간 후, 다시 전원측으로부터 접지측으로 올라오면서 애자 점검을 실시하였다. 시험 결과 로봇은 애자련 상에서 전술한 주행과 점검 작업을 성공적으로 수행하였고 상기 애자련에 대하여 총 1분 30여초의 시간이 소요되었다. 마찬가지로 그림 15(b)와 같이 18개의 애자로 구성된 내장애자련 시험환경을 구축하고 성능시험을 실시하였으며, 로봇이 주어진 애자 점검 작업을 정상적으로 수행하는 것을 확인하였다. 내장애자련에 대해서도 총 1분 30여초의 시간이 소요되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 애자 점검로봇들이 현수애자련과 내장애자련 중 한 종류만을 적용 대상으로 하고 있는 것과 달리, 동일한 로봇으로 높이와 직경이 서로 다른 현수애자련과 내장애자련에 모두 적용 가능한 현수/내장애자련 겸용 활선 애자 점검로봇 시스템을 세계 최초로 개발하였다. 본 로봇 시스템은 애자 높이에 상관없이 적용 가능하도록 구동축이 하나인 Pinwheel Type 구동 메커니즘을 채택하고 있고, 애자 직경에 상관없이 적용 가능하도록 로봇 프레임 자체에 유연성이 있는 구조를 가지고 있다. 최종 제작된 로봇 시스템은 그 무게가 3.35Kg으로 NGK 애자에서 개발한 기존 시스템이 13~15Kg인 것에 비해 경량화를 이룰 수 있었다. 개발한 로봇 시스템은 기능 시험을 거쳐서 최종적으로 활선 성능시험을 통해 현수/내장애자련 모두에 대하여 주행 및 점검 작업을 성공적으로 수행함을 보였다. 본 로봇 시스템이 추후 실용화를 거쳐 상용화되면 송전선로의 안정적 운영에 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국전력공사 2007년도 주력 신규연구개발과제(한진 전략과제)의 일환으로 한국전력공사 전력연구원이 수행한 "송전선 애자 정밀 점검용 지능형 로봇 시스템 개발" 과제의 기술개발결과임을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

- [1] K. Naito, T. Irie, H. Fujita, and S. Kato, "Faulty Insulator Detector for Transmission Line," NGK Review, No. 44, pp. 11-25, 1982.
- [2] A. Masahiro, S. Kenji, O. Hideyuki, and N. Masaki(NGK Insulators, Ltd.), "Faulty Insulator Detector(不良碍子検出器)," Japanese Patent, No.2006196382(特開2006-196382), July 27, 2006.
- [3] K. Hiroyuki, K. Yasuo, and F. Junji, "Inspection Device for Strain Insulator Chain(耐張碍子連用 検査装置)," Japanese Patent, No. 11183558(特開平11-183558), July 9, 1999.
- [4] 박준영, 조병학, 이재경, 오기용, "활선 현수애자련 정밀 점검용 로봇기구," 대한민국 특허, 제10-0961841호, May 28, 2010.
- [5] Joon-Young Park, Jae-Kyung Lee, Byung-Hak Cho, and Ki-Yong Oh, "Development of Inspection Robot System for Live-line Suspension Insulator Strings in 345kV Power Transmission Lines," 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, Sep. 2009.
- [6] 조병학, 박준영, 이재경, "활선내장 애자련 주행로봇," 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-0075517, Aug. 17, 2009.

저 자 소 개

박 준 영 (朴 竣 永)

1972년 10월 29일생. 1995년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업. 1997년 KAIST 기계공학과 공학석사. 2004년 KAIST 기계공학과 공학박사. 2004년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5373
Fax : 042-865-5202
E-mail : asura@kepcoco.kr

이 재 경 (李 在 慶)

1978년 1월 21일생. 2004년 경북대학교 전자전기공학과 졸업. 2006년 KAIST 전자전산학과 공학석사. 2006년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임보조연구원
Tel : 042-865-5375
Fax : 042-865-5202
E-mail : jklee78@kepcoco.kr

오 기 용 (吳 沂 鏞)

1978년 3월 5일생. 2005년 한양대학교 기계공학부 졸업. 2006년 KAIST 기계공학과 공학석사. 2007년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원
Tel : 042-865-5376
Fax : 042-865-5202
E-mail : okyer@kepri.re.kr