

## The Influence of Forest Fire on the Characteristics of Polymer Insulator for Transmission Lines

崔仁赫<sup>†</sup> · 李東一<sup>\*</sup> · 鄭龍雲<sup>\*\*</sup> · 柳根洋<sup>\*\*\*</sup>  
 (In-Hyuk Choi · Dong-Il Lee · Yong-Woon Chung · Kun-Yang Yu)

**Abstract** - Big fire such as mountain fire may cause the prevention of the functions of the overhead cables and insulators, which may affect the operation of the transmission lines. In the worst case, this kind of disaster may have a huge effect on the whole industry of a country. However, the study on the effect of the mountain fire on the transmission line is very rare. Therefore, in order to understand the effect of the mountain fire on the polymeric insulator for transmission lines, the author observed the deformation of the sheds of the polymeric insulators and the change of the discs of the porcelain insulators under fire, varying the ignition time using the artificial ignition testing equipment which simulates the mountain fire, and investigated the electrical and mechanical characteristics of the insulators after the ignition test. For the test, the miniature insulators made of polymeric material and porcelain have been utilized. As the result, the following conclusions were obtained. First, the porcelain insulator was degraded in electrical characteristics when the insulator was subjected to the fire for approximately 5 minutes; whereas, the polymeric insulator was not degraded though there were some damage on its sheds. Second, after 20 minute exposure to the fire, the polymeric insulator lost a lot of parts of sheds, but the electrical characteristics was lowered by around 20%, but the porcelain insulators were electrically degraded by more than 80%.

**Key Words** : Forest Fire, Transmission Lines, Polymer Insulator, Artificial Fire Test

### 1. 서 론

우리나라에서 발생하는 산불의 특징을 살펴보면 크게 세 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째, 자연환경적인 요인으로 산림을 구성하는 수목 중 불에 타기 쉬운 침엽수가 42%를 차지하고 있고, 지표면에 가연성 낙엽이 많이 쌓여 있어 산불의 확산속도가 빠르다. 둘째는 지형적인 요인으로 야산의 밀집과 굴곡이 심하여 산불의 진행속도를 빠르게 하며, 세 번째인 기후 조건 역시 대륙기후의 영향으로 산불발생의 위험도가 높다[1]. 그러나 우리나라의 산불발생의 원인은 위에서 언급한 자연발생적인 요인보다는 사람들의 부주의와 과실에 의해 발생하는 경우가 대부분이다[2]. 이러한 환경적·인위적인 여건에서 산불이 발생하여 송전선로의 운영에 장애를 입힌다면, 산업전반에 걸쳐 발생하는 과급효과는 엄청날 것이다. 또한 송전선로에서 사용되고 있는 폴리머애자의 사용기간이 자기애자의 사용 기간에 비해 상대적으로 시간이 짧아 폴리머애자의 안정성에 대한 일부의 우려가 있는 것이 사실이다. 폴리머애자에 대한 연구는 많이 진행되어

하우징의 재료에 대한 연구, 절연특성의 향상에 대한 연구, 외피재 열화현상 및 금구의 분리 등에 대한 재료처방기술 및 접속기술의 향상에 대한 연구 등으로 신뢰성이 입증되고 있고, 송배전 선로에서의 수요도 점점 증가하고 있는 추세이다[3-4]. 이렇듯 많은 연구가 진행되었지만 산불과 같은 화재의 영향에 따른 폴리머애자에 관한 연구는 국내외 전반에 걸쳐 거의 없는 상태이다.

따라서 본 논문에서는 산불의 불꽃을 모의한 인공화염 실험장치를 직접 제작하여 시간의 경과에 따른 자기애자의 디스크의 변화와 폴리머애자의 하우징 변화를 관찰하고, 인공화염 실험을 마친 시료를 이용하여 전기적인 시험[상용주파 건조섬락전압시험, 충격섬락전압시험]과 기계적인 시험[규정인장파괴하중시험]을 통하여 자기애자와 폴리머애자의 특성을 비교 및 분석하여 산불이 폴리머애자에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

### 2. 실 험

#### 2.1 시료 및 실험장치

산불의 영향이 송전용 폴리머애자에 미치는 특성을 연구하기 위하여 실험에 사용된 시료는 현재 현장에서 실제로 사용되고 있는 154 kV 송전선로용으로 규정인장하중이 12,500 kg인 자기애자와 폴리머애자를 사용하였다. 자기애자

<sup>†</sup> 교신저자, 正 會 員 : 韓電 電力研究院 先任研究員

E-mail : idhyuk@kepri.re.kr

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 韓電 電力研究院 責任研究員

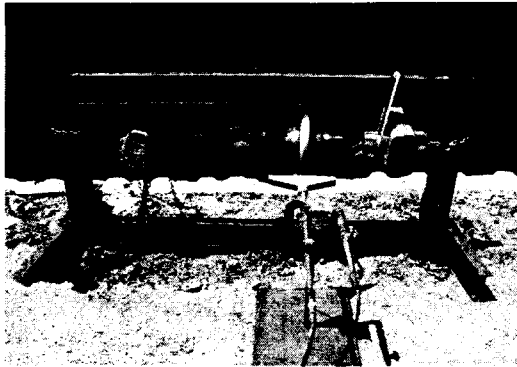
<sup>\*\*</sup> 學生會員 : (株)平一 技術研究所 研究員

<sup>\*\*\*</sup> 正 會 員 : (株)平一 技術研究所 研究所長

接受日字 : 2004年 10月 16日

最終完了 : 2004年 1月 20日

는 송전용 154 kV급 애자를 시중에서 구입하여 사용하였다. 실제 크기의 애자들을 실험장치에 편리하게 장착하고 용이한 해석을 하기위해 자기애자는 1개를 사용하였고, 폴리머애자는 연결길이를 584 mm로 축소 제작하였다. 폴리머애자의 내부 코어는 유리섬유강화플라스틱을 사용하였고, 하우징은 실리콘 재질을 사용하였다.



(a) 자기애자  
(Porcelain insulator)



(b) 폴리머애자  
(Polymer insulator)

그림 1 인공화염 실험장치  
Fig. 1 Artificial fire equipment

산불의 불꽃과 유사한 조건을 만들기 위하여 그림 1에서와 같은 실험장치를 제작하여 애자들을 장착하였다. 그림에서와 같이 고정 프레임의 양단에 일정한 힘으로 애자를 지지해주기 위하여 5 ton의 인장력을 가지는 로드셀 장치와 0~1000℃까지 온도 측정이 가능한 온도측정 장치를 장착하였다. 가열장치로는 프로판 가스와 공기를 이용한 난연 시험기를 그림에서 보는 바와 같이 설치하였다.

## 2.2 실험방법

일반적으로 산불 발생시 연기의 온도인 600℃와 화염 중심부 최대온도는 1200℃ 정도까지 올라간다[1]. 하지만, 철타의 높이와 전선이도 등을 고려하면 전선의 높이가 애자의 높이보다 낮음을 알 수 있다[5]. 따라서 송전선로에 사용되는 강심알루미늄 전선의 녹는점을 대략 650℃로 고려하여

[6], 시험에서는 애자의 가열온도를 650℃ 설정하였고, 실제 온도의 변화는 대략 600~700℃ 사이의 온도가 측정되었다. 또한 불꽃의 폭은 350 mm, 길이는 500 mm로 조정하였다. 폴리머애자의 규정인장하중(Specified Mechanical Load, SML)은 제조자가 보증하는 최대 인장하중으로서 실제 사용 환경에서 애자에 인가되는 하중보다 훨씬 큰 하중이다. 일반적으로 선로에서 애자에 인가되는 하중은 SML의 20~30%라고 알려져 있다. 본 연구에서는 인공화염 실험 중 폴리머애자 국제규격인 IEC 61109에 일상기계적하중(Ordinary Mechanical Load, OML)으로 인정된 하중을 인가하며 실험하였다[7]. 이 OML은 SML의 33%라고 규정되어 있으며, 이에 따라 SML(12.5 ton)의 33%인 4.1 ton의 하중을 인가하면서 실험하였다.

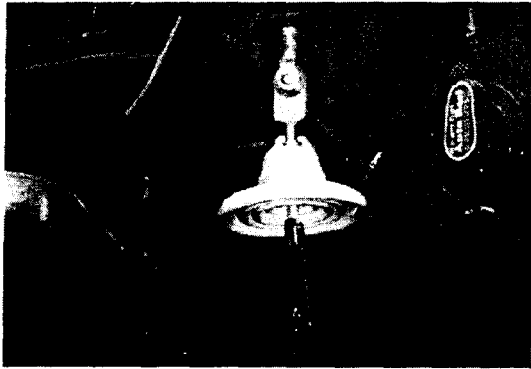
가열시간의 경과에 따라 자기애자의 디스크 변화와 폴리머애자의 하우징 변화를 관찰하였고, 실험이 진행됨에 따라 디스크와 하우징의 변화에 따른 각 단계별 시료를 채취하여 상용주파 건조섬락전압시험, 충격섬락전압의 전기적 시험과 규정인장하중시험을 통한 기계적 시험으로 자기애자와 폴리머애자의 전기적, 기계적 특성을 파악하였다. 실험은 예비실험을 거친 후 5회의 반복실험으로 거동을 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

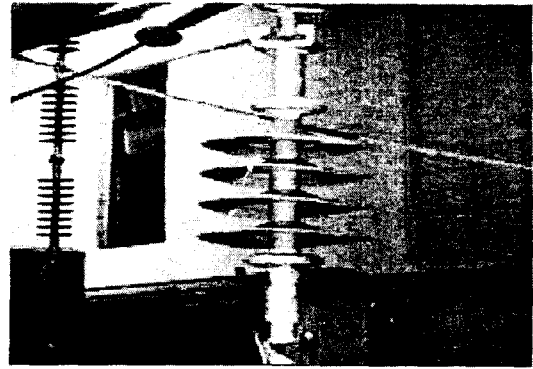
### 3.1 하우징의 변화

그림 2에 신품의 자기애자 (a)와 가열시간이 5분 경과 후의 디스크 변화가 발생한 자기애자 (b), (c)를 나타내었다. 그림 2의 (b), (c)에서 보는바와 같이 가열시간이 5분 경과 후의 디스크 변화를 보면, 디스크 부분이 정상인 (b)의 경우와 파손되는 경우 (c)의 두 가지 양상이 발생하였다. 디스크 부분이 파손되는 경우는 자기애자의 디스크 부분이 급격한 열을 받으면서 디스크 내부에 충전 되어있는 시멘트와 금구 사이의 선펡창계수의 차이로 인하여 균열이 발생하였고, 바람의 영향에 의한 온도의 변화로 열적피로가 누적되어 균열의 성장이 빨라졌을 것으로 생각된다. 디스크 형상의 변화가 있었지만 인공화염 모의실험이 진행되고 끝마칠 때까지 자기애자의 금구와 디스크가 분리되는 기계적 분리는 나타나지 않았다.

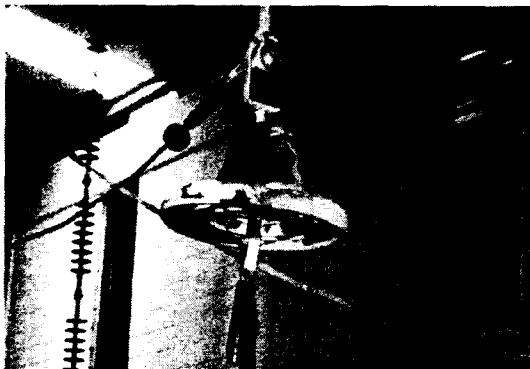
그림 3에는 가열시간의 경과에 따른 폴리머애자의 하우징 변화를 나타내었다. 폴리머애자의 경우, 5분이 지나면서 갓(shed) 부분이 유실되기 시작하였고 20분 정도 경과하면서 갓의 대부분이 손실되었으며 대략 50분 정도의 시간이 경과하면서 시스(sheath) 부분이 유실되는 것을 알 수 있었다. 폴리머재료가 열에 취약할 것이라는 우려와는 달리 불연성은 아니지만 난연성임을 알 수 있다. 자기애자의 경우와 마찬가지로 인공화염 모의실험을 끝마칠 때까지 금구와 FRP 로드의 분리나 FRP 로드가 부러지는 등의 기계적 분리는 나타나지 않았다.



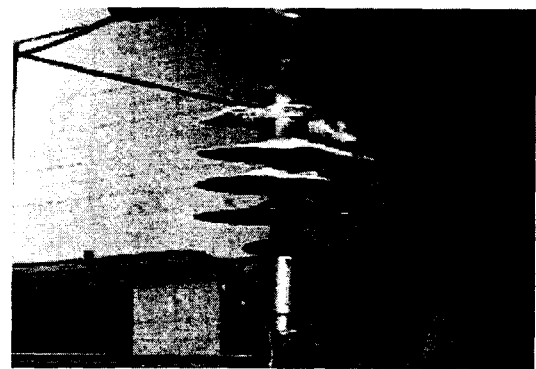
(a) 신품 (virgin)



(a) 신품 (virgin)



(b) 5분경과 [정상상태]  
(5 minutes elapsed, normal condition)



(b) 5분경과 (5 minutes elapsed)



(c) 5분경과 [파손상태]  
(5 minutes elapsed, breakage disc)



(c) 10분경과  
(10 minutes elapsed)

그림 2 자기애자 디스크의 형상변화  
Fig. 2 Disc deformation of porcelain insulator

그림 3 폴리머애자 하우스의 변화  
Fig. 3 Housing deformation of polymer insulator

### 3.2 전기적 특성의 변화

#### 3.2.1 상용주파 건조섬락전압 시험

그림 4에 상용주파 건조섬락전압의 측정값을 그래프로 나타내었다. 상용주파 건조섬락전압이란 공기 중에서 깨끗하게 건조된 시험품의 두 전극 간에 상용주파전압을 가하여 섬락이 나타날 때의 전압의 실효치를 말하는 것으로[8], 시험은 초기전압에 해당되는 평균 예상 섬락전압치의 75%까지는 전압을 빨리 상승시키고 계속하여 5초 이상 30초 이내에 섬락치에 도달하도록 전압을 상승시키는 시험이다[9]. 그 그래프에서 보는바와 같이 폴리머애자는 가열 후 상용주파 건조섬락전압의 측정값이 신품의 측정값을 기준으로 5분 가열 후에는 약 10%의 감소를, 20분 가열 후에는 약 30% 정도의 감소를 보이고 있다. 이는 화염의 영향으로 갓과 시스의 손실이 발생하여 섬락거리의 감소를 유발시켜 상용주파 건조섬락전압 측정값이 감소하였다고 생각된다. 비록, 갓과 시스의 손실로 섬락거리가 줄었지만 화염의 영향이 연결금구 부위의 절연파괴에까지는 미치지 못하였으므로, 폴리머애자의 전기적인 특성값은 유지하고 있음을 보여준다. 반면에 자기애자의 경우는 가열 후 디스크 부분이 손상을 입은 경우나 정상인 경우의 두 가지 모두 상용주파 건조섬락전압 측정값의 급격한 감소를 보이고 있다. 이는 외관이 정상으로 보일지라도 내부 크랙으로 인해 섬락거리가 붕괴되어 나타난 현상으로 생각된다.

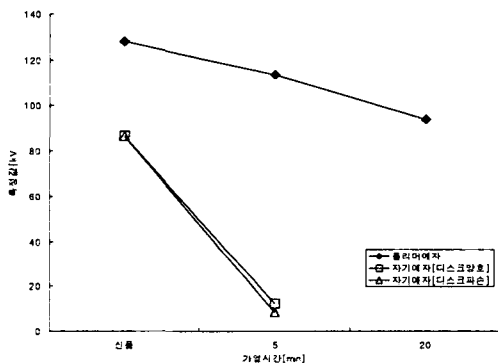


그림 4 상용주파 건조섬락전압시험 시험결과  
Fig. 4 The results of low-frequency dry flashover voltage test

#### 3.2.2 뇌충격 섬락전압시험

그림 5에 충격섬락전압시험 측정값을 나타내었다. 뇌충격 섬락전압이란 깨끗하게 건조된 시험품의 두 전극간에 일정치의 뇌충격 전압을 가하여 섬락을 나타낼 때의 전압치의 파괴치를 말하는 것으로, 뇌충격 섬락전압시험에 사용되는 표준파형은  $1.2 \times 50 \mu s$ 로 정극성과 부극성의 전파전압이 있다[8]. 폴리머애자나 자기애자 모두 상용주파 건조섬락전압 시험의 결과와 유사하게 섬락거리의 감소로 측정값이 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 충격섬락전압시험의 전기적 특성도 섬락거리의 감소로 인해 측정값이 감소되는 것을 알 수 있다.

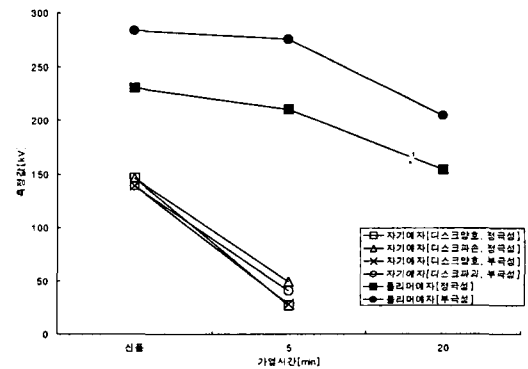


그림 5 충격섬락전압시험 시험결과  
Fig. 5 The results of impulse flashover voltage test

### 3.3 기계적 특성의 변화

인공화염 모의시험을 실시하면서 시간의 경과에 따라 시료를 준비하여 인장파괴 하중시험을 실시하였다. 파괴하중이란 시험품에 기계적 하중을 가하였을 경우 전기적 파괴에 관계없이 시험품의 어느 부분이 기계적으로 파괴될 때의 하중을 말하는 것으로[8], 실험 후 결과 값을 표 1에 나타내었다. 송전급 애자(25,000 lbs)의 경우 한전에서 규정하는 규정인장하중의 기준값은 12,500kgf로 표에서 보는 바와 같이 폴리머애자의 경우는 모두 기준값을 만족하였다. 즉, 화염의 영향으로 갓과 시스의 손실이 발생하였지만 폴리머애자의 기계적 특성에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 반면에 자기애자의 경우는 디스크가 양호한 제품은 기준값을 만족하였으나 디스크가 파손된 경우는 기준값에 약간 못미치게 나타났다.

표 1 규정인장 파괴하중 시험결과  
Table 1 Tests of specified tensile strength

	자기애자			폴리머애자		
	신품	디스크 양호 [5분]	디스크 파손 [5분]	신품	5분 가열	20분 가열
최대하중 [kgf]	14,280	12,745	12,175	12,955	12,885	12,585
판정	pass	pass	fail	pass	pass	pass

### 3. 결론

실제 산불과 같은 화재발생을 모의하여 화염의 온도를 600~700℃ 까지 변화시키면서 자기애자와 폴리머애자를 대상으로 실시한 인공모의 화염실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 화염 가열시간이 5분 정도 지났을 때, 자기애자의 경우는 디스크의 파손 또는 내부 절연과피에 의해 전기적 특성은 급격하게 감소하였고, 기계적인 특성은 다소 감소하였다.
2. 폴리머애자는 화염 가열시간이 5분 정도 경과하였을 때 갓의 일부 손실이 있었지만 전기적 특성은 약 10% 정도 감소하였고, 기계적 특성에는 거의 영향을 미치지 않았다.
3. 가열시간이 20분 정도 경과하였을 때의 폴리머애자는 갓 부분이 거의 유실되고, 시스부분이 약간 손실되었지만 전기적 특성은 약 30% 정도 저하되었으며 기계적 특성은 변화가 없었다.
4. 폴리머애자의 갓 부분과 시스부분이 자기재와 같은 불연성은 아니지만 난연성임을 확인하였다.

본 연구의 목적은 산불과 같은 화재 발생시 폴리머애자가 화염의 높은 온도의 영향에 대하여 전기적, 기계적 특성을 얼마만큼 유지하는가에 대한 관점에서 실험하였다. 실험에 적용한 가열온도나 가열시간 등의 실험조건이 실제 산불 발생시의 조건보다도 더 가혹하게 적용되었음에도 불구하고 폴리머애자의 기계적 분리나 전기적인 특성치의 변화는 거의 일어나지 않았다. 이로써 산불과 같은 화재의 영향에도 송전용 폴리머애자의 안정성에 대한 우려를 어느 정도 제거시킬 수 있었다.

향후 산불과 같은 화재를 정확하게 모의할 수 있는 실험장비를 제작하여 좀더 심도 있는 실험으로 송전용 폴리머애자의 신뢰성 향상 연구를 계속 진행할 예정이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 이시영, "대형산불 확대요인 분석", 월간임업정보, 135호, pp. 33-35, 2002.
- [2] 이시영, "산불발생 위험도 및 연소확대 요인 분석에 관한 연구" 동국대학교 대학원 박사학위논문, pp. 1-12, 1995.
- [3] 이철호, 김상욱, "전기절연재료 표면의 열화현상", 공업화학회, Vol.1, No.2, pp. 718-721, 1997.
- [4] R. S. Gorur, E. A. Cherny and R. Hackam, "Electrical Performance of Polymeric Insulating materials in Salt-fog", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 2, No. 2, pp. 486-492, 1987.
- [5] 설계기준-1211, "가공송전선 이도 설계기준", 한국전력공사, 2003.
- [6] 김기범, 김영준, 김주현 외 4인, "현대제조공학", 대응, p. 286, 2003.
- [7] IEC 61109, "Composite insulators for A.C. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V - Definitions, test methods and acceptance criteria", 1995.

- [8] ES 131, "애자시험방법", 한국전력공사, 2003.
- [9] ANSI C29.1, "Electrical Power Insulators - Test Methods", 1992.

## 저 자 소 개

### 최 인 혁(崔仁赫)



1963년 4월 13일 생. 1986년 성균관대학교 전기공학과 학사 졸업. 1989년 동 대학원 동학과 석사 졸업. 2002년 동 대학원 동학과 박사 졸업. 현재 한전 전력연구원 선임연구원.

### 이 동 일(李東一)



1958년 3월 15일 생. 1996년 한양대 전기공학 박사 취득(고전압). 1978년 한전 입사. 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 송전기술그룹장. CIGRE B2(세계 대전력망 국제회의) 한국대표(2002-현재). 전기학회 학술회원(2003-현재). 주 연구분야 초고압 송전 및 전기환경.

e-mail : dilee@kepri.re.kr

### 정 용 운(鄭龍雲)



1971년 8월 4일생. 1998년 국민대 기계기설학과군 학부 졸업. 2000년 국민대 자동차공학전문대학원 생산정보기술전공 석사 졸업. 2003년 국민대 자동차공학전문대학원 생산정보기술전공 박사 수료. 2004~현재 (주)평일 기술연구소 연구원.

### 유 근 양(柳根洋)



1955년 6월 13일 생. 1984년 숭실대 공업교육학과(전기공학) 학부 졸업. 1991~1995 제룡산업(주) 기술연구소 연구소장 역임. 2004~현재 (주)평일 기술연구소 연구소장.