

논문 20-9-8

### 송전용 폴리머 애자에 대한 산불 영향 평가

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

최인혁<sup>1,a</sup>, 이동일<sup>1</sup>, 이철호<sup>2</sup>, 강병규<sup>1</sup>, 이원교<sup>1</sup>, 박준호<sup>1</sup>

(In-Hyuk Choi<sup>1,a</sup>, Dong-Il Lee<sup>1</sup>, Chul-Ho Lee<sup>2</sup>, Byoung-Kyu Kang<sup>1</sup>, Won-Kyo Lee<sup>1</sup>, and Jun-Ho Park<sup>1</sup>)

#### Abstract

To understand the effects of forest fires on polymer insulators for transmission lines, the forest fire simulation tests were performed with polymer and porcelain insulators at Gochang testing center. These tests consisted of energizing 90 kV at line-to-ground voltage of 154 kV lines and open flame rising up to 600-630 °C as being measured at insulator surface. Mechanical and electrical characteristics such as specific mechanical load, leakage current, low frequency dry flashover voltage and impulse flashover voltage were analyzed for the polymer insulators before, during and after simulation tests compared with porcelain insulators. At the end of fire simulation tests, there was no detrimental deterioration of any insulators. All insulators passed the criteria of KEPCO specification. This study showed that forest fire simulation had no impact on polymer insulators.

**Key Words** : Polymer insulator, Forest fire, Artificial fire test, Transmission lines, Reliability

#### 1. 서 론

폴리머 애자는 절연 특성이 우수하고 무게가 가벼워 설치하기 쉽고 운반이 용이하여 송배전 가공선로에서의 사용이 점점 증가하고 있다. 특히, 우수한 발수 특성으로 섬락 사고를 방지하며 누설전류가 적어 전력 손실 감소에 크게 기여한다. 자기 애자에 비교한 여러 장점으로 세계적으로 사용이 급격히 확대되어 왔으며, 국내에서도 배전급 선로에서는 대부분 폴리머 애자를 사용하고 있으며, 송전 선로에서도 확대 사용 중에 있다. 현재 국내에는 약 720만개의 송전용 애자가 설치되어 있으며, 이중 국산 애자가 약 340만개로서 48 %를 차지하고 있고 수입 애자가 약 380만개로서 약 52 %를 차지하고 있다. 재질별로는 자기 애자가 거의 대부분(99.4 %)을 차지하며 유리 애자는 약 40,000개이고, 폴리머 애자는 1999년 외자를 도입하여 154 kV 선로에 시

용 하였고 국산품으로는 2002년부터 현재까지 2,445개가 설치되어 있다. 폴리머애자는 선로 예방을 위하여 산불발생 위험지역에는 적용되고 있지 않으며 도시, 공단, 평지, 평야 등의 산불 안전 지역과 오손 A 등급 이상 및 공단 등 염진해 지역에 설치되어 있다.

한편, 폴리머 애자는 무기물인 자기 애자에 비교하여 비교적 저온에서 분해될 가능성이 많기 때문에 산불에 의하여 발생할 피해와 신뢰성을 파악하고 검토하여야 한다. 우리나라 송전선로는 국토의 65 %에 이르는 산지에 대부분 포설되어 있으므로 폴리머 애자가 산불에 대하여 취약하거나 신뢰성이 크게 저하된다면 송전선로의 안정적 운용에 심각한 장애 요소가 될 것이며 산업 전반에 걸친 부정적 파급 효과는 엄청날 것이다[11].

이와 같은 산불 영향에 대한 우려에도 불구하고, 지금까지 국내는 물론 세계적으로도 산불의 발생이 송전급 폴리머 애자의 신뢰성에 미치는 영향을 구체적으로 연구한 문헌은 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 폴리머 애자에 154 kV 전압을 실제로 인가한 상태에서 산불을 모의한 실험으로, 산불의 발생이 폴리머 애자의 신뢰성에 미치는 영향을 고찰하였다. 이미 수십 년의 사용 실적이 있는 자기 애자와 비교 실험, 평가함으로써 그 결과의 신뢰성을 높이고자 하였다.

1. 한전 전력연구원 송전기술그룹  
(대전시 유성구 문지동 103-16)

2. 화인폴리머(주)

a. Corresponding Author : idhyuk@kepri.re.kr

접수일자 : 2007. 7. 3

1차 심사 : 2007. 8. 6

심사완료 : 2007. 8. 17

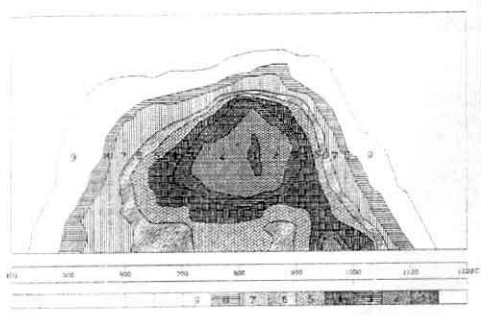


그림 1. 화염 주변부의 산불온도 분포도.  
Fig. 1. Temperature distribution of forest fire.

## 2. 산불특성과 폴리머 애자 피해사례

### 2.1 우리나라 산불의 특성

산불이란 산림 내에서 낙엽, 나뭇가지, 풀, 임목 등이 연소되는 화재로서 실화, 낙뢰, 방화 등으로 발생된 불씨가 산림 내의 가연물질을 연소시키는 것을 말한다. 우리나라에서 산불이 가장 많이 발생하는 위험한 계절은 습도가 가장 낮은 3~5월 사이로, 이 기간 중에 연간 산불 발생 건수의 78%가 발생하고 있다. 우리나라에서 발생하는 산불의 특징을 살펴보면 크게 세 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째, 자연환경적인 요인으로 산림을 구성하는 수목 가운데 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 높은 실정이다[1]. 일반적으로 산불이 발생하면 화염 주위의 온도는 그림 1과 같다. 그림에서와 같이 화염 중심부의 최고 온도는 약 1,200도까지 올라가고 경계면의 최고 온도는 약 1,100도이며 화염부 주위의 연기 온도는 520도까지 올라가는 것을 알 수 있다. 또한 불기둥의 최고 높이는 지상고 기준으로 20~30 m 정도인 것으로 알려져 있다[2,7].

### 2.2 폴리머 애자의 산불 피해 사례

폴리머 애자가 설치된 송전선로에서 실제로 산불이 발생한 사례를 조사하였다. 국내에서는 2004년 4월에 154 kV 선로(신영일 분기 구간)에 산불이 발생하였고, 이 지역에는 국산 폴리머 애자를 설치 사용 중이었다. 산불은 3일 동안 발생하였으며 154 kV 선로는 문제없이 가동되었고 화재가 지나간 후에 철탑, 전력선, 가공지선, 항공장애 표시구, 폴리머

애자에는 화재로 인한 그을음이 발생되었으나, 이후 내린 강우에 의하여 송전급 폴리머 애자는 깨끗하게 자연 세척이 되어 복구되었다. 본 사례에서는 산불의 발생으로 폴리머 애자의 성능에 전혀 영향을 미치지 않았으며, 산불로 인한 애자에 부착된 그을음은 강우에 의해 쉽게 세척되었음을 확인하였다[8].

외국에서도 폴리머 애자의 산불 피해 사례는 보고된 것이 거의 없었다. 다만, 남아공의 대표적 전력회사인 ESCOM의 송전선로 중 사탕수수 밭에서 발생한 화재가 있었다. 1995년 해안가 400 kV 송전선로의 사탕수수 지역에서 열과 불꽃을 동반한 화재가 발생하였는데, 철탑의 높이는 18~24 m 정도였고 적외선 카메라로 측정된 불꽃의 온도는 1,000 °C 이상이었으며 전선/애자 부착 지점에서의 온도는 240-250 °C이었다. 화재로 인한 실리콘 폴리머 애자의 손상은 없었다. ESCOM은 이 사고 후 실험실에서 다음과 같이 모의하여 확인 시험을 하였다. 가스버너로 1,000 °C 이상의 불꽃을 만들어 실리콘 애자 주위에 15초에 1회전하였고 이것을 2분 동안 진행한 후 육안 관찰 결과, 재료의 열화는 없었다고 보고하였다. 또한 250 °C의 온도에서 3분 30초 동안 유지하였을 때 재료에 어떤 열화도 없었다고 보고하였다[3,6].

## 3. 실험

### 3.1 실험장치 및 시료

실제 산불과 유사한 조건으로 시험하기 위하여 고창 전력시험센터의 154 kV 시험 선로에 전압을 인가하면서 목재를 이용하여 산불모의시험을 시행하였다.

애자 표면의 누설전류와 온도를 측정하기 위하여 신호변환기, 자료수집 저장장치, 써지 보호 장치 등으로 구성된 누설전류 및 온도 측정 장치를 개발하여 사용하였다(그림 2).

한전의 송전선로 설계 기준에 따르면[4], 철탑 기초 작업 범위 내의 수목은 베어내며 전압별 지상고 기준치에 나무 종류별로 수령 35년을 기준으로 한 수고를 가산하여 애자 높이를 결정한다. 따라서 실제 산불이 발생할 경우, 철탑에 위치해 있는 애자는 화염 중심부에 있지 않고 화염부 주위의 연기 최고 온도인 520 °C의 영향을 받는다. 본 연구에서는 여기에 20%의 가혹한 조건의 여유도를 주어, 애자 표면 온도가 600~630 °C가 되도록 불꽃 최고 온도를 조정하였다. 화원으로 사용하는 목재의 양 및 설치 높이를 조정하는 여러 차례의 반복 시험을 통하여 원하는 온도 조건을 갖는 불꽃으로 조절할 수 있었다.

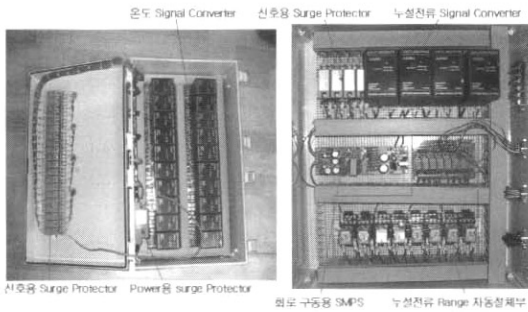


그림 2. 온도 및 누설전류 측정 시스템.  
 Fig. 2. Measurement system for temperature and leakage current.

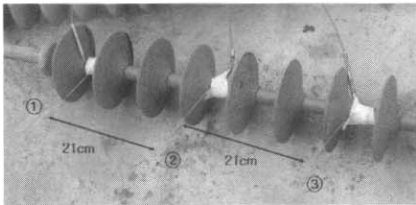


그림 3. 온도 센서 취부와 시험 장면(무가압).  
 Fig. 3. Installation of thermocouple and simulation test(un-energized).

전압이 인가된 상태에서의 애자의 상태와 누설 전류를 측정하는 것을 최종 목표로 하였는데, 가압 실험 시에는 섬락 발생으로 온도 센서를 전선 측에 설치할 수 없으므로 전압을 인가하지 않은 상태에서 전선 측에 온도 센서를 설치하고 정확한

표 1. 폴리머애자 시험시료의 특성치.

Table 1. Characteristics of polymer insulator for forest fire simulation.

구 분	SR25N Type	
1. 구조 및 치수		
연결길이 (mm)	1,611	
건조섬락길이 (mm)	1,394	
누설거리 (mm)	3,094	
2. 전기적 특성		
건조섬락전압 (kV)	530	
주수섬락전압 (kV)	490	
충격섬락전압 (kV)	정극성	877
	부극성	957
3. 기계적 특성		
규정인장하중 (SML, lbf)	25,000	
인장내하중 (RTL, lbf)	12,500	
비틀림 내하중 (N·m)	50	

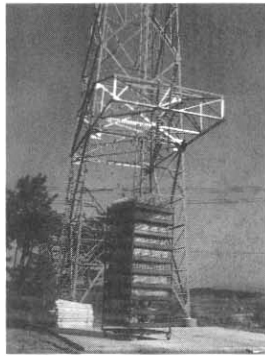
온도 조건을 구현하고자 하였다. 그림 3에 무가압 상태에서의 온도 센서 취부 및 시험 장면을 나타내었다. 가압 시험은 실제 시험 선로에서 내장 및 현수 애자에 상전압 90 kV를 인가한 상태에서 온도와 누설전류를 실시간으로 측정하였다. 시험선로의 전선 쪽 가까이 온도센서를 설치할 경우 섬락이 발생하여 전압을 인가 할 수 없으므로, 온도센서를 접지(암) 측에 설치하였다.

본 연구에 사용된 자기 애자와 폴리머 애자, 두 제품 모두 한진이 송전선로에 사용하고 있는 국산 제품이다[9].

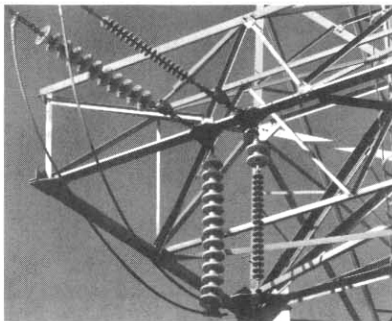
### 3.2 산불 모의시험 준비

산불 모의시험은 송전 시험선로에 상전압 90 kV를 인가하여 모의산불의 화염 온도를 측정하고 그때의 누설전류 특성이 어떤 특성 변화가 있는지 분석하기 위한 시험이다.

그림 4는 모의산불 시험을 위한 고장 산불시험장 전경이다. 그림 (a)에서 암의 최저 높이는 10 m, 폴리머애자의 길이가 약 2 m이며, 구조물은 가로, 세로 2 m × 2 m로 높이는 5 m이다. 따라서 목재와 애자와는 3 m의 이격거리가 있다. 또한, 그림 (b)에서 온도 센서는 송전선에 가까이 설치하면 90 kV의 전압 때문에 섬락이 발생하므로 접지 측(철탑 암)부분에 설치하였다. 그리고 누설전류를 측정할 수 있는 리드선은 온도센서 바로 전(전원 측) 폴리머애자의 로드부와 자기애자의 캡 부분에 설치하였다.



(a) 모의시험 전 준비  
(a) Before simulation test



(b) 애자의 취부  
(b) Insulator attachment

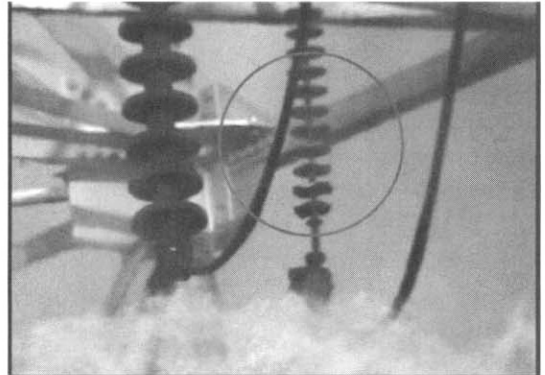
그림 4. 고창 산불모의 시험장 전경.  
Fig. 4. Gochang test center for forest fire simulation.

#### 4. 결과 및 고찰

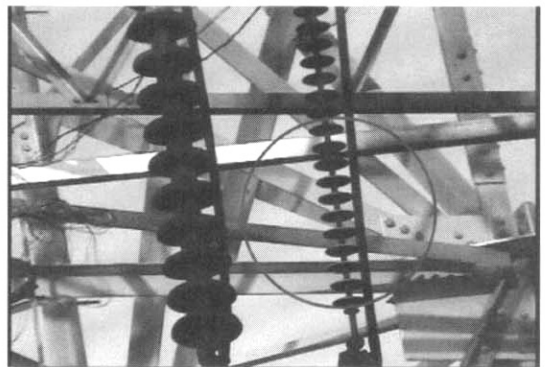
그림 5는 시험선로에 상전압 90 kV 인가한 상태에서 목재를 이용하여 실제 산불과 최대한 유사한 모의시험 장면을 시간 경과에 따라 나타낸 것이다. 먼저 (a)는 시험 초기에 강한 불기둥이 발생하는 장면이고, 그림 (b)는 고온, 가압 상태에서 폴리머애자의 변형을 확인 할 수 있는 장면이다. 불꽃에 가까운 실리콘 애자 갯 부분이 심하게 찌그러짐을 확인하였으며, 반면에 무기물로 이루어진 자기 애자는 육안으로 큰 변화는 없었다. 그리고 그림 (c)에서는 시험이 끝난 후 폴리머애자의 갯 부분이 상당 부분 복원되었음을 확인 가능하다. 실리콘 애자는 난연성을 가진 고무 재료로서, 특유의 유연성으로 600 °C 이상의 고온에서 갯의 변형은 있었지만, 화염이 지난 후에 원형에 가깝게 복원되는 특성이 있는 것을 확인하였다[10].



(a) 시험 초반 상태  
(a) Early state of simulation test

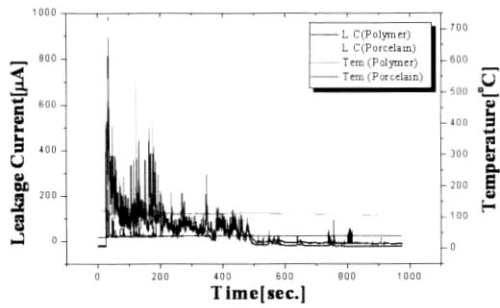


(b) 시험 중반 상태  
(b) Middle state of simulation test

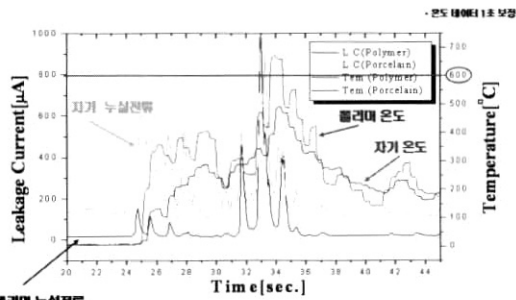


(c) 시험 종료 상태  
(c) After simulation test

그림 5. 산불모의 시험.  
Fig. 5. Forest fire simulation test.



(a) 시험 전체 온도 및 누설전류  
(a) Leakage current and temperature



(b) 최악의 상태에서 온도 및 누설전류  
(b) Temperature and leakage current at worst states

그림 6. 모의시험의 온도 및 누설전류.

Fig. 6. Temperature and leakage current records during simulation test.

그림 6은 90 kV 가압시험의 온도 및 누설전류 특성을 나타낸 그래프로 초당 20개씩의 데이터를 취득하였다. (a)는 시험 전체의 온도와 누설전류를 나타낸 그래프이고, (b)는 최고온도가 측정된 20초에서 40초까지의 부분을 확대한 것이다. 집지 측에 위치한 온도 센서로 얻어진 온도는 시험 초기에 순간적으로 폴리머애자가 약 800 °C 이상이었으며, 자기애자도 약 600 °C 이상이었다. 목재를 이용하여 발생한 불꽃은 약 200초 이후에 사그라졌고, 시험 시료는 약 500초 이후에 상온 상태로 되돌아왔다. 약 200초까지는 300~400 °C 정도의 온도가 유지되었고, 약 200초 이후에는 100 °C 근처의 온도 구배를 나타내었다. 이 온도는 집지 측에서 측정된 온도이므로 화염과 가까운 전선 측 애자 표면 온도는 더 높은 분포를 갖고 있으며, 화염 발생 후 40초 정도까지 약 600 °C 부근의 온도가 구현된 것으로 판단된다. 화염 접근 전에 측정된 폴리머애자 및 자기애자 누설전류는 각각 20 µA, 140 µA 정도로

표 2. 모의시험 전, 후 전기적, 기계적 시험결과.  
Table 2. Electrical and mechanical properties before and after simulation tests.

구분	폴리머애자 (SR25N)			자기애자 (25,000lbs)			
	정격	산불 전	산불 후	정격	산불 전	산불 후	
뇌충격 건조섬락 전압 [kV]	정	830	863	880.6	125	387.8	127.9
	부	830	942	963	130	492.2	121.3
상용주파건조섬락 [kV]	450	554	525	80	245.5	86.8	
인장파괴 하중 [ton]	12	16	12.8	-	17.75	15.7	
판정		양호	양호		양호	양호	

낮았다. 그러나 폴리머애자의 최고온도 660 °C와 자기애자의 최고온도 490 °C일 때 누설전류는 모두 약 1 mA까지 상승하였다. 그리고 폴리머애자의 경우 400 °C 이상 온도에서 누설전류가 급격하게 증가하였지만, 400 °C 이하의 온도에서는 누설전류에 큰 영향을 주지 않았다. 결과적으로, 고온에서 폴리머애자의 누설전류가 증가한 이유는 첫 번째로, 고온에서 저항이 급격하게 감소하는 절연재료의 특성과, 두 번째로, 고온의 온도가 폴리머애자의 갯을 변형시켜 누설거리가 감소하여 누설전류가 급격히 증가한 것으로 판단된다. 그러나 고온의 화염이 지난 후에 누설전류는 다시 모의 시험전의 누설전류와 같은 값을 가지는 것을 확인 할 수 있었고, 이 사실로 폴리머 애자의 갯이 완전히 복원되었음을 확인할 수 있다.

표 2는 고창 전력시험센터의 시험선로에서 실시한 가압 산불모의 시험 후, 모의 시험하지 않은 시료와 비교한 값을 정리한 것이다. 가압 시험한 폴리머애자에 대하여 중요한 전기적 특성인 뇌충격섬락시험과 상용주파건조섬락시험 및 인장파괴하중시험을 실시하였다. 애자의 건조섬락거리에 깊이 관련된 특성인 뇌충격건조섬락전압 및 상용주파건조섬락전압 값은 산불 모의를 하지 않은 건전 시료와 비교한 결과 모두 커다란 변화 없이 비교적 유사한 값을 나타내었다. 이러한 전기적 특성 결과는 폴리머 애자의 절연물인 실리콘 하우징에 균열 등의 어떠한 이상도 발생하지 않았으며 또한 건조섬락거리도 변화가 없으므로 불꽃에 의한 영구적 찌그러짐이나 변형이 발생하지 않았음을 입증하는

것이다. 자기 애자도 산불 전, 후 모두 비슷한 특성 값을 나타내어 산불 모의에 영향이 적음을 나타내었다. 폴리머 애자와 자기 애자등 모든 시료는 한전이 규정하고 있는 정격 기준 이상의 양호한 특성을 나타내었다. 다만, 폴리머 애자의 산불 모의 후 시료의 인장파괴하중 값은 모의전 시료 값보다 20 % 정도 감소하는 모습을 보였는데, 이는 불꽃의 고온으로 FRP 로드를 압착한 금구가 약간 팽창함으로 압착력이 감소한 것으로 판단된다. 그러나 한전이 정한 신품 기준치 이상을 나타냄으로 신뢰성에는 큰 영향이 없다고 판단되었다.

### 5. 결 론

우리나라에 발생하는 산불의 특성에 대한 폴리머애자의 신뢰성을 연구하기 위하여, 산불 조건을 모의하는 시험을 실시하였다. 전압을 인가하면서 산불 모의시험을 시행하여 온도 및 누설전류를 측정, 분석하였으며, 산불 모의 후 전기적 및 기계적 특성 평가를 통하여 산불에 대한 신뢰성을 평가하였다.

(1) 실제 송전 선로에서 산불 시험을 수행한 결과, 폴리머애자와 자기 애자 모두 성능에 큰 영향을 미치지 않았다. 산불 조사와 모의시험 결과를 종합하면, 실제 산불은 600 ℃ 주변(부근)의 불꽃 온도에서 1분 이내로 애자를 스치고 지나갈 것으로 판단되며, 이러한 조건에서는 폴리머애자의 성능에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다.

(2) 산불모의 시험 후 자기애자 및 폴리머애자는 뇌충격섬락시험, 상용주과전조섬락시험, 인장파괴하중시험 모두 기준치 이상으로 양호 판정을 받았다.

(3) 산불모의 시험을 통해 온도 및 누설전류 특성을 분석한 결과 화염의 접근 전에는 폴리머애자, 자기애자는 각각 20~30  $\mu$ A, 140  $\mu$ A 정도로 낮았으나, 600 ℃이상의 화염에 노출된 시점에서는 폴리머애자와 자기애자 모두 약 1 mA까지 상승하였다.

(4) 사용 초기인 폴리머애자의 산불에 대한 특성을 이미 수십 년 간의 사용 실적이 있는 자기애자와 비교하면, 자기애자가 보다 높은 특성을 가지고 있으나 154 kV 송전선로 사용 시는 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

- [1] 이시영, “대형 산불 확대요인 분석”, 월간임업정보, 135호, p. 33, 2002.
- [2] 김해근, “산불의 종류와 소화방법”, 산림조합중앙회, 82호, p. 38, 1972.
- [3] P. Naidoo, ESCOM report, unpublished, 1995.
- [4] 한전 설계기준, “송전분야”, 2003.
- [5] 오정수, 이명보, 김명수, 이시영, “외국의 산불 예방과 진화”, 임업연구원, 2002.
- [6] T. Nakura, “Experience of arrester application to over-head transmission lines”, Proc. of International Symposium on modern Insulator Technologies, Florida, 1997.
- [7] 이시영, “산불발생 위험도 및 연소확대 요인 분석에 관한 연구”, 동국대학교대학원 박사학위논문, 1995.
- [8] S. Y. Lee, “Forest fire characteristics in Kosung”, Proc. of IUFRO Inter-Divisional Seoul Conf., p. 45, 1998.
- [9] C. H. Lee and S. U. Kim, “Flaming phenomenon on the surface of electric insulation materials”, Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry Journal, Vol. 1, No. 2, p. 718, 1997.
- [10] 최인혁, 최장현, 박준호, 이동일, 김태영, “154 kV 송전용 폴리머 애자의 산불에 대한 누설전류 및 온도 특성”, 한국전기전자재료학회 2006하계학술대회논문집, 2006.
- [11] 한전전력연구원 기술보고서 “송전용 폴리머 애자의 산불영향 신뢰성 평가 보고서”, 2005.