

송전용 실리콘 폴리머에자의 산불영향 신뢰성 평가(I)

Reliability Assessment of Forest Fire on Silicone Polymer Insulators in Transmission Lines(I)

최인혁^{1,a}, 이동일¹, 정용운², 유근양²

(In-Hyuk Choi^{1,a}, Dong-Il Lee¹, Yong-Woon Chung², and Kun-Yang Yu²)

Abstract

Most overhead transmission lines in Korea run over the mountain; however, only little study has been made for the effect of mountain fire on polymeric insulator for transmission lines, though the study is significantly required. Therefore, in this study, the authors observed the deformation of the sheds of the insulator under fire, varying the ignition time using artificial ignition testing equipment, and investigated electrical and mechanical characteristics of the insulator through dry withstand voltage test, impulse flashover test and tensile load test. As the results of the tests, the following conclusions were obtained. First, when the insulator was subjected to the fire, the electrical characteristics were slightly reduced, but there was no change on the mechanical characteristics. Secondly, the sheds and sheath of the insulator were not non-flammable but less-flammable. These two results show the high mechanical stability and durability of the insulator under severe fire condition, though the electrical characteristics can be deteriorated as the time that the insulator is subjected to fire, goes by.

Key Words : Forest fire, Silicone polymer insulator, Transmission lines

1. 서론

우리나라의 지세는 전 국토의 65 %에 이르는 산지와 이중 97 %가 임목지로 형성되어 있다. 또한 지형의 대부분에는 낙엽 등의 가연물질이 많이 쌓여있고, 급경사와 험준한 산악형 산림으로 이루어져 있다. 이러한 지세와 계절적인 기후의 영향으로 산불발생이 일어나기 쉽고, 연소 진행속도 역시 대단히 빨라 급속한 산불의 확산과 대형화재의 위협성을 안고 있다. 최근 우리나라의 산불발생의 추이를 살펴보면 최근 5년(1996~2000)간에 472 건의

산불발생으로 약 7000 ha의 피해면적에 160여 억의 피해액이 발생했으며 산불발생 건당 평균 피해면적은 14.7 ha에 이르고 있다[1,2].

우리나라 송전선로의 위치는 대부분 산악지형에 포설되어 있어, 산불과 같은 화재가 발생하여 전선이나 에자 등의 부착물이 자신의 역할을 상실하게 되면 송전선로가 운영되지 못하여 발생하는 여파는 산업전반에 걸쳐 엄청난 파급효과를 미칠 것이다. 더욱이 자기제 에자에 비해 폴리머에자의 경우가공선로에 도입되어 사용되어진 기간이 짧아 산불과 같은 화재 시에 폴리머에자의 안정성에 대한 일부의 우려가 있는 것이 사실이다.

송전용 폴리머에자는 잘 알려져 있는 바와 같이 1960년대에 개발 및 생산을 시작으로 꾸준한 하우징 재료의 연구를 통하여 트래킹, 내후성 등의 특성이 많이 향상되었다. 폴리머에자의 장점을 열거하자면 제품이 경량이어서 운반 및 설치가 용이하고, 우수한 발수 특성으로 섬락현상을 감소시켜 줌

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

2. (주)평일 기술연구소

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

접수일자 : 2004. 9. 3

1차 심사 : 2004. 9. 30

심사완료 : 2004. 10. 11

으로써 뛰어난 내오손 특성을 가지고 있다. 또한 이밖에도 높은 기계적 강도, 대량생산 및 긴급제조 가능 등의 우수한 특성을 많이 가지고 있어 송·배전 가공선로에서의 사용이 점점 증가하고 있는 추세이고, 이에 따른 연구도 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 특히 배전급에는 약 300만개 이상의 폴리머애자가 선로에 설치되어 사용되고 있으며, 현재까지 고장 없는 우수한 특성을 나타내고 있다. 이와 같이 폴리머애자의 사용량 증가 및 폴리머애자의 전반에 걸친 연구가 많이 진행되었음에도 불구하고, 산불영향에 대한 폴리머애자의 신뢰성에 대한 연구는 지금까지 국내외에 걸쳐 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 사용되고 있는 송전용 폴리머애자를 축소 제작하여 산불의 화염을 모의한 실험장치에 장착한 후, 가열시간의 경과에 따른 하우징의 변화를 관찰하고 상용주파 건조시험, 뇌충격 심락전압시험 및 규정인장파괴하중시험을 통하여 폴리머애자의 전기적·기계적 특성을 고찰하여 산불영향이 송전용 폴리머애자에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 시료

송전용 폴리머애자에 대한 산불영향 실험에 사용되어진 실험장치는 폴리머애자가 실제 선로에 설치되어진 상태와 유사한 조건을 갖도록 설계하였다. 따라서 폴리머애자를 일정한 힘으로 지지하여 주면서 온도측정과 하우징 변화의 관찰이 용이하여야 함으로 지면에 견고하게 프레임 설치하고 양단에 5 ton까지의 인장력을 가지는 로드셀 장치를 설치하였으며, 0~1000 °C의 측정범위를 갖는 온도측정 장치를 설치하였다. 이를 그림 1에 나타내었다.

실험에 사용된 시료는 실제 송전선로에 사용 중인 154 kV급의 폴리머애자를 실험실비를 고려하여 연결 길이를 580 mm로 축소제작 하였다. 시료는 길이가 짧은 것을 제외하면 현재 가공선로에서 운용되고 있는 동일한 디자인으로 제작되었다. 또한 실제 선로에서 운용중인 규정인장하중이 25,000 lbs 용과 36,000 lbs 용의 두 가지 규격을 제작하였다. 제작된 폴리머애자의 내부 코어는 유리섬유강화플라스틱(Fiber Reinforcement Plastics, FRP)을 사용하였고, 하우징은 실리콘(silicone) 재질을 사용하였다. 이를 그림 2에 나타내었다.

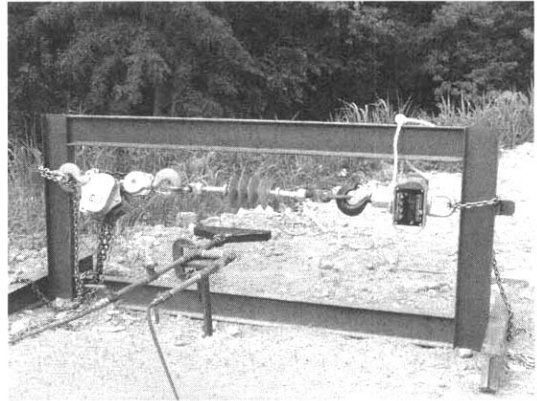
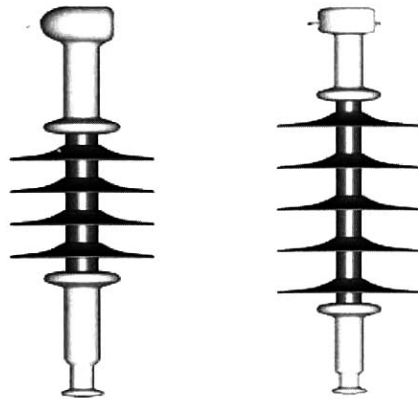


그림 1. 인공화염 실험장치.

Fig. 1. Artificial fire equipment.



(a) 25,000 lbs

(b) 36,000 lbs

그림 2. 실험용 폴리머애자.

Fig. 2. Polymer insulator for experiment.

2.2 실험조건

산불이 발생하면 연소지역 중심부의 화염온도가 최고 1000 °C까지 올라가고 연기의 높은 온도로 인해 치명적인 피해를 입을 수 있다[3]. 그러나 송전선로의 전선이도를 고려하면 애자의 높이보다 전선의 높이가 낮음을 알 수 있다[4]. 따라서 송전선로에 사용되는 강심알루미늄 전선의 녹는점을 대략 650 °C라고 고려하[5], 폴리머애자를 약 650 °C 정도로 가열하면서 시간의 경과에 따라 하우징의 변화를 관찰하였다. 이때, 버너를 이용한 불꽃의 온도는 약 600~700 °C 사이이며 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 61109[6]에 일상기계적하중(Ordinary Mechanical Load, OML)으로 인정된 하중을 인가하며 실험하였다. 이 OML은 SML의 33 %라고 규정되어 있으며, 이에 따라 SML(12.5 ton/16.4 ton)의 33 %인 4.1 ton과 5.4 ton의 하중을 인가하면서 실험하였다. 하우징 변화에 따른 각 단계별 시료를 채취하여 상용주파 건조섬락전압, 뇌충격 섬락전압 및 규정인장하중(SML) 시험을 통하여 폴리머애자의 인공화염 모의실험 전·후의 전기적, 기계적 특성을 고찰하였다. 실험조건 및 실험에 사용된 장치를 표 1에 나타내었으며, 실험에 사용된 실리콘 재료의 특성치를 표 2에 나타내었다.

표 1. 실험조건 및 실험장치.

Table 1. Experimental condition and equipment.

폴리머애자	25,000 / 36,000 lbs [축소제작]
하중 [ton]	4.1 / 5.4 (SML의 33 %)
온도 [℃]	650
시간 [min]	5~50
건조섬락시험장치	Hipotronics AC H.V tester[max 350 kV]
충격섬락시험장치	Hipotronics [RCC 100D]
규정인장하중시험장치	수직인장시험기(max 50 ton)

표 2. 실험에 사용된 실리콘 재료의 특성치.

Table 2. The characteristics of the silicone material tested.

인장강도	42 [kg/cm ²]
신장율	420 [%]
경도	62 [shore A]
비중	1.54
가연성	V-0 [IEC 60707]

3. 결과 및 고찰

3.1 하우징의 변화

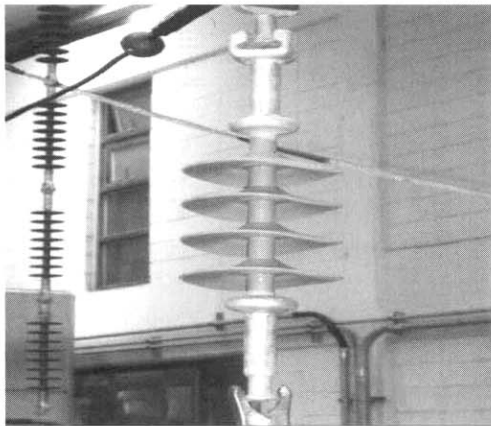
그림 3은 시간의 경과에 따른 폴리머 애자 하우징의 외관변화를 나타낸 그림이다. 그림(b)에서 보는바와 같이 실험시간이 5분을 경과하면서 하우징의 온도가 상승되기 시작하여 갓(shed)의 일부분이 연소되었다. 가열시간이 20분을 지나면서는 갓이 연소되었고 시스(sheath) 부분의 연소가 시작되었다. 30분을 지나면서는 새로운 진행은 발견되지 않았으며, 가열시간이 40분을 지나면서 시스 부위가 소실되었다. 가열시간이 50분을 경과하면서 갓과 시스 부분이 소실되었지만 가열시간이 50분 이상 경과하여도 폴리머 애자의 기계적인 분리는 나타나지 않았다.

하우징의 재료인 실리콘은 무기폴리머로서 난연성을 갖고 있는 재료이다. 일반적으로 사용되는 폴리머애자용 실리콘은 내트래킹성 특성의 향상을 위하여 수산화알루미늄이 다량 첨가되어있다. 수산화알루미늄은 원래 플라스틱의 난연성 첨가제로 개발된 무기필러로서 우수한 난연성을 나타내며 폴리머애자용 실리콘 컴파운드의 약 60 % 이상을 차지하고 있다. 또한 한국전력공사의 구매규격을 비롯한 폴리머애자의 규격에서는 하우징 재료로서 일정한 수준의 난연성을 요구하고 있으며, 이에 대한 기준은 시료에 불꽃을 대었다 떼었을 때 불꽃이 계속 전파되지 않고 꺼져야 할 것을 요구하고 있다[7]. 그러므로 폴리머애자용 실리콘 컴파운드는 일정 수준 이상의 난연성을 확보하고 있는 재료이다. 이러한 난연성으로 인하여 600 ℃ 이상의 높은 온도에서도 금방 연소되어 소실되지 않고 상당시간 견딜 수 있었던 것으로 판단된다.

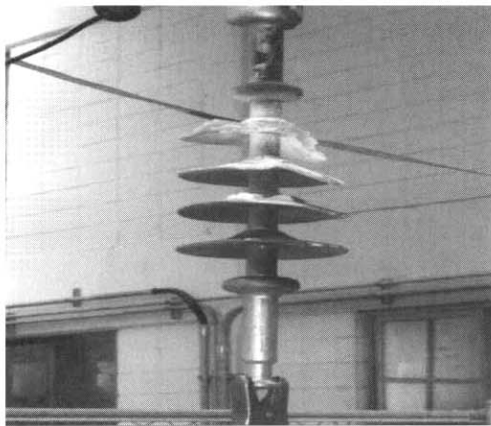
3.2 전기적 특성의 변화

3.2.1 상용주파 건조섬락전압시험

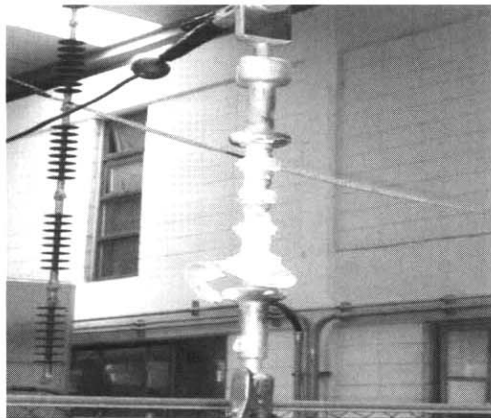
상용주파 건조섬락전압이란 공기 중에서 깨끗하게 건조된 시험품의 두 전극 간에 상용주파전압을 가하여 섬락이 나타날 때의 전압의 실효치를 말하는 것으로[8], 시험은 초기전압에 해당되는 평균 예상 섬락전압치의 75 % 까지는 전압을 빨리 상승시키고 계속하여 5초 이상 30초 이내에 섬락치에 도달하도록 전압을 상승시키는 시험이다[9]. 시간의 경과에 따른 폴리머 애자의 상용주파 건조섬락전압시험의 결과치를 표 3에 나타내었다.



(a) 신품



(b) 5분 경과



(c) 20분 경과

그림 3. 폴리머에자 하우징의 변화.

Fig. 3. Variation of polymer insulator housing.

표 3. 상용주파 건조섬락전압시험 결과치. (단위: kV)

Table 3. The results of low-frequency dry flashover voltage test. (unit: kV)

구 분		25,000 lbs		36,000 lbs	
테스트 횟수	신품	5분 경과	20분 경과	5분 경과	20분 경과
1	129	118	88	111	87
2	129	117	87	112	85
3	126	115	95	109	93
4	129	117	95	110	90
5	126	114	103	111	95
평균	128	116	94	111	90

표에서 보는바와 같이 25,000 lbs 및 36,000 lbs의 폴리머에자에 대해 모의화염 실험시간이 5분 경과 후와 20분 경과 후의 시료를 가지고 각각 5번의 테스트를 시행하여 모의화염 시험전의 제품의 측정치와 비교하였으며 이들 값에 대한 평균치를 나타내었다. 모의화염 시험전의 제품과 시험후의 제품을 비교하여 보았을 때 5분 경과후의 제품은 대략 정상일 때보다 10 % 감소하는 것을 알 수 있고, 20분경과 후에는 30 % 감소함을 알 수 있다. 상용주파 건조섬락전압은 주로 에자의 건조섬락거리에 의존하는 값으로서, 5분 정도의 화염에 노출된 시료는 약간의 하우징 손실로 상용주파 건조섬락전압이 약 10 % 정도 감소되었으며 화염에 20분 정도 노출된 하우징의 갓 부분이 연소된 시료는 소실된 갓 부분만큼의 섬락거리 감소로 약 30 % 가까이 상용주파 건조섬락전압이 감소하였다. 이 결과는 화염으로 하우징이 연소된 만큼의 섬락거리 감소로 상용주파 건조섬락전압이 감소하였고 다른 영향은 받지 않는다는 것을 나타낸다. 즉, 금구 압착 연결부분이 연소 등으로 인한 절연 파괴 등의 화재의 영향을 받지 않았다고 생각되며 이는 화재에도 불구하고 기본적인 전기적 특성은 그 값을 유지하고 있음을 보여주고 있다.

3.2.2 뇌충격 섬락전압시험

뇌충격 섬락전압이란 깨끗하게 건조된 시험품의

두 전극간에 일정치의 뇌충격 전압을 가하여 섬락을 나타낼 때의 전압치의 파고치를 말하는 것으로, 뇌충격 섬락전압시험에 사용되는 표준파형은 1.2×50 μs로 정극성과 부극성의 전파전압이 있다 [8]. 건조섬락시험과 마찬가지로 시간의 경과에 따른 폴리머 애자의 뇌충격 섬락전압시험의 결과치를 표 4에 나타내었다.

표 4. 충격섬락전압시험 결과치. (단위: kV)
Table 4. The results of impulse flashover voltage test. (unit: kV)

구 분		25,000 lbs		36,000 lbs	
종류	신품	5분 경과	20분 경과	5분 경과	20분 경과
정극성	230	207	154	213	162
부극성	284	265	204	286	270

가열시간의 경과에 따른 것, 시스의 손실이 전기적인 특성에는 커다란 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 상용주파 건조섬락전압 변화와 유사한 결과를 보임으로서 전기적 특성은 단순히 하우징의 연소로 인한 건조섬락거리의 감소만큼만 감소됨을 확인하였다.

3.3 기계적 특성의 변화

파괴하중이란 시험품에 기계적 하중을 가하였을 경우 전기적 파괴에 관계없이 시험품의 어느 부분이 기계적으로 파괴될 때의 하중을 말하는 것으로 [8], 인공화염 모의시험을 마친 폴리머 애자에 대해 수직인장 시험기를 이용하여 규정인장하중시험을 실시하였다. 그 결과를 표 5에 나타내었다. 규정인장하중의 기준치는 25,000 lbs용이 12,500 kgf 이고, 36,000 lbs용이 16,500 kgf로 시험결과 모든 폴리머 애자가 시험을 통과하였으며 인공화염 모의시험 중 육안으로 관찰하였을 때 역시 기계적 분리는 나타나지 않았다. 이는 외관상으로 잣과 시스의 손실이 FRP 로드의 기계적 특성에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

폴리머애자에는 요구되는 인장특성을 얻기 위하여 유리섬유로 보강된 고강도 FRP를 코어 재질로 사용하고 있다. FRP 코어는 유리섬유를 수지에 함침시켜 원형으로 인발 성형한 재질로서, 무기불연

유리섬유의 함량이 전체의 약 80 %에 이르고 있다. 이 유리섬유는 용융점이 약 1,000 ℃ 이상으로서 일반 폴리머와는 달리 난연성이 아니라 불연성을 나타내는 재질이다. 폴리머애자는 이러한 FRP 코어를 금구로 압착하여 필요한 인장 특성을 갖게 하는 구조로서, 기계적 특성을 나타내는 부분은 유리 폴리머가 아닌 무기불연재질인 것이다. 따라서 600 ℃ 이상의 고온 화염에서도 기계적 특성이 변화하지 않은 특성을 나타낸다. 이와 같이 폴리머애자는 기계적 특성을 나타내는 부분이 실제로는 유리섬유와 금구로 이루어진 무기재료로서 일부의 우려와는 달리 산불과 같은 화염에 견딜 수 있는 내구성을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

표 5. 인장파괴하중시험 결과치.
Table 5. The results of tensile strength test.

구 분	25,000 lbs			36,000 lbs		
	신품	5분 경과	20분 경과	신품	5분 경과	20분 경과
최대 하중 [kgf]	12,955	12,755	12,585	17,565	17,100	16,985
SML 시험	양호	양호	양호	양호	양호	양호

4. 결 론

인공모의 화염시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 화염의 가열을 시간이 5분 정도일 때는 하우징의 일부 손실이 있었지만 전기적 특성(85 % 이상)과 기계적 특성(SML 유지)은 양호하였다.
2. 가열시간이 20분 이상일 때는 하우징의 잣이 손실되고 약간의 전기적 특성의 저하(70 %)는 있었지만 기계적 특성은 양호(SML 유지)하였다.
3. 폴리머 애자의 잣이나 시스부가 자기재와 같은 불연성은 아니지만 난연성임을 확인하였다.

본 연구의 실험은 실제 산불 발생시 폴리머 애자에 기계적 분리가 나타나는가에 대한 관점에서 실시하였으므로 실험조건이 실제 현상을 완벽하게

모의하였다고는 판단할 수 없다. 즉, 실험에 적용한 온도 및 가열시간이 지나치게 가혹하다는 것이다. 다만, 가혹한 조건에서도 폴리머 애자의 기계적 분리 현상은 일어나지 않음으로서 산불과 같은 화재에도 송전용 폴리머 애자의 안정성에 대한 우려를 어느 정도 제거시킬 수 있었다.

추후에는 좀더 온도 제어가 용이한 모의실험 장치를 개발 및 제작하여 산불에 대한 송전선로의 폴리머 애자의 신뢰성 연구를 지속적으로 진행할 예정이다.

참고 문헌

- [1] 이시영, 한상열, 안상현, 오정수, 조명희, 김명수, “강원도 지역 산불발생인자의 지역별 유형화”, 한국농림기상학회지, 제3권, 제3호, p. 135, 2001.
- [2] 이시영, 강용석, 안상현, 오정수, “GIS를 이용한 산불피해지역 특성분석”, 한국지리정보학회지, 제5권, 제1호, p. 20, 2002.
- [3] 이시영, “대형산불 확대요인 분석”, 월간임업정보, 135호, p. 33, 2002.
- [4] 설계기준-1211, “가공송전선 이도 설계기준”, 한국전력공사, p. 1, 1996.
- [5] 김기범, 김영준, 김주현, 노상도, 민동균, 이상욱, 한영근, “현대제조공학”, 대웅, p. 286, 2003.
- [6] IEC 61109, “Composite insulators for A. C. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria”, International Electrotechnical commission, p. 47, 1995.
- [7] IEC 60707, “Flammability of solid non-metallic materials when exposed to flame sources - List of test methods”, International Electrotechnical commission, p. 11, 1992.
- [8] ES 131, “애자시험방법”, 한국전력공사, p. 6, 1998.
- [9] ANSI C29.1, “Electrical Power Insulators - Test Methods”, American National Standards Institute, p. 8, 1988.