

초고압용 폴리머 애자의 산불영향 연구

(A study of the Influence of Forest Fire on Polymer Insulator for UHV)

최인혁* · 최장현 · 정윤환 · 이동일

(In-Hyuk Choi · Jang-Hyun Choi · Yoon-Hwan Jung · Dong-Il Lee)

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. 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, and investigated the electrical and mechanical characteristics of the insulators after the ignition test. 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%.

1. 서론

산불이란, 산림내에서 임목, 낙엽, 풀 등이 연소하는 것으로 산림에 불이 붙어 일어나는 것으로서 산림 화재라 할 수 있다. 이와 같이 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 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 파급효과는 엄청날 것이다. 또한 송전선로에서 사용되고 있는 폴리머애자의 사용기간이 자기애자의 사용 기간에 비해 상대적으로 기간이 짧아 산불 발생에 대한 폴리머애자의 안정성 우려가 일부 있는 것이 사실이다.

폴리머애자에 대한 연구는 많이 진행되어 하우스의 재료에 대한 연구, 절연특성의 향상에 대한 연구, 외피 재 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 연구에서는 산불 발생시 불꽃 및 주위의 온도가 폴리머애자에 미치는 영향을 알아보기 위해 모의실험 화염장치를 제작하였다. 그리고 산불이 발생하였을 때의 온도분포와 전선의 이도 및 송전선로에 사용되는 전선의 재질 등을 고려하여 화염의 온도를 약 750℃로 설정하여, 화염의 가열시간의 설정은 산불의 최저 이동속도인 4 km/h를 바탕으로 가열시간을 5분과 20분으로 설정하여 시험하였다. 한편, 시료는 폴리머애자의 경우 축소품(1/3), 5분 및 20분 가열시간에 따라 각각 3개씩의 시료를 준비하였고, 자기애자의 경우는 신품과 5분 가열시험을 위한 시료로 각각 3개씩 사용되었다.

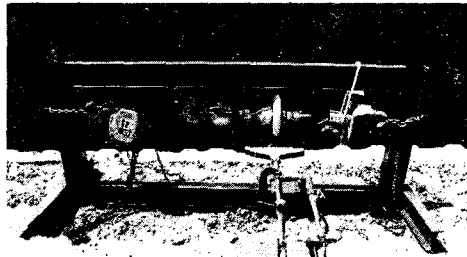
2. 본론

2.1 시료 및 실험장치

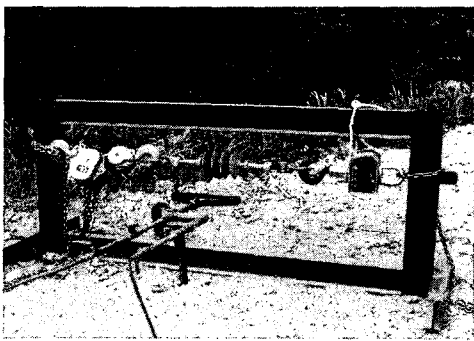
산불의 영향이 송전용 폴리머애자에 미치는 특성을 연구하기 위하여 실험에 사용된 시료는 현재 현장에서 실제로 사용되고 있는 154 kV 송전선로용으로 규정인장하중이 12,500 kgf인 자기애자와 폴리머애자를 사용하여

다. 자기애자는 송전용 154 kV급 애자를 사용하였다. 실제 크기의 애자들을 실험장치에 편리하게 장착하고 용이한 해석을 하기위해 자기 애자는 1개를 사용하였으며, 폴리머 애자는 584 mm의 연결길이를 갖도록 제작하였다. 실험에 사용된 폴리머애자는 154 kV선로에 사용되는 폴리머 애자의 양 끝단 금구 및 폴리머 하우징과 동일한 형상을 갖도록 제작하면서 실제 애자의 약 1/3 정도 크기로 축소한 크기이다. 폴리머애자의 내부 코어는 유리 섬유강화플라스틱을 사용하였고, 하우징은 실리콘 재질을 사용하였다.

산불의 불꽃과 유사한 조건을 만들기 위하여 그림 1에서와 같은 실험 장치를 제작하여 애자들을 장착하였다. 그림 1의 (a)와 (b)에서와 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 그림 2에서 보는 바와 같이 설치하였다.



(a) 자기애자
(Porcelain insulator)



(b) 폴리머애자
(Polymer insulator)

그림 1. 인공화염 실험장치
Fig. 1. Artificial fire equipment

2.2 실험방법

일반적으로 산불 발생시에는 그림 2와 같이 연기의 온도는 600℃, 화염 중심부 최대온도는 1200℃ 정도까지 올라간다[1]. 하지만, 철탑의 높이와 전선이도 등을 고려하면 전선의 높이가 애자의 높이보다 낮음을 알 수 있다[5]. 따라서 송전선로에 사용되는 강심알루미늄 전선의 외부를 감싸고 있는 알루미늄 선의 녹는점을 대략 660℃로 고려하여[6], 실험에서는 애자의 가열온도를 750℃설정하였고, 실제 온도의 변화는 대략 600~900℃ 사이의 온도가 측정되었다. 또한 불꽃의 폭은 350 mm, 길이는 500 mm로 조정하였다.

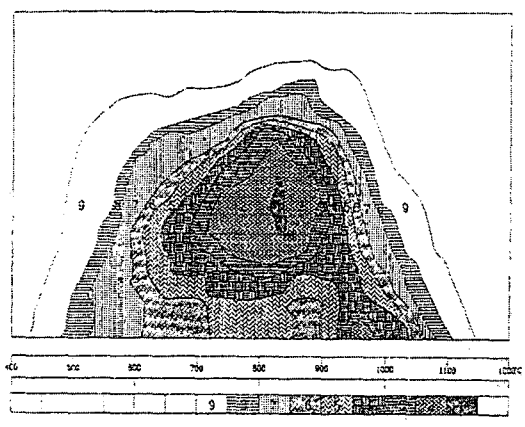


그림 2. 산불 발생 주변의 온도분포 형상
Fig. 2. Geometry of fire intensity at the burning site

그림 3은 인공화염장치의 시험 하중을 설정하기 위한 것으로 IEC 61109(1992)에 규정되어 있는 송전선로에서 사용기간 동안 애자에 인가되는 하중은 '사용자의 하중-시간 곡선'의 직선 식에 의해 예측하였다[7]. 통상 기계적 하중(Ordinary Mechanical Load, OML)은 통상의 온도 및 풍속에서 도체, 연결 금구, 스페이서 등의 무게를 받는 하중이고, 이상 기계적 하중(Extraordinary Mechanical Load, EML)은 실제 설치 기간 중 한 주 동안 발생하는 최대하중으로, OML 보다는 높지만 EML에서 애자의 영구변형은 발생하지 않는다. 최대 기계적 하중(Maximum Mechanical Load, MML)은 전체 수명 중에 발생할 수 있는 가장 높은 하중으로 단시간(예를 들면, 1분)에 발생할 수 있으며 EML을 초과한다. 이와 같이 IEC 61109에서의 예를 보면 가혹하지 않은 기후에서 OML은 보통 $0.20 \sim 0.33 \times MML$ 로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 한전 구매시방서에서 제시하고 있는 25,000 lbs의 애자들에 대해 통상 기계적 하중을 규정하중의 33%로 정하고 있으므로 시험하중의 통상 기계적 하중값을 적용하여 3.8ton으로 결정하였다.

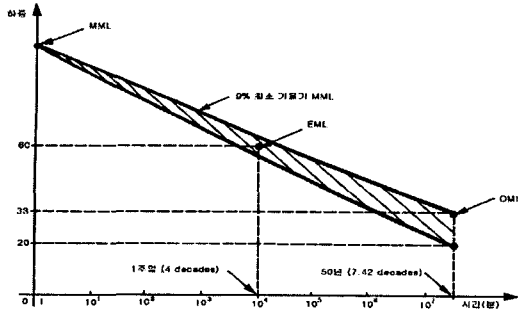


그림 3. 사용자의 하중-시간 곡선
Fig. 3. Load-time straight line of the user

일반적으로 산불의 이동속도는 4~7 km/h이고 바람의 영향을 감안하면 대략 10 km/h이다[2]. 산불이 애자에 미치는 면적을 반경 100 m라 가정하고 산불의 최저 이동속도인 4 km/h를 계산하면 애자의 피해시간은 직경 200 m 안에서 약 3분이 된다. 하지만 실험에서는 실제 조건보다 가혹한 조건으로 가열시간을 5분과 20분으로 설정하여 실험하였다.

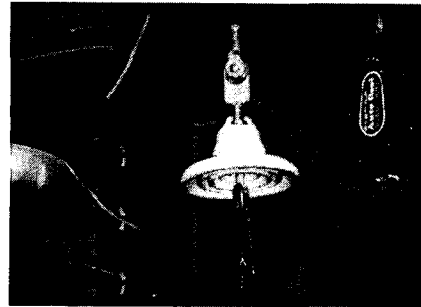
가열시간의 경과에 따라 자기애자의 디스크 변화와 폴리머애자의 하우징 변화를 관찰하였고, 실험이 진행됨에 따라 디스크와 하우징의 변화에 따른 각 단계별 시료를 채취하여 상용주파 건조섬락전압시험, 충격섬락전압의 전기적 시험과 규정인장하중시험을 통한 기계적 시험으로 자기애자와 폴리머애자의 전기적, 기계적 특성을 파악하였다. 건조섬락전압시험 후 같은 시료에 대해 뇌충격 섬락전압시험을 3회 반복하여 그 결과치의 평균값을 data 하였으며, 전기적 실험이 끝난 시료를 이용하여 기계적 실험을 수행하였다. 실험은 예비실험을 거친 후 각 단계별로 3개의 시료를 사용하여 그 평균값을 데이터로 얻었다.

2.3. 측정결과

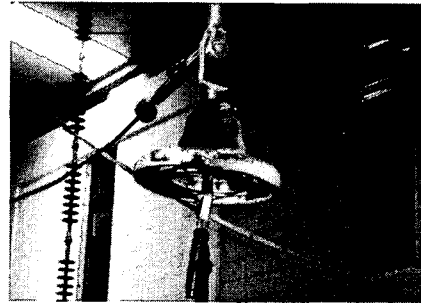
2.3.1. 하우징의 변화

그림 4에 신품의 자기애자 (a)와 가열시간이 5분 경과한 후의 디스크 변화가 발생한 자기애자 (b), (c)를 나타내었다. 그림 3의 (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

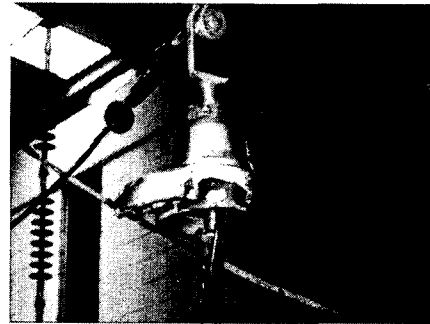
있었지만 인공화염 모의실험이 진행되고 끝마칠 때까지 자기애자의 금구와 디스크가 분리되는 기계적 분리는 나타나지 않았다.



(a) 신품 (virgin)



(b) 5분경과 [정상상태]

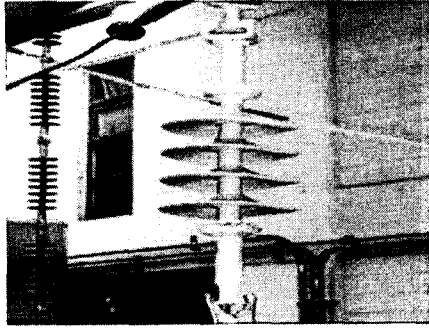


(c) 5분경과 [파손상태]

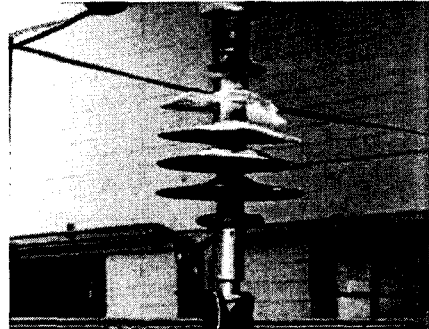
(5 minutes elapsed, breakage disc)

그림 4. 자기애자 디스크의 형상변화
Fig. 4. Disc deformation of porcelain insulator

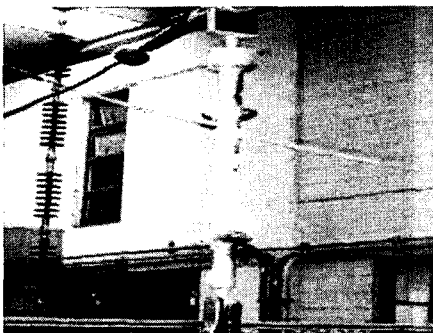
그림 5에는 가열시간의 경과에 따른 폴리머애자의 하우징 변화를 나타내었다. 폴리머애자의 경우, 5분이 지나면서 갓(shed) 부분이 유실되기 시작하였고 20분 정도 경과하면서 갓의 대부분이 손실되었으며 대략 50분 정도의 시간이 경과하면서 시스(sheath) 부분이 유실되는 것을 알 수 있었다. 폴리머재료가 열에 취약할 것이라는 우려와는 달리 난연성 재질임을 확인하였다. 자기애자의 경우와 마찬가지로 인공화염 모의실험을 끝마칠 때까지 금구와 FRP 로드의 분리나 FRP 로드가 부러지는 등의 기계적 분리는 나타나지 않았다.



(a) 신품 (virgin)



(b) 5분경과 (5 minutes elapsed)



(c) 10분경과 (10 minutes elapsed)

그림 5. 폴리머에자 하우징의 변화
Fig. 5. Housing deformation of polymer insulator

2.3.2. 전기적 특성의 변화

가) 상용주파 건조섬락전압 시험

각각의 시료에 대한 상용주파 건조섬락시험 측정값을 표 1과 2에 나타내었고, 이를 그림 5에 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].

표 1, 2와 그림 5에서 보는바와 같이 폴리머에자는 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 절연과파에까지는 미치지 못하였으므로, 폴리머에자의 전기적인 특성값은 유지하고 있음을 보여준다. 반면에 자기에자의 경우는 가열 후 디스크 부분이 손상을 입은 경우나 정상적인경우의 두 가지 모두 상용주파 건조섬락전압 측정값의 급격한 감소를 보이고 있다. 이는 외관이 정상으로 보일지라도 내부 크랙으로 인해 섬락거리가 붕괴되어 나타난 현상으로 생각된다.

나) 뇌충격 섬락전압시험

각각의 시료에 대한 뇌충격 섬락전압시험 측정값을 표 3 ~ 6에 나타내었고, 이를 그림 6에 그래프로 나타내었다. 뇌충격 섬락전압이란 깨끗하게 건조된 시험품의 두 전극간에 일정치의 뇌충격 전압을 가하여 섬락을 나타낼 때의 전압치의 파고치를 말하는 것으로, 뇌충격 섬락전압시험에 사용되는 표준파형은 $1.2 \times 50 \mu s$ 로 정극성과 부극성의 전파전압이 있다[8].

표 1. 폴리머에자의 건조섬락전압시험 결과치 (단위: kV)

Table 1. The results of low-frequency dry flashover voltage test for polymer insulator

구분	신품			5분 연소			20분 연소		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3
결과치	131	131	129	118	118	116	89	88	88
	129	126	127	117	114	115	95	95	101
	126	128	128	113	115	120	100	100	91
평균값	128.3			116.2			94		

표 2. 자기에자의 건조섬락전압시험 결과치 (단위: kV)

Table 2. The results of low-frequency dry flashover voltage test for porcelain insulator

구분	신품			5분 연소		
	#1	#2	#3	#1 (디스크 양호)	#2 (디스크 파손)	#3 (디스크 파손)
결과치	85	88	86	16	9	13
	87	90	93	17	9	12
	89	83	85	16	10	7
평균값	87			16.3	10	

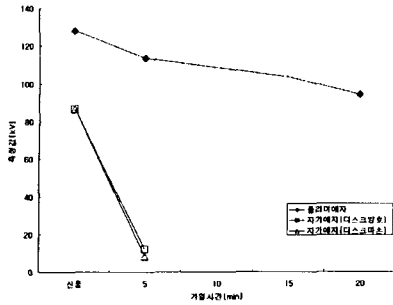


그림 5. 상용주파 건조섬락전압시험 시험결과
Fig. 5. The results of low-frequency dry flashover voltage test

폴리머에자나 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.

표 3. 폴리머에자 충격섬락전압시험 결과치 (정극성) [단위:kV]

Table 3. The results of impulse flashover voltage test for polymer insulator (positive)

구분	신품			5분 연소			20분 연소		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3
시료수	228	234	233	209	209	212	152	149	153
결과치	231	231	228	212	209	210	154	148	152
	230	229	232	211	208	213	151	150	150
	평균값			116.2			151		

표 4. 폴리머에자 충격섬락전압시험 결과치 (부극성) [단위:kV]

Table 4. The results of impulse flashover voltage test for polymer insulator (negative)

구분	신품			5분 연소			20분 연소		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3
시료수	280	287	285	274	278	275	200	206	207
결과치	284	286	283	276	275	277	203	204	206
	283	283	285	277	272	274	201	203	206
	평균값			275.3			204		

표 5. 자기애자 충격섬락전압시험 결과치 (정극성) [단위:kV]

Table 5. The results of impulse flashover voltage test for porcelain insulator (positive)

구분	신품			5분 연소		
	#1	#2	#3	#1 (디스크 양호)	#2 (디스크 파손)	#3 (디스크 파손)
시료수	147	148	146	62	38	35
결과치	146	145	144	62	36	39
	147	146	145	63	35	34
	평균값			62.3		36.1

표 6. 자기애자 충격섬락전압시험 결과치 (부극성) [단위:kV]

Table 6. The results of impulse flashover voltage test for porcelain insulator (negative)

구분	신품			5분 연소		
	#1	#2	#3	#1 (디스크 양호)	#2 (디스크 파손)	#3 (디스크 파손)
시료수	140	138	142	28	46	40
결과치	139	137	139	29	44	37
	141	140	137	29	43	39
	평균값			28.3		41.5

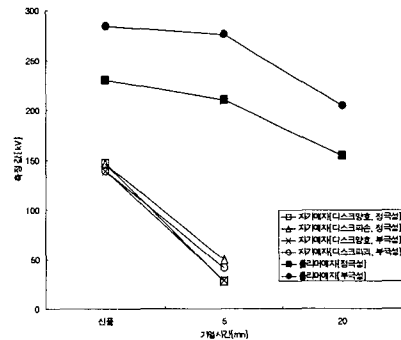


그림 6. 충격섬락전압시험 시험결과
Fig. 6. The results of impulse flashover voltage test

2.3.3. 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 결과값을 표 7에 나타내었다.

송전급 애자(25,000 lbs)의 경우 한전에서 규정하는 규정인장하중의 기준값은 12,500kgf로 표에서 보는 바와 같이 폴리머애자의 경우는 모두 기준값을 만족하였다. 폴리머애자의 경우 일반적으로 기계적 강도는 FRP 로드의 두께 및 FRP 로드와 연결금구의 압착강도에 의해서 결정된다. 비록 화염에 의해 FRP 로드의 외부를 감싸고 있는 갓과 시스의 손실이 발생하였지만, FRP 로드 및 FRP 로드와 연결금구에 까지 미치는 영향은 적은 것을 알 수 있었다. 반면에 자기애자의 경우는 디스크가 양호한 제품은 기준값을 만족하였으나 디스크가 파손된 경우는 기준값에 약간 못 미치게 나타났다. 이는 자기애자의 기계적 특성을 좌우하는 금구와 시멘트 부분의 열팽창계수가 서로 상이하여 발생된 것으로 생각된다.

표 7. 규정인장 파괴하중 시험결과 (단위:kgf)
Table 7. The results of tensile load test

구분	자기애자		폴리머애자		
	신품	5분 가열	신품	5분 가열	20분 가열
시험값	14,200	12,745	13,100	12,755	12,585
	14,300	11,635	12,900	13,015	12,610
	14,300	12,715	12,865	12,931	12,640
평균값	14,280	12,365	12,955	12,885	12,585

※ [fail]을 제외한 모든 항목은 [pass]임.

3. 결론

실제 산불과 같은 화재발생을 모의하여 화염의 온도를 750℃ 정도로 설정하여 자기애자와 폴리머애자를 대상으로 실시한 인공모의 화염시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

폴리머애자의 산불에 대한 내구성을 확인하기 위하여 실 선로에서 오랜 기간 사용경험이 있는 자기애자와 비교시험을 한 결과, 자기애자와 폴리머애자 모두 연결금구가 파손되어 분리되는 현상은 발생하지 않았다. 실제 산불의 이동속도를 고려한 조건보다 약간 더 오랜 시간인 5분과 20분간 가열 후, 자기애자는 전기적 특성의 감소가 뚜렷한 반면 폴리머애자는 10~30% 정도만의 감소를 보였으며, 모든 애자의 기계적 특성은 가열전과 비교하여 크게 감소하지 않은 경향을 나타내었다. 가열 시험 후 자기애자의 전기적 특성의 저하가 폴리머애자보다 크게 나타난 것은, 고열의 영향으로 기계적 강도에 영향을 미치지 않은 범위 내에서 금구와 자기재의 열팽창계수의 차이로 인한 계면 탈리 현상으로 판단되었다.

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 제거 시킬 수 있었다.

향후 산불과 같은 화재를 정확하게 모의할 수 있는 실험 장비를 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. Cherney 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", 대웅, 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.