

장간유리애자 파손시 절연파괴 특성

論 文

57-8-14

The Electrical Breakdown Characteristics of Broken Toughened Glass Stem Insulator

鄭鍾旭* · 鄭鎮洙** · 金榮錫†
(Jong-Wook Jung · Jin-Soo Jung · Young-Seok Kim)

Abstract – This paper describes the electrical breakdown characteristics of broken toughened glass stem insulators by comparing with those of sound ones. The broken toughened glass stem insulators were taken from the electric railway field. According to the international standards, the sound and broken toughened glass stem insulators were tested in electrical strength. In the test, the power frequency voltage and the impulse voltage with a standard waveform were applied to the insulators. The power frequency voltage tests were carried out under both dry and wet condition and the impulse voltage tests under only dry condition. The acquired results were compared one another and discussed in electrical breakdown characteristic by analyzing the flashover progress pictures.

As a result, the electrical strength of the broken toughened glass insulators was acquired and the processes of the surface breakdown on the toughened glass insulators were confirmed.

Key Words : Electrical breakdown characteristics, Toughened glass stem insulators, Electric railway, Power frequency voltage, Impulse voltage

1. 서 론

유리는 일반인들의 생활 속에 깊숙이 자리잡아 그 특정 용도가 딱 이렇다고 정할 수 없을 정도로 다양하게 사용되어 왔다. 특히 전기산업계의 경우에도 그 우수한 전기적 특성으로 인해 유리애자의 주절연재로 채용되는 등, 오랜 세월 각광을 받아왔다. 유리애자는 현재도 아시아권의 많은 국가에서 전기적 용도로 사용하고 있으며, 우리나라의 경우에도 고속 전차선로에 채용되어 전국이 반나절 생활권에 진입하는데 커다란 기여를 하게 되었다. 애자 본연의 기능이 그러하듯이 유리애자도 전기적 절연 확보와 구조물의 지지라는 2가지 목적을 동시에 달성해야 하며, 이를 목적 중 하나가 제 기능을 상실하면 다른 기능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 실제로 일반 전차선로와는 달리 고속 전차선로의 경우에는 전차의 주행특성은 물론, 주위환경에 의해 장간유리애자를 파손시킬 수 있는 잠재적인 요인들이 다수 존재하지만, 국내에서는 주로 전기철도용으로만 사용되는 까닭에 제작방법 및 구조면에서 자기애자와 차이가 있음에도 불구하고 전기적 절연파괴 특성 등에 대한 연구가 거의 이루어진 바 없었다. 그러나 고속 전차선로에 적용되어 있는 장간유리애자의 양적 규모 및 시설의 국가적 중요성을 감안하면,

이에 대한 전기적, 기계적 제반 특성을 파악하는 등의 노력이 경주되어야 한다. 특히, 장간유리애자의 shell이 어떠한 원인에 의해 파손된 후의 전기적 성능은 파손 전에 비해 저하될 것이 자명하며, 이 저하의 정도가 건전상태에 비해 어느 정도가 되는지에 대한 이해를 통해 선로 운전전압에 대한 여유도도 파악해 두어야 할 것이다. 장간유리애자에 사용되는 유리는 열처리에 의해 고도로 강화된 유리로서, 자기애자나 폴리머애자와는 다른 기계적 파괴 특성을 나타내며, 이 특성이 장간유리애자의 전기적 파괴에 영향을 미칠 수도 있다.

따라서, 본 연구에서는 파손된 장간유리애자를 수거하여 국제기준에 준해 상용주파전압을 이용한 건조 및 주수섬락시험과 정·부극성의 충격전압을 인가한 50[%] 섬락전압을 각각 측정하였다. 측정된 각 절연파괴전압은 상호 비교를 통해 분석되었으며, 마지막으로 건조시와 주수시 장간유리애자에서 발생하는 절연파괴의 진행메카니즘 및 양상을 비교하여 도해하였다. 또한, 섬락이 발생한 장간유리애자의 표면을 관찰한 결과, 도전로가 형성된 것을 발견하였으므로, 누설전류가 진행하는 경로에 대한 고찰도 병행하였다. 최종적으로 모든 시험결과 및 분석을 토대로, 전기적 제반원인이 장간유리애자에 부정적으로 기여하는 영향도 검토하였다.

2. 장간유리애자

2.1 유리이론

유리는 일반적으로 그 유래에 대한 정확한 정설은 없으나, 제조온도가 비슷한 청동이나 철 등의 금속 야금기술과 관련하여 5천년 전인 청동기시대에 출현했다고 보고 있다.

* 正會員 : 韓國電氣安全公社 電氣安全研究院 先任研究員

** 正會員 : 韓國電氣安全公社 電氣安全研究院 研究員

† 教신저자, 正會員 : 韓國電氣安全公社 電氣安全研究院
研究員·工博

E-mail : jung@seoul.korea.com

接受日字 : 2008年 4月 1日

最終完了 : 2008年 6月 5日

우리나라의 경우에는 한반도 철기문화의 보급시대인 기원전 2세기에 최초로 발견되었으며, 그 후 원삼국 시기의 다양한 유리구슬과 삼국시대, 통일신라시대를 거쳐 화려하고 귀한 용도로 사용되다가 고려시대에 들어 이렇다 할 만한 이유 없이 소멸되기 시작하였다[1]. 그러나 1890년대에 산업유리가 도입된 이후 지금까지는 꾸준히 발전해 왔다.

유리는 일반적으로 규사, 소다회, 탄산석회 등의 혼합물을 고온에서 녹인 후 냉각하는 과정에서 생기는 투명도 높은 물질을 말하며, Simon의 동결과정에 의한 Haase의 정의에 따르면, 유리는 일반적으로 고체처럼 보이나 열역학적으로는 그림 1(b)와 같이 무결정형으로 동결된 파냉각 액체(super cooled liquid)로서 물과 같은 액체상태이다. 즉, 그림 2에 보인 바와 같이, 유리는 점도가 무한히 높은 용액상태로 고화된 물체로서, 유리물(유리 용용액)을 냉각시키면 열역학적 임계영역을 통과한 후 액체의 구조와 유사한 준안정한 유리상태로 전환된다. 일반적인 유리는 점성이 너무 커 그 모양이 쉽게 바뀌지는 않지만 급랭 제작하므로, 강도가 낮아 쉽게 깨진다.

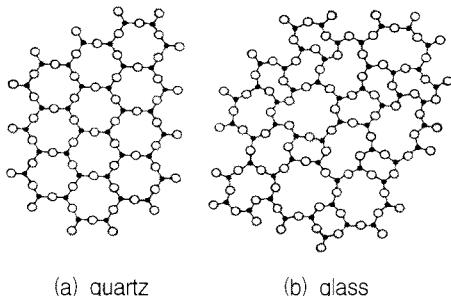


그림 1 quartz와 glass의 분자구조 비교
Fig. 1 Comparison between quartz and glass

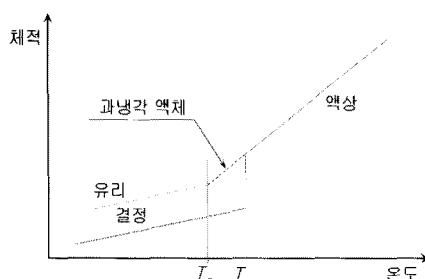


그림 2 온도에 따른 유리의 상 전이
Fig. 2 Phase transition of glass with temperature

유리의 주원료는 규산(SiO_2 , 71~73[%])이 주성분인 규사이지만, 규산을 녹이기 위해서는 1,700[°C] 이상의 고온이 필요하기 때문에 보통은 소다(Na_2O , 12~14[%])를 첨가하여 용융온도를 낮추고, 여기에 물에 녹지 않는 유리를 만들기 위해 석회(CaO , 10~12[%])를 첨가한다. 결국 규산과 소다 및 석회가 유리의 주성분이 되며, 이들 주성분 이외에도 유리의 강도증진, 내구성 향상, 광학적 물성 향상을 위해 MgO (1~4[%]), Al_2O_3 (0.5~1.5[%])와 같은 부원료 및 유리제조과정 중의 부산물인 파유리(cullet)를 혼합하고, 이들 원료 혼합물을 용융로에 넣어 녹인 후 원하는 형상으로 성형

하여 float glass를 생산한다[2][3].

2.2 애자용 강화유리 및 물리적 특성

강화유리는 float glass를 연화온도에 가까운 670[°C]~710[°C]로 가열하였다가 급속히 냉각시키는 tempering 공정에 의해 제작한 유리이다. 일반 float glass에 외력이 가해지면 표면에는 압축응력이, 반대측 표면에는 인장응력이 작용하여 유리가 파손되지만, 강화유리는 그림 3과 같이 반대측 유리 표면에도 압축응력이 작용하여 인장응력에 저항할 수 있는 힘이 형성되므로 급한 강도에서 3~5배, 내충격에서 5~8배, 파손되지 않는 온도차의 한계인 내열강도(열충격저항)에서 약 2배 이상 강화된 강도를 갖는다.

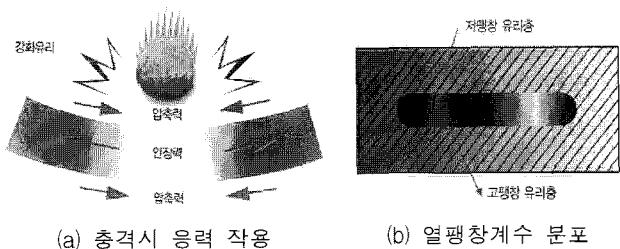


그림 3 강화유리의 특성
Fig. 3 Characteristics of toughened glass

압축공기로 tempering 처리하는 일반적인 강화유리의 표면 압축응력층은 유리 두께의 약 15[%] 정도 깊이로 양쪽 유리 표면에 형성되어 있다. 실험결과에 의하면 이들 유리 표면의 압축응력은 유리두께에 따라 약간의 차이는 있으나 평균적으로 약 150[MPa](1[MPa]=10.1972[kgf/cm²]) 정도이며, 압축응력층의 깊이는 보통 100~300[mm]이고, 이 압력응력을 파괴하기 위한 강도(MOR; modulus of rupture)는 최소 1,500[kgf/cm²] 정도라고 한다. 장간유리애자용 강화유리는 일반 강화유리와는 달리 물을 냉매로 사용하므로, 보다 높은 강도로 강화된다. 현장에 설치된 장간유리애자의 경우, 외부로부터의 누적 파로보다는 충격에 의해 파손될 가능성이 높으며, 실용적으로 사용되는 충격강도를 살펴보면 5[mm] 두께의 일반유리는 약 1[kgf/m]이지만, 동일 두께의 강화유리는 약 5.5[kgf/m] 정도가 된다. 유리는 외부로부터 물리적인 힘이나 충격이 가해지면 아주 작은 양의 탄성변형만을 일으키며, 탄성영역 이상의 외력이 가해지면 유리표면에 존재하는 상당수의 미세 균열이 성장하여 파손에 이른다. 강화유리는 양 표면에 작용하는 영구적 압축응력이 유리 표면상의 보이지 않는 미세균열의 성장을 억제하므로, 그 압축응력과 유리의 강도를 합한 값보다 큰 응력이 외부에서 걸리지 않으면 깨지지 않는다. 그러나 외부에서 돌 같은 것이 비산하여 부딪치면 유리는 폭발적으로 깨져 버린다. 그 이유는 딱딱한 물체가 고속으로 부딪혀 새로운 균열이 발생하고 이 균열이 인장응력이 이미 걸려있는 유리내부 영역으로 들어오면서 순간적으로 압축응력과 인장응력의 균형이 깨지므로, 유리표면과 내부의 열팽창계수 차이로 인해 잘게 파괴된다. 이 때 유리는 표 1과 같이 열전도도가 작아 열을 발생하여 내부의 인장응력을 해소하기에는 미미하므로, 대신 잘게 부서

져 그 표면을 많이 만듦으로써 표면에너지를 증가시켜 그 스트레스를 해소한다. 일반적인 강화유리의 충격강도를 충격의 종류별로 정리하여 표 2에, 자기 및 강화유리의 미세균열 억제 효과를 비교하여 표 3에 각각 나타내었다.

표 1 장간유리애자용 강화유리의 물리적 특성[4]

Table 1 Physical properties of toughened glass for stem insulators

	강화유리	자기
밀도[g/cm ³]	2.5	2.3~3.9
인장강도[MPa]	100~120	30~100
압축강도[Mpa]	210~300	240~820
열전도도[W/m·K]	1.0	1.0~4.0
팽창율@20[°C][×10 ⁻⁶ K]	8.0~9.5	3.5~9.1
비유전율@60[Hz]	7.3	5.0~7.5
$\tan\delta[\times 10^{-3}]$	15~50	15~50

표 2 강화유리 충격강도

Table 2 Impact strength of toughened glass

가격물	동작 (성인 남자)	질량 [kg]	속도 [%]	품종별 파손율[%]			
				float glass		강화유리	
				5[mm]	12[mm]	5[mm]	12[mm]
작은 돌	역투	0.073	26	100	100	40	20
벽돌조각	역투	1.0	12	100	80	30	0
액주병	역투	0.8	15	100	80	30	0
야구공	역투	0.15	26	100	20	0	0
야구베트	타격	1.0	15	100	90	60	0
KSL2007				낙구(225[g]±2[g]에 의한 평균파괴높이[m])			
				1.3	1.0	8.5	9.0

표 3 자기 및 강화유리의 미세균열 억제 효과

Table 3 Effect of toughened glass and porcelain on microcrack prevention

부하상태	자기	강화유리
응력 없음	유약충은 크랙형성 억제 못함	사전 응력은 초기 미세균열 억제에 효과적 작용
일반적 응력	사전 응력은 균열 확산을 억제하기에 불충분함	사전 응력은 미세균열 확산 억제
피로의 효과	미세균열의 성장 진행	과도한 외부 응력만이 사전 압축응력으로 강화된 강도 파손 가능

2.3 유리애자의 구조

앞에서 살펴보았던 바와 같이, 유리애자의 주절연재는 강화유리이며 주형 제작하므로, 표면이 유약 처리되어 매끈한 자기애자와는 전기적 특성이 다르며, 구조면에서도 그림 4와 같은 차이를 나타내고 있다.

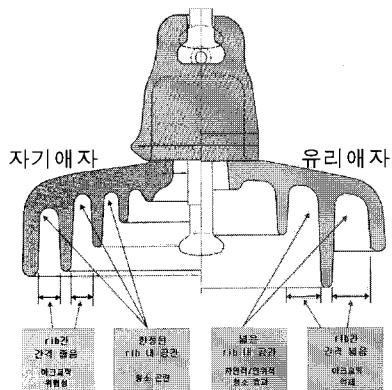


그림 4 자기애자와 유리애자의 비교

Fig. 4 Comparison between porcelain and toughened glass insulator

그림 4에 보인 바와 같이, 유리애자는 자기애자에 비해 rib간의 간격이 상대적으로 크며, 이로 인해 자연적 또는 인위적인 청소가 효율적으로 이루어질 수 있다. 한편, 카울린을 주재로 빚어 굽고 유약을 발라 마무리하여 표면이 매끈한 자기애자와는 달리 주형에 의해 형상을 뽑아내므로, 주형을 떼어낸 흔적이 애자 표면에 남는다는 구조적인 결함이 있다.

3. 장간유리애자 시험방법

본 연구에서는 장간유리애자의 절연파괴 특성을 알아보기 위해 건전시료 및 현장에서 수거한 파손시료를 이용하여 시험장치를 구성하고 건조시와 주수시의 상용주파 절연파괴전압 및 건조시 50[%] 섬락전압을 측정하였다. 본 시험을 위해 사용한 장간유리애자는 shell 1개의 직경이 255[mm], 높이가 146[mm]인 것으로서, 총 4개의 shell을 지닌 장간유리애자 3종을 준비하였으며, 상세 사양을 표 4에 나타내었다.

표 4 시험용 장간유리애자

Table 4 Specifications of toughened glass insulators for testing

구분	시료 A		시료 B		시료 C	
	직경[mm]	높이[mm]	직경[mm]	높이[mm]	직경[mm]	높이[mm]
규격	255	650	좌동	좌동	좌동	좌동
특징	건전시료		브라켓 하부 유리애자 (1번 shell 작용)		브라켓 상부 유리애자 (3번 shell 파손)	
형상						

이와 같이 준비된 시료에 대해 우선 상용주파 절연파괴전압을 측정하였다. 시험은 시료 A, 시료 B 및 시료 C의 순서로 진행되었으며, 그림 5와 같이, 상부에 전압을 인가하고 하부를 접지하였다. 상용주파 절연파괴전압을 측정하기 위한 모든 세팅이 완료된 후, 전압을 3[kV/s]의 속도로 증가시키면서 절연파괴 되는 순간의 전압을 10회 측정하였다. 10개의 데이터 중 최대값과 최소값을 제외한 8개 시험값의 평균값을 절연파괴전압으로 취하였다. 상용주파 내전압시험이 완료된 후 인가전압만을 충격전압으로 바꾸어 정극성 및 부극성의 50[%] 섬락전압을 측정하였다. 건조한 상태에서의 모든 시험이 완료된 후 도전율이 $100[\mu\text{S}]$ 정도인 물을 45° 하방으로 시료에 뿌려 충분히 젖게 한 후 건조시와 동일한 방법으로 상용주파 절연파괴전압을 측정하였다. 모든 시험은 온도 $5.9[^\circ\text{C}]$, 습도 64[%], 기압 1,005[hPa]의 환경적 조건 하에서 실시되었다.

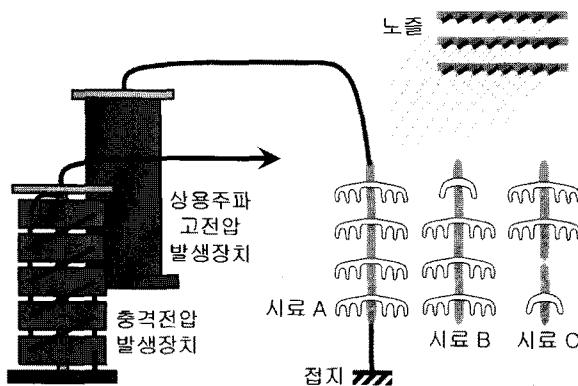


그림 5 실험장치 구성

Fig. 5 Schematic diagram of electrical breakdown test

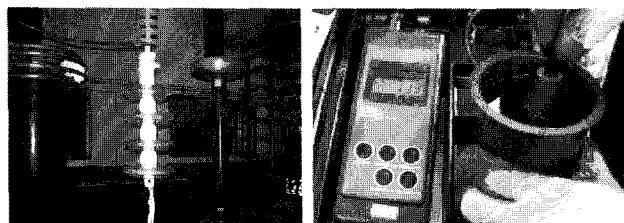
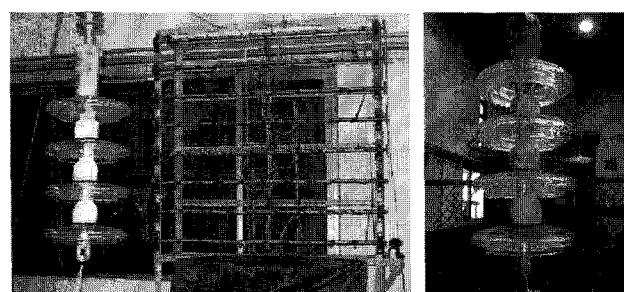


그림 6 시료설치 모습

Fig. 6 Specimen

그림 7 도전율 측정

Fig. 7 Water conductivity



(a) 시료로의 주수

(b) 주수된 시료 표면

그림 8 상용주파전압에 의한 주수섬락시험

Fig. 8 Power frequency flashover test under wet condition

4. 결과 및 검토

본 연구에서는 장간유리애자의 절연파괴 특성을 알아보기 위해 건전시료 및 현장에서 수거한 파손시료를 이용하여 시험장치를 구성하고 건조한 상태에서 상용주파 절연파괴전압을 측정한 결과를 그림 9에 나타내었다.

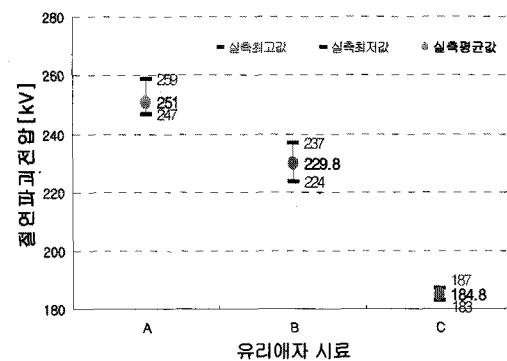


그림 9 장간유리애자 건조시 상용주파 절연파괴전압

Fig. 9 Power frequency breakdown voltage of toughened glass insulator under dry condition

그림 9에 보인 바와 같이, 상용주파전압에 대한 시료 A, 시료 B 및 시료 C의 절연파괴전압은 각각 251[kV], 229.8[kV] 및 184.8[kV]로 나타났다. 고전압 시험은 주위의 환경조건에 의해 값이 달라지며, 측정값은 시험장소의 당시 환경적 조건에서 얻은 값이므로, 대기조건을 표준대기상태로 하고 공기밀도 및 습도에 대한 보정계수를 적용하여 다시 환산하여 그래프로 나타내면 그림 10과 같다. 이때 공기밀도보정계수 K_1 은 1.04226, 습도보정계수 K_2 는 0.93431, 대기보정계수 K_t 는 0.973794를 적용하였다.

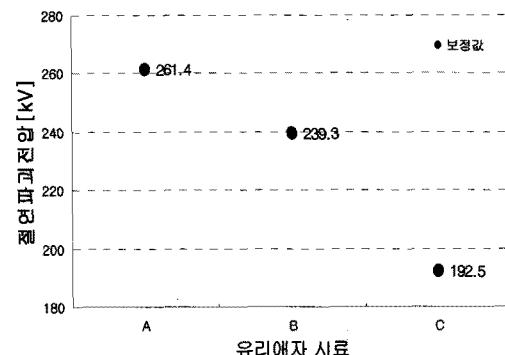
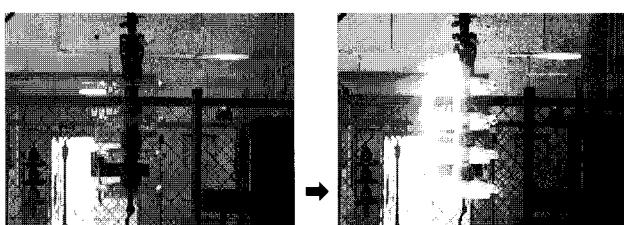


그림 10 보정계수 적용한 상용주파 절연파괴전압

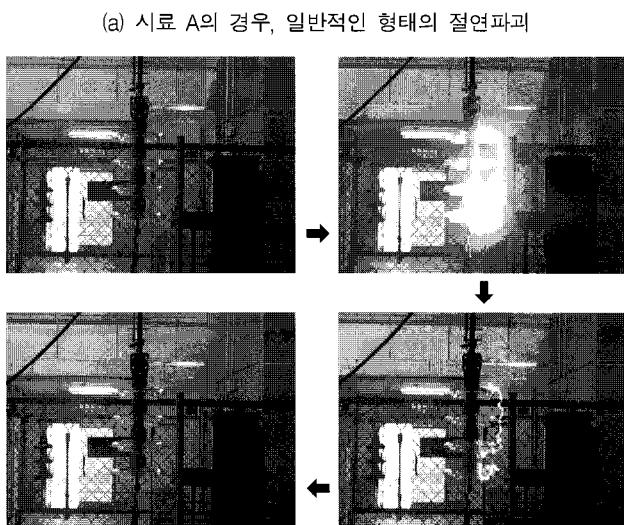
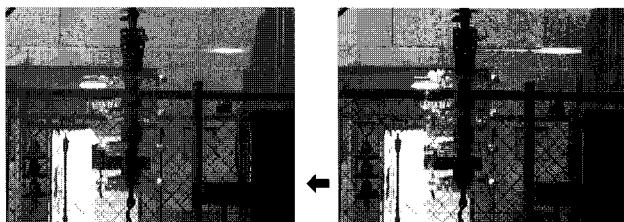
Fig. 10 Power frequency breakdown voltage converted by correction factors

그림 10에 보인 바와 같이, 그림 9의 측정값에 보정계수를 적용하여 계산한 값은 시료 A, 시료 B 및 시료 C에서 각각 261.4[kV], 239.3[kV] 및 192.5[kV]로 환산되었다. 실험결과로부터 상용주파전압에 의한 절연파괴전압은 파손된 시료 C가 건전시료 A에 비해서는 약 73.6[%], B에 비해서는 약 80.4[%]를 나타내었으며, 4번째 shell의 크기가 작은 시료

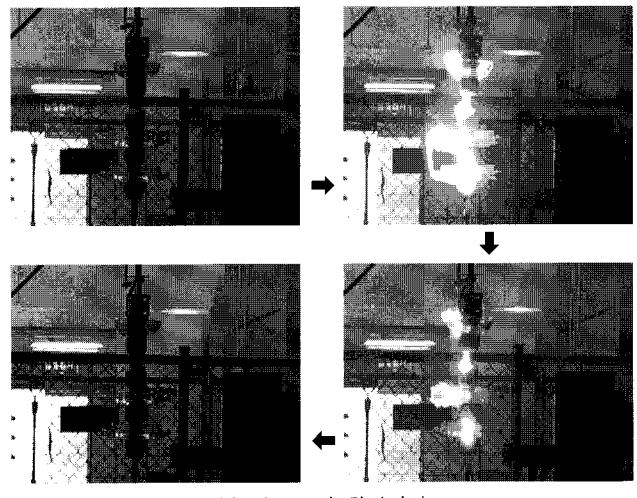
B는 shell의 크기가 동일한 시료 A에 비해 약 91.5[%]의 전압에서 절연파괴되는 것을 알 수 있었다. 건조시 상용주파전압에 의한 절연파괴는 전압 인가 초기에는 상·하부 shell의 표면에 연해 이동하는 전하가 연면방전의 최종 형태인 애자 상·하부의 교락으로 직접 진행하는 양상을 나타내며, 이는 후술할 주수시의 방전 메카니즘과는 “건조대” 형성이 생략되었다는 점에서 차이를 보인다. 한편, 그림 11에 보인 바와 같이, 상용주파전압에 의한 절연파괴시 시료 A와 시료 B의 경우, 방전 초기의 스트리머는 대지로부터 시작되어 애자 상부의 전압인가부를 향해 교락되었으며, 교락시에는 대부분 애자 shell의 말단을 잇는 기중 절연파괴의 형태를 나타내었으나, 상부로부터 3번째 애자까지를 제1경로로 하고 상부 3번째 애자로부터 접지까지를 제2경로로 하는 형태의 절연파괴도 빈번히 관찰되었으며, 이는 결국 장간유리애자가 절연파괴될 경우, 다른 shell에 비해 3번째 shell이 경험하는 충격이 클 것이라는 가정을 가능하게 한다. 이에 대한 보다 상세한 고찰은 장간유리애자에 대한 전계분포를 해석함으로써 가능할 것으로 사료되며, 본 연구에서는 전계해석은 고려 대상에서 제외하였다. 한편, 시료 C의 경우에는 시료의 파손된 부분을 경유하여 교락이 진행되었으며, 시험 후 파손 부위에는 그림 12와 같이 작게 조각 난 알루미나 시멘트와 강화유리 파편이 관찰되었다.



(a) 시료 A의 경우, 일반적인 형태의 절연파괴



(b) 시료 A의 경우, 상부로부터 3번째 애자를 경유하는 형태의 절연파괴



(c) 시료 C의 절연파괴

그림 11 상용주파전압에 의한 건조시 시료의 절연파괴

Fig. 11 Electrical breakdown of dry specimens by power frequency voltage

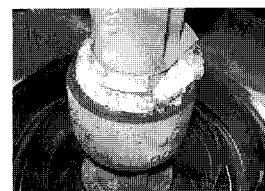
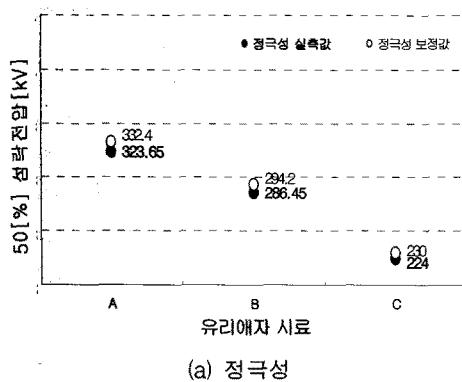


그림 12 절연파괴시험 후의 알루미나 시멘트 및 유리 파편

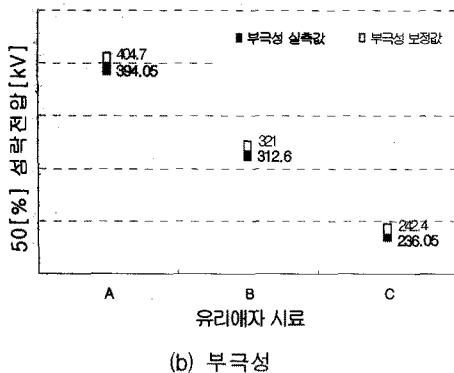
Fig. 12 Fragments of Alumina cement and toughened glass observed after electrical breakdown test

한편, 건조한 상태에서 충격전압에 의한 절연파괴 특성을 알아보기 위해 정극성 및 부극성의 50[%] 섬락전압을 측정 하였으며, 이 결과를 그림 13에 나타내었다.

그림 13에 보인 바와 같이, 장간유리애자에 대해 실시한 50[%] 섬락전압은 시료 A, 시료 B 및 시료 C에 대해 정극성인 경우, 323.65[kV], 286.45[kV] 및 224[kV]로, 부극성인 경우에는 394.05[kV], 312.6[kV] 및 236.05[kV]로 각각 측정되었다. 이 값들은 당시의 현장조건에서 실측한 값으로서, 대기 조건을 표준대기상태로 하고 공기밀도 및 습도에 대한 보정 계수를 적용하여 환산하면, 동일 순서로 정극성은 332.4 [kV], 294.2[kV], 230[kV], 부극성은 404.7[kV], 321[kV] 및 242.4 [kV]가 된다. 실험결과로부터 알 수 있듯이, 정상적인 시료의 경우에 비해 파손된 시료의 50[%] 섬락전압은 정극성이 약 69.2[%], 부극성이 약 59.9[%]의 충격전압에서 측정되었다. 또한, 절대값으로 보면 부극성의 50[%] 섬락전압이 정극성에 비해 건전시료인 A의 경우 약 122[%], 파손시료인 C의 경우 105[%] 정도 높은 것을 알 수 있었으며, 이는 직류나 충격전압에 적용되는 극성효과에 의한 것임을 알 수 있었다 [5]. 장간유리애자 표면에서 시작한 연면방전이 완전한 절연파괴로 이어지는 순간을 촬영한 사진으로부터 알 수 있듯이, 접지측으로부터 발달한 스트리머가 전압 인가측으로 진행하고 이로 인해 기중절연이 점차 파괴되어 교락으로 이어지는 것을 알 수 있다. 이 과정을 그림 14에 나타내었다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 13 장간유리애자의 50[%] 섬락전압

Fig. 13 50[%] flashover voltage of toughened glass insulator

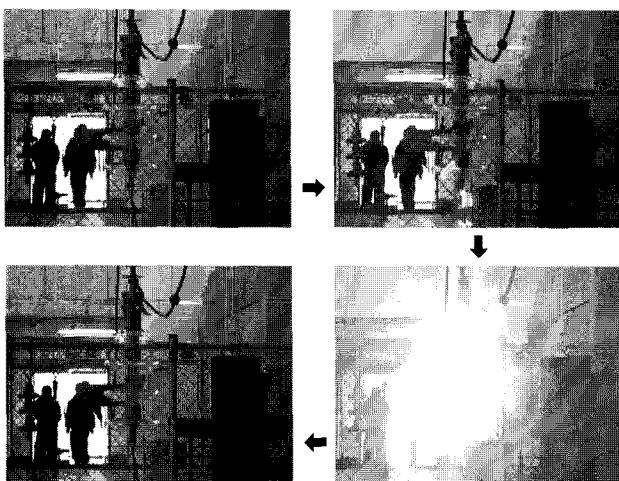


그림 14 충격전압에 의한 절연파괴

Fig. 14 Electrical breakdown by impulse voltage

건조상태에서의 모든 시험이 종료된 후 장간유리애자의 표면상태를 관찰하였으며, 이를 그림 15에 나타내었다.

그림 15에 보인 바와 같이, 모든 시험이 종료된 후 장간유리애자의 표면상태를 관찰한 결과, 장간유리애자의 표면에는 누렇게 변색된 연면방전 흔적이 애자 표면의 주물선과는 무관하게 남아 있었다. 이는 트래킹에 의한 탄화가 주로 주물선을 따라 형성되는 것과는 분명 다른 결과로서, 절연파괴에 이르기까지의 전압상승률이 비교적 크고 단시간에 진행하기 때문이라고 생각된다.

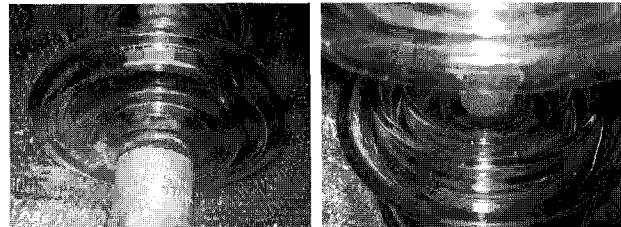


그림 15 건조상태에서 전기적 시험 후 관찰한 장간유리애자 표면

Fig. 15 Surface of toughened glass insulator observed after electrical test under dry condition

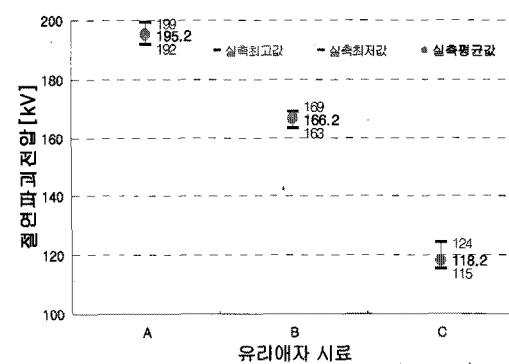


그림 16 장간유리애자 주수시 절연파괴전압

Fig. 16 Power frequency breakdown voltage of toughened glass insulator under wet condition

한편, 건조한 상태에서의 시험이 종료된 후, 상용주파전압에 의한 주수시의 절연파괴전압을 측정하였으며, 이 결과를 그림 16에 나타내었다.

그림 16에 보인 바와 같이, 상용주파전압에 의한 장간유리애자의 주수시 절연파괴전압은 시료 A, 시료 B 및 시료 C에서 각각 195.2[kV], 166.2[kV] 및 118.2[kV]로 측정되었으며, 주수시험의 경우 별다른 보정 없이 측정값을 절연파괴전압으로 그대로 인정한다. 즉, 파손된 시료의 절연파괴전압은 건전시료의 약 60[%] 정도로서, 이는 건조사 건전시료에 대한 파손시료의 절연파괴전압 감소폭보다 증가한 것이다. 절연파괴의 양상 또한 건조사와 다르게 나타났으며, 건조사 상용주파전압에 의한 절연파괴는 단발성 절연파괴 양상을 띠는데 반해 주수시에는 절연파괴가 2~3회에 걸쳐 나타나는 등의 현상이 관찰되었다. 이는 장간유리애자의 젖은 표면을 연하는 경로가 누설전류로 인해 건조와 젖는 과정을 반복함으로 인해 발생하는 것으로서 건조사 절연파괴가 주로 각 shell의 말단을 잇는 기중절연파괴의 양상을 띠는데 반해 주수시 절연파괴는 누설전류의 경로가 각 shell의 rib상에도 형성되어 보다 길어지기 때문인 것으로 사료되었으며, 최종 방전 직전의 부분방전 발생과정에서 모든 shell의 표면에서 미약하나마 신틸레이션이 발생하는 것을 관찰함으로써 확인되었다. 한편, 절연파괴의 양상은 건조사와 유사하게 건전시료의 경우에는 장간유리애자의 shell을 잇는 기중방전이나 애자 상부로부터 3번째 애자를 경유하는 방전이 발생하며, 파손된 애자의 경우에는 파손된 애자를 경유하는 방전이 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 장간유리애자의 shell을

잇는 기중방전의 경우, 건조시의 시험에 비해 그림 17과 같이 장간유리애자 표면을 따라 진행하는 방전로의 길이가 증가하는 것을 알 수 있었으며, 이를 그림 18에 도해하였다.

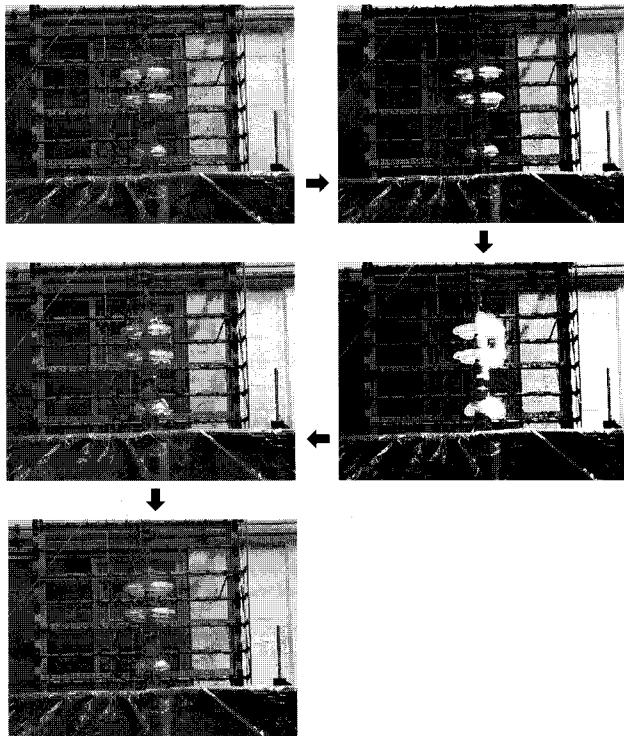
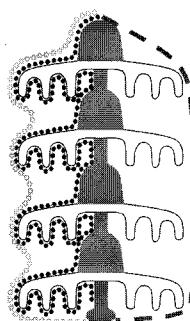


그림 17 상용주파전압에 의한 주수시 시료의 절연파괴

Fig. 17 Electrical breakdown of wet specimens by power frequency voltage



- 청색(soolid) : 약하게 젖은 상태에서의 전형적인 표면 누설 방전
- 자색(hollow) : 완전히 젖은 상태에서의 수직이나 수평에 의한 부분 또는 완전 교락
- 적색(파선) : 수직의 분사에 의한 기중방전 : 전압상승시 주수시험에서의 일반적 프로세스

그림 18 건조시 및 주수시 장간유리애자에 발생하는 절연파괴 양상 비교

Fig. 18 Comparison of electrical breakdown paths by wetting condition

지금까지 장간유리애자에 대한 전기적 절연파괴시험을 실시하여 얻은 결과를 토대로 장간유리애자 표면의 누설경로 및 연면방전 메카니즘을 정리하여 표 5에 나타내었다.

5. 결 론

본 논문은 불특정 원인에 의해 파손된 장간유리애자의 전기적 절연파괴 특성을 건전시료와 비교하여 분석하였다. 이

를 위해 건조시 및 주수시의 상용주파 절연파괴전압 및 50[%] 섬락전압을 측정하였으며, 절연파괴가 애자 표면상의 어떠한 경로를 통해 발생하는지 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 건조시 및 주수시에 실시한 상용주파 절연파괴전압은 건전한 장간유리애자가 파손된 애자에 비해 각각 1.3배 및 1.6배 정도 높은 값을 나타내었다. 이때 건전시료에서 발생하는 방전 초기의 스트리머는 대지로부터 시작되어 애자 상부를 향해 교락되었으며, 교락시에는 대부분 애자 shell의 말단을 잇는 기중 절연파괴의 형태를 나타내었으나, 상부 3 번째 애자까지를 제1경로로 하고 이 애자로부터 접지까지를 제2경로로 하는 형태의 절연파괴도 빈번히 관찰되었다. 또한, 주수시 상용주파전압을 이용한 절연파괴는 장간유리애자의 shell을 잇는 기중방전의 경우, 장간유리애자 표면을 따라 진행하는 방전로의 길이는 건조시의 시험에 비해 증가하는 것을 알 수 있었다. 파손된 장간유리애자의 경우에는 파손 부분을 경유하여 교락이 진행되었으며, 시험 후 작게 조각 난 포틀랜드 시멘트와 강화유리 파편이 관찰되었다.

(2) 건조시 50[%] 섬락전압은 건전시료의 경우 부극성이 정극성보다 1.2배 정도 높은 값을 나타내었으며, 파손된 장간유리애자의 경우에는 거의 비슷한 값을 나타내었다. 또한, 상용주파전압에 의한 절연파괴시와 마찬가지로 접지측으로부터 발달한 스트리머에 의해 기중절연이 파괴되어 교락되는 것을 알 수 있었다.

(3) 모든 시험이 종료된 후 장간유리애자의 표면상태를 관찰한 결과, 방전로가 장간유리애자의 표면에 부분적으로 누렇게 탄화된 흔적이 애자 표면의 주물선과는 무관하게 남아 있었다.

(4) 고속전차선로에서 절연과 지지물의 기능을 담당하는 장간유리애자의 경우, 건전한 시료라면 전기적 절연파괴에 의해 소손되지 않을 가능성이 크며, 일단 어떠한 원인에 의해 장간유리애자가 파손되었을 경우, 이 애자의 절연파괴전압을 초과하는 전압 인가시 파손된 부위가 확대될 가능성이 있을 것으로 사료된다.

마지막으로, 장간유리애자는 주절연재의 물리적 특성상 “열화상태”나 “부분적인 파손”이 없이 “건전상태”를 유지하거나 “파손상태”로만 판정되는 특성을 지니므로, 열화가 서서히 진행되는 자기애자나 폴리머애자와는 달리 원거리에서 육안으로 건전성 여부를 쉽게 판정하기 위한 용도로 매우 적합하므로, 국내의 경우 주로 전차선로에 채용되며, 케이블 카의 삭도 등에도 가끔 사용되고 있다. 본 연구에서는 유리애자의 규격이 자기애자의 규격과 완전히 일치하지 않는 관계로 두 대상을 비교하여 설명하지는 않았지만, 실험 결과 주절연재의 절연파괴전압은 어느 정도 유사하다는 것을 자기애자의 절연파괴전압을 언급한 기존 문헌과 비교하여 확인하였으며[6], 실험 결과로부터 알 수 있었듯이 향후에는 각 shell에서의 전계집중과 크기를 해석하여 장간유리애자의 형상설계에 반영할 필요가 있을 것으로 사료된다.

표 5 누설전류 경로 및 연면방전 메카니즘

Table 5 Leakage current path and surface flashover mechanism

	애자상 오염물 누적 → 오염 누적물 젖음 → “건조대” 형성 → 연면방전 진전 →	연면방전 결과			
		애자련 내아크	애자련 섬락		
도해					
진행과정	<ul style="list-style-type: none"> 오염입자가 바람에 날려 애자 표면에 부착·누적 대기중 수분이 누적물을 서서히 적설 도전성 오염누적물을 누설전류 야기 	<ul style="list-style-type: none"> 누설전류밀도가 높은 shell에서 가열로 인해 수분 증발 애자된 균처 표면상 “건조대” 형성 빈발 	<ul style="list-style-type: none"> 누설전류는 “건조대”에 의해 제한 표면아크는 “건조대” 교락 아크길이 증감 	<ul style="list-style-type: none"> 아크는 관찰되나 길이증가 없음 수분이나 도전성 누적물이 제거되면 아크 소멸 	<ul style="list-style-type: none"> 진전된 아크에 의한 애자 상·하부 교락
진행 메카니즘	<ul style="list-style-type: none"> 애자에 의해 기류 분산 입자는 rib와 cap 후방 공간에 누적 	<ul style="list-style-type: none"> 젖는 동안 시간에 따라 도전률과 전류는 순간적으로 증가하지만, 청소효과로 인해 바로 감소. 누적을 네 불용성 재료는 모세관 현상으로 인해 물을 흡수하여 애자 표면은 젖음상태 유지. 	<ul style="list-style-type: none"> 애자 표면상의 전압분포는 “건조대”的 존재에 의해 결정 대부분의 전압이 “건조대”에 인가 	<ul style="list-style-type: none"> 전압은 “건조대”를 관통하여 아크 유발 젖은 오염층의 저항은 아크와 직렬, 따라서 아크 전류 제어 더 젖으면 오염층의 저항 감소 누설전류의 증가 발생, 아크길이 증가 	<ul style="list-style-type: none"> 모든 가용염분이 용해되어 있더라도 애자의 누설거리는 충분히 길며, 미소전류의 증가가 아크길이의 엄청난 증가로 이어지기 때문에 임계전류 미만으로 누설전류 제한 젖은 오염물 경로의 도전성 증가 및 불충분한 누설거리로 인해 전류가 임계전류까지 증가 이같은 조건에서는 시스템 불안정화로 인해 전체 애자가 아크에 의해 완전히 교락
절연파괴 기여인자	<ul style="list-style-type: none"> 애자 형상(I면, V면, 일단) 바람 관련 애자 설치방향 및 지표상 높이 구조물의 차단효과 rib와 rib 공간이 있거나 없는 애자 shell 형상은 누적을 억제하고 청소나 바람 통과를 용이하게 함 	<ul style="list-style-type: none"> 오염누적물 내 용해 염분의 양 오염누적물 내 불용성 물질의 양 시간 물질의 발수성 	<ul style="list-style-type: none"> 젖은 오염표면의 저항값 누설거리는 누설전류 제한 	<ul style="list-style-type: none"> 애자련의 적절한 누설거리 적절한 형상의 절연 shell 	<ul style="list-style-type: none"> 애자련의 부적절한 누설거리 부적절한 형상의 절연 shell

감사의 글

본 연구는 한국철도공사의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 현

- [1] 이인숙, 한국의 고대유리, 창문, 1993.
- [2] 김병호, 유리공학, 청문각, 2000. 1.
- [3] LG화학, Worldwide Data Service 유리판[On-Line]. Available: <http://lghighsash.com/info03.htm>
- [4] J.S.T. Looms, Insulators for High Voltages, Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, p.12, 1990.
- [5] 정성계, 이덕출, 고전압공학, 문운당, pp.70-74, 1991. 1.
- [6] J.S.T. Looms, Insulators for High Voltages, Peter Peregrinus Ltd., pp.170-188, 1990.
- [7] I.J.S. Lopes, S.H. Jayaram, E.A. Cherney, "A study

of partial discharges from water droplets on a siliconerubber insulating surface", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.8, pp.262-268, 2001. 4.

- [8] E Thalassinakis, "Measurements and interpretations concerning leakage currents on polluted high voltage insulators", Meas. Sci. Technol., Vol.14, pp.421-426, 2003.
- [9] B. SubbaReddy, G.R. Nagabhushana, "Study of Leakage Current Behaviour on Artificially Polluted Surface of Ceramic Insulator", Plasma Science & technology, 2003.
- [10] Y. Yamashita, S. Anami, N. Otsubo, M. Honda, C. Hashimoto, "Corona discharge phenomenon and behavior of water droplets on the surface of polymer in the AC electric field", ICPADM 2003, Vol.2, pp.638-641, 2003. 6.
- [11] M.A.B. Sidik, H. Ahmad, S.S. Ahmed, Z.A. Malek, M.I. Jambak, "A Novel Method of Selecting Reusable Aged Glass Insulator", ICECE 2002, pp.243-245, 2002. 12.

저자 소개



정종우 (鄭鍾旭)

1969년 2월 17일생. 1992년 송실대학교 전기공학과 졸업(학사). 1997년/2003년 동대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원

Tel : 031-580-3063

Fax : 031-580-3111

E-mail : jung@seoul.korea.com



정진수 (鄭鎭洙)

1976년 9월 12일생. 2003년 2월 명지대학교 전기공학과 졸업(학사). 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동대학원 전기공학과 박사과정. 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 설비안전연구그룹 연구원

Tel : 031-580-3067

Fax : 031-580-3111

E-mail : mirmir0822@hanmail.net



김영석 (金榮錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 2월 경상대학교 전기공학과 졸업. 1999년/2004년 동대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2001년~2002년 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원. 2003년~현재 전기안전연구원 설비안전연구그룹 연구원

Tel : 031-580-3064

Fax : 031-580-3111

E-mail : athens9@naver.com