雷 임펄스를 利用한 懸垂碍子의 內部缺陷 檢出

(The Inner Defect Detection of Suspension Insulators by Lightning Impulse)

宋一根* · 郭熙魯**
(Il-Keun Song · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 논문에서는 자기제 현수애자 내부의 미세한 결함에 의한 관통사고 원인과 예방책을 제시하고자 PD(Partial Discharge)실험에 사용된 자기제 현수애자의 전계강도를 분석하였고, 상용주파 유중파괴 시험과 급준파 전압시험을 비교, 시험하였다. 이중 불량된 시료는 SEM(Scanning Electron Microscope)을 사용해서 단면촬영과 소재의 특성을 분석하였으며, 이종 물질간의 열팽창계수 차이로 인한 사고 진전 가능성이 큰 자기부와 금구류의 접착재로 사용하고 있는 포틀랜드 시멘트에 대하여 오토클래브 팽창도를 시험하였고, 사고 예방을 위한 내부결함 평가방법을 제시하였다.

Abstract

This paper analyzed the electrical field strength of porcelain suspension insulator used various testing methods in order to present the causes and countermeasure for the puncture failure by the inner minute defect. A power frequency puncture test and a steep-front-of-wave flashover voltage test were conducted.

The failed specimen of these samples was analyzed material characteric observed the cross-sectional picture by the scanning electron microscope, and tested the autoclave expansion for the portland cement using the metal bond agent. The porcelain maked a progress the failure by the thermal expansion coefficient of the different material. The inner detecting technique on behalf of the puncture failure protection is presented such as the steep-front-of-wave flashover voltage test.

1. 서론

자기제 현수애자에 대한 기본적인 원리는 1909년 경에 확립되어 배전선로에 보급되었다. 이후 가공선의 신뢰성은 자기제 현수애자의 관통사고와 파손사고 등 전기적, 기계적 성능에 크게 영향을 받게 되었다. [1] 따라서 1970년대 선진 전력회사들은 자기제 현수애자의 품질 향상에 관

*正會員 : 電力硏究院 電力硏究室
**正會員 : 崇實大 工大 電氣工學科 敎授

하여 크게 관심을 갖게 되었으며, 1980년대에 배전선로의 뇌사고 증가와 함께 국내에서도 자기제 현수애자의 품질에 관하여 관심을 갖게 되었다.

자기제 현수애자의 사고는 애자의 내부결함에 의한 관통사고(puncture failure)가 주종을 이루고 있으며, 이러한 성능평가를 검사하는 방법으로써 상용주파 유중파괴시험을 적용하여 왔다.[2] 이 시험은 장기간 사용중인 애자의 절연내력을 검증하기 위한 시험이며, 특히 애자에 사용하는 절연재료의 전기적 파괴강도를 검증하는 시험이다. 또한 전기적으로 애자의 성능을 평가할 목적으로 고주파 전압(200[kHz], 3~5[sec]인가)을 인가하여 애자의 내부결함을 검출하고 있다. 그러나 실 선로에서 자기제 현수애자의 절연내력을 크게 약화시키는 요인은 뇌서어지 전압이므로 뇌 과전압을 자기제 현수애자에 인가하여 절연내력을 평가하는 것이 타당하다는 주장이 제기되어 왔으며[3], 최근 IEC, JIS등에서는 "급준뇌 임펄스 전압시험법" 제정을 검토해 오고 있다.[4~6]

특히 우리나라의 현수애자 사고는 대부분 내부 절연 파괴로 나타나 내부의 미세한 결함을 검출할 수 있는 시험 방안이 강력히 대두되고 있다.[2, 10, 11]

따라서 본 논문에서는 자기제 현수애자 내부의 미세한 결함에 의한 관통사고 원인과 예방책을 제시하고자 PD(Partial Discharge)실험에 사용된 자기제 현수애자의 전계강도를 분석하였고,[11~12] 상용주파 유중파괴 시험과 뇌임펄스 전압을 비교, 검토하였다. 이중 불량된 시료는 SEM (Scanning Electron Microscope)을 사용해서 단면촬영과 소재의 특성을 분석하였으며, 이종 물질간에 사고진전 가능성이 큰 자기부와 금구류의 접착제로 사용하고 있는 포틀랜드 시멘트에 대하여 오토클래브 팽창도를 시험하였고,[7~10] 사고 예방을 위한 내부결함 검출 방법을 제시하였다.

2. 현수애자의 섬락특성

우리나라의 애자사고는 내부 절연파괴가 주종을 이루고 있으며, 최근 1년동안 발생한 애자사고를 분석해 보면 CAP부에 구멍이 발생하는 유형이 1순위로 58.9[%]를 차지하였으며, CAP과 자기분리 사고가 9.2[%]를 차지하여 총 68.1[%]가 내부 절연파괴 사고로 판명되었다. 이러한 관통사고의 원인을 찾아내서 미세한 결함도 검출할 수 있는 시험방법을 강구하여 애자사고를 미연에 예방하여야 할 필요성이 요구되고 있다.

현수애자의 불량 부위 분포는 그림 1과 같다.

송·배전선에 사용되고 있는 현수애자는 자기부분의 두께가 기중 절연거리에 비하여 얇기 때문에 대단히 높은 전압이 인가되면 자기부에서 관통파괴를 일으킨다. 실선로에서 현수애자에 인가되는 과전압은 뇌서어지 전압이 대부분이기 때문에 IEC, JIS, ESB 등의 현수애자 시험규격에는 자기부 품질확인의 한 방법으로 상용주파 유중파괴 전압시험을 적용하여 왔으나, 급준뇌임펄스 전압에 대하여 시험해야 할 필요성이 대두되고 있다.

전압의 준도는 콘덴서 C의 충전전압, 부하저항 R의 크기를 변화시켜 조정하였으며, 저준도 영역에서는 파두재단 갭 G을 단락하여 각종 섬락전압에 대한 V-t특성을 측정하였다.

외부 섬락의 V-t특성에 있어서 애자 연면 섬락전압 V_f와 섬락이 발생할때 까지의 t_f와의 관계는 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$V_f = \frac{A}{t_f^{n}} \qquad (1)$$

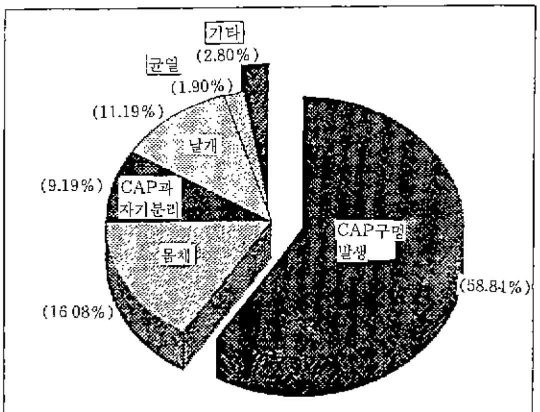


그림 1 현수애자의 불량부위 분포도
Fig 1 Badness part distribution of suspension insulator

A : 애자형상에 의해서 결정된 계수
V_F : 연면 섬락전압[kV]
t_f : 섬락이 발생할때 까지의 시간[μs]
n : 빈도수[회]

식 (1)에서와 같이 현수애자의 뇌임펄스 전압에 의한 섬락경로는 애자 전극간의 내부 최단거리가 아니라 애자 연면에서 발생하도록 설계되어야 하며, 이때 표면 누설거리를 파라메타로서 표시하는 것은 절연내력과 밀접한 관계가 있기 때문이다. 따라서 계수 A의 값은 표면 누설거리 L의 계수로서 식 (2)로 표시된다.

$$A = \frac{K}{L^m} \qquad (2)$$

여기서 K, m : 정수
L : 표면 누설거리[mm]

이상의 관계를 표시하면 식 (3)과 같다.

$$V_F \cdot t_f^{0.5} = \sqrt{45L} \qquad (3)$$

애자 연면의 섬락전압 V_F와 전압준도 $\frac{V_F}{t_f}$ 와의 관계는 식 (4)와 같이 된다.

$$V_F = \sqrt[3]{45L\left(\frac{V_F}{t_f}\right)} \qquad (4)$$

3. 실험장치 및 실험방법

자기제 애자의 내부결함은 소재, 소성, 공정관리 등 여러가지 원인들이 산재해 있으며, 다양한 애자시험 등에 의해서 내부 결함들을 검출하여 왔다. 그러나 실선로의 현수애자에는 뇌서어지 전압이 주로 인가되기 때문에 뇌서어지에 상응하는 급준파 전압시험의 필요성이 인식되어 오던 중 우리나라에서도 관통사고가 급증하는 애자사고가 발생하였다.

급준뇌 임펄스 전압시험법의 중요한 시험조건인 전압준도는 일반적으로 2,500[kV/μs]를 규정으로 하고 있으며 IEC에서도 이 값을 기초로 검토되고 있다. 급준뇌 임펄스 전압파형은 시험용 애자에 접속된 고압측 리드선과 접지선의 인덕턴스 및 정전용량에 따라 영향을 받게 된다. 또한 선구방전(prebreakdown)에 의하여 급준뇌 임펄스 전압이 저하할 수 있다.

선구방전 현상을 작게 하기 위해서는 용량이 큰 전원을 사용하고, 고압측 리드선은 외경 25[mm] 이상의 파이프를 사용하도록 규정되어 있다.

현수애자의 급준뇌 임펄스 전압시험 시료 배치도는 그림 2에 나타내었다. 시료배치 및 분압기 등의 특성은 IEC(안)를 표준으로 하였다.[2)]

본 연구에서는 관통사고의 원인과 대책을 제시하고자 IVG(Impluse Voltage Generator)를 이용한 뇌 임펄스시험으로 내부의 미소결함을 검출하였다.

급준파 전압의 전압준도는 각 국에서 사용하고 있는 2,500[kV/μs]로 시험하였고, 임펄스 전압 발생기, 표준 구갭, 분압기 및 측정용 시료로 구성하였으며, 회로도는 그림 3과 같다.

급준파의 파형은 표준 구갭을 설정하고 IEC의 권고(안)을 기초로 시험용애자에 접속된 고압측 리드선과 접지선의 인덕턴스 및 정전용량을 조정하여 표준 임펄스 파형을 인가하고 또한 정극성, 부극성 전압을 각각 인가하여 극성에 따른 섬락전압의 차이를 관측하였다. 인가된 전압은 분압

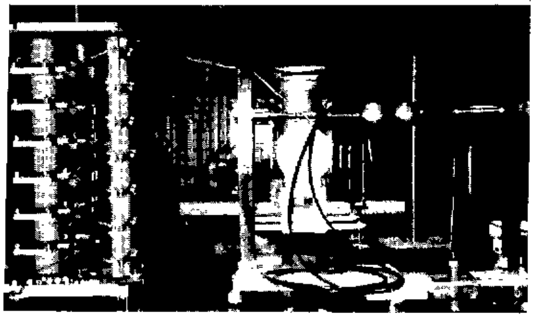


그림 2 시료 배치도
Fig 2 Layout of sample

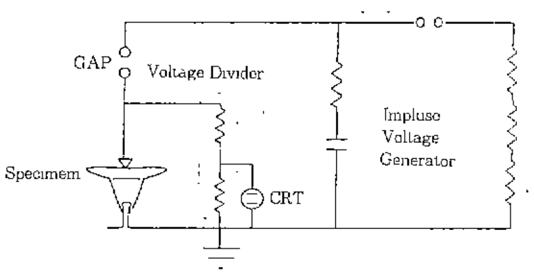


그림 3. 급준파 전압시험 회로도
Fig 3 Circuit diagram of steep front voltage test

기를 이용하여 오실로스코프로 파형을 관측하였다.

측정용 시료는 배전계통에 사용중인 191[mm] 현수애자로서 누설거리가 210[mm]이고 뇌충격 섬락전압이 115[kV]인 자기제 애자를 국내 2개사 제품의 시료와 외국산 제품 1종류의 시료를 비교, 시험하였다. 시험용 시료는 유중파괴 섬락전압시험과 비교하기 위하여 유중파괴 시험에 합격한 제품(각 시료별 30개씩 총 90개)을 선택해서 실시하였다. 급준파 전압시험은 ESB(한국전력 표준규격) 잠정(안)으로 실험하였고, 충격횟수는 정극성 10회, 부극성 10회로 하였다. 파두의 준도는 30[%] 지점에서부터 90[%]지점까지의 직진도를 나타내었다. 급준파 시험은 유중파괴를 시험한 총 90개의 시료 중 50개의 시료에 대하여 실시해 본 결과 국내 시험용 시료 중 1개만이 내부 관통사고로 진전되었으며, 그 제품에 대한 불량원인을 집중적으로 분석하였다.

특히 제품의 소재특성과 내부단면의 절단을 통해서 자기부와 금구류의 접착제로 사용하고 있는 포틀랜드 시멘트의 오토크래브 팽창도시험을 실시하였으며, SEM을 사용하여 소재의 단면을 촬영하였다.

4. 실험결과 및 고찰

IVG를 이용하여 시료에 급준파 전압을 인가한

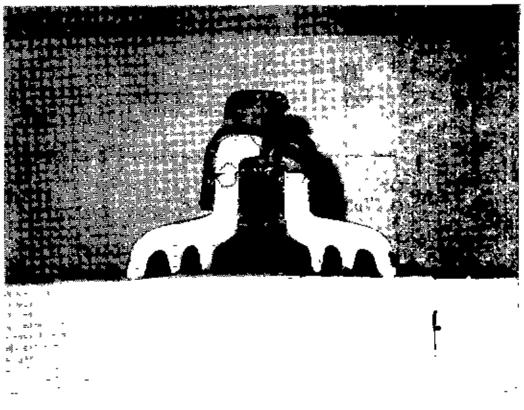


그림 4 파손된 애자의 단면 사진
Fig 4. Cross sectional picture of broken insulator

경우, 내부절연이 외부절연보다 약할 때에는 결국에 가서는 관통사고로 진전되는 것으로 나타났다. 급준파 전압시험에서 불합격된 시료의 절연을 측정해 본 결과 실측 파형대로 내부 통전이 이루어져 있음을 관찰할 수 있었다.

전압파형의 왜형은 소재성분 배합과 소성시 원인을 들 수 있고, 자기부와 금구류의 접착제로 사용한 포틀랜드 시멘트의 입도 크기와 열팽창 차이로 인한 경년열화 진전과 부분파괴부의 영향에 의한 것으로 추정되며, 부분파괴가 발생하면 전계집중이 커져서 다음 전압 인가시 관통사고로 진전되는 것으로 추정할 수 있다.

4.1 급준파 전압시험

급준파 전압시험은 50개의 애자를 IVG 설비로 시험하였다. 이중 1개의 시료가 불합격 되어 절연 측정 후 단면을 절단하여 분석하였다. 내부 관통은 급준파 전압 인가 3회 이전에 초기적 관통이 많이 발생되는 것으로 보고되었으나[3], 본 시료는 1회 인가 후 2회째 완전히 통전되었다. 이때 파손된 애자의 단면과 전압파형의 왜형은 그림 4, 그림 5와 같다. 전압 파형의 원인은 제조시 내부의 기공이 존재하거나 외부의 서어지성 전압에 비하여 내부절연이 떨어지는 것으로 추측되며, 왜형파는 약 1,300[kV/μs]일때 내부절연이 파괴되어 관통되었다.

65kV/div 200ns/div 시료 No 1−1

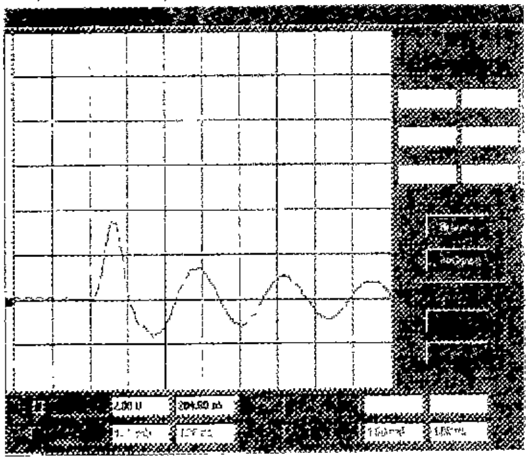


그림 5. 전압파형의 왜형
Fig. 5 Distortion of voltage waveform

파손된 애자의 단면 사진을 관찰하여 보면 자기부와 금구류의 접착제로 사용한 포틀랜드 시멘트의 소성 밀도가 조밀하지 못하고, 굴곡부의 미세한 크랙으로 인하여 전계강도가 전극부위에 집중되므로 계속되는 급준파 전압의 인가로 인하여 부분파괴가 일어난 것으로 추정할 수 있다.

표준 구갭을 설정하여 단락 후 정, 부극성 급준파 전압을 각각 10회씩 인가하여 애자표면의 연면 섬락전압을 구하였으며, 재단 전압 2,500 [kV/μs]인가시의 정극성 파형은 그림 6과 같이 나타났다.

또한 부분파괴는 애자 자기 두부의 샌드(돌기)부위의 전계집중에 기인한 것으로 추정할 수 있다.

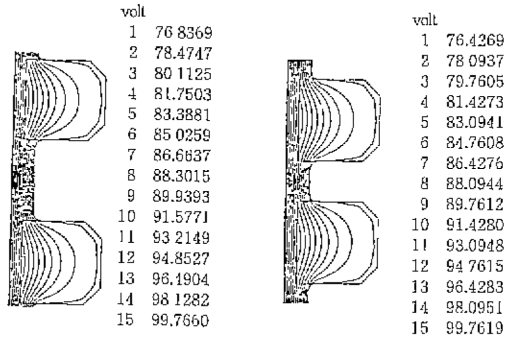
그림 7은 샌드를 모델화(동축 원통모델)하여 전계해석한 것이다. 최대 전계부위는 그림 4와 같이 부분파괴 발생부위와 일치하였고, 전극계면의 곡률 반경 R의 크기와 샌드간격 D의 영향을 받는 것으로 확인되었다.[9~11] 이때 전계 계산 결과는 표 1과 같다.

한편 191[mm]현수애자의 해석모델은 2개의 애자가 연결되어 있는 경우이며, 전선이 접촉하는 밑면의 볼핀(ball pin)에 100[V], 전주에 연결되는 볼캡(ball Cap)을 0[V]로 하는 고정 경계조건으로 하고, 중간 연결부위의 금속부분은 부동 경계조건(floating boundary)으로, 나머지 부분은 자연 경계조건(newmann boundary)으로 하여 해석하였다.

계산된 현수애자의 등전위선도를 볼 때 볼핀과 스프리트핀(Split pin)사이에 가장 큰 전계가 가해짐을 알 수 있고, 볼캡과 자기제가 접하는 끝부분에도 상당히 큰 전계가 가해짐을 알 수 있다. 그림 8은 191[mm]애자의 전계강도를 해석한 것으로 전극과 시멘트와의 접속부위에서 전계값

표 1. 전계 계산 결과
Table 1 Electrical field results

샌드간격D[mm]	1.0			0.75			0.50	0.25
곡률 반경R[mm]	0.1	0.25	0.5	0.1	0.25	0.3	0.1	0.1
최대전계[kV/mm]	111.9	83.2	94.6	114.9	84.6	102.3	117.7	122.2



(a) D=1.0mm (b) D=0.5mm

그림 7. 곡률반경 R의 크기와 전계분포
Fig. 7. Magnitude of curvature radius R and electrical field distribution

그림 8 191[mm]현수애자의 전계강도 해석
Fig 8 Electrical field strength analysis of 191[mm]insulator

65kV/div 200ns/div 시료 No 2−10

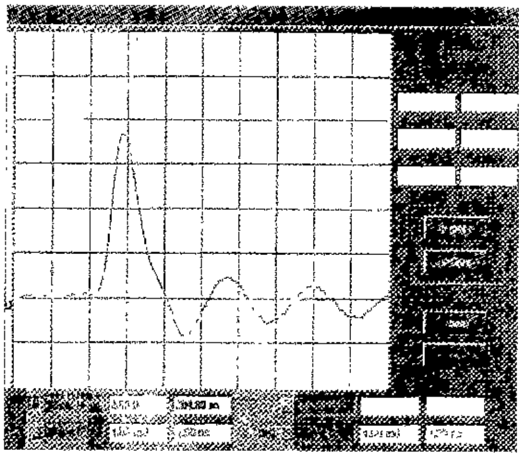


그림 6. 정극성에 대한 섬락전압 파형
Fig 6. Waveform of voltage at the moment of breakdown for positive

이 13.40[㎸/㎜]로 계산되었다(인가전압 100[V]기준). 만일 대지간 계통전압이 13.20[㎸]인 경우에는 전계강도가 1.77[㎸/㎜]가 됨을 알 수 있다. 대부분 부분파괴 부위나 내부 절연 관통사고 부위도 이 부분으로 확인되었다.

이상의 해석 결과와 내부절연 파괴가 일치하므로 전극 주위의 스트레스완화 설계기법과 제조공정에 더 많은 노력이 필요하며, 전계완화를 위한 연구가 더욱 요망된다.

4.2 자기의 특성분석

자기는 점토 또는 점토와 유사한 무기물질을 가소성 상태로 성형 건조하고, 다음에 유리상을 생성하여 융화하는데 충분한 고온도로 소성한 것이다. 자기의 물리, 화학특성은 주로 그 미세구조 조직을 구성하고 있는 결정상 및 유리상의 종류와 양에 의해서 결정된다. 특히 절연성이 좋을 뿐만 아니라 다른 재료에 비교하여 내후성, 내열성이 우수한 점, 내수성, 내화학 약품성도 있는 점, 기계적 하중에 대하여 형상의 변화가 적은 점, 가격도 비교적 저렴한 점과 같은 특징이 있다. 그러나 충격하중에 대하여 약하며, 소성후의 가공성이 부족한 점이 큰 단점이다.

자기 재질의 시험법으로서는 독일의 VDE 0355, 미국의 ASTM, 영국의 BS1598이 잘 알려져 있다. 한편 애자용 자기재질로서 구비해야 할 표준적인 특성범위를 표시한 규격은 독일의 DIN40685가 있으며, 현재 IEC에서도 규격화가 검토되고 있다.

본 연구에서는 애자용 특성시험이 세분화되고 가장 가혹한 시험방법인 VDE0355를 기준으로 하였으며, 관통사고가 난 제조회사의 동일년도 제품과 타사제품과의 자기특성 시험 분석치는 표 2와 같고, 화학성분은 EDX(Energy Dispersive X-ray)를 이용하여 분석하였다. 이 때 사용한 EDX는 VG사 제품으로 공간분해능 150[Å], 배율 30만배의 기능을 갖고 있으며, 정성, 정량분석을 동일 챔버내에서 할 수 있도록 되어 있다. 화학성분 분석치는 그림 9와 같고, 알루미늄과 규소가 대부분을 차지하며, 미량 원소로 철분과 칼슘이 존재하고 있다.

통상 세라믹은 알루미늄 성분의 함유량이 커질수록 경량화되고, 열전도율이 낮을 수록 절연성능이 우수하며 강도가 커진다. 또한 규소 성분이 커질수록 내마모성이 향상되는 특징을 가지고 있다. 한편 온도를 상승시키면서 전기적 특성시험을 해 본 결과 비유전율 값이 온도상승에 비례해서 증가되는 현상이 나타나며 유전 손실율이 다소 큰 것을 알 수 있다. 특히 온도상승이 커짐에

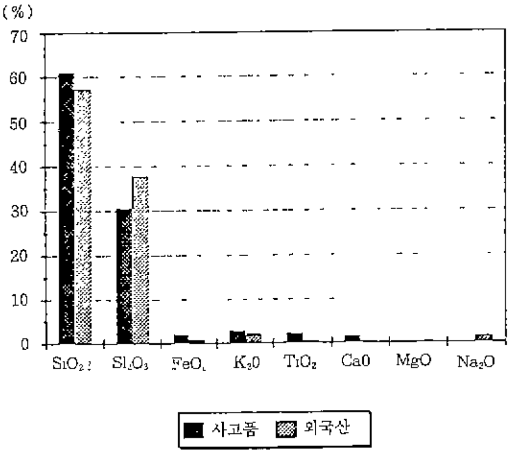


그림 9 화학성분 분석치
Fig 9 Analysis value of chemical component

표 2 자기 특성시험의 분석치
Table 2 Analysis value of the porcelain characteristic test

구분	절연내력 (50~60Hz)	유전율(20℃), (50~60Hz)	하중강도 (kg/㎠)	기공누적분포율(300Å, 30Å)	열팽창계수 (*10⁻⁶/℃) 20~100℃	열팽창계수 (*10⁻⁶/℃) 20~800℃
DIN 40685 VDE 0355 ASTM	30㎸/㎜	6~7	600~700	—, —	3~6	4~7
사고품	30㎸/㎜	6.56	766	97.72%. 100%	5.46	6.41
외국산	30㎸/㎜	5.64	733	85.2%, 96.7%	4.59	5.65

따라 손실율이 급속히 커지는 것을 발견할 수 있으며, 주위 온도가 급격히 상승할 때는 자기부, 금구류부 및 시멘트부의 열팽창 차이로 인한 부분파괴가 발생할 가능성이 있음을 확인하였다. 이때 온도상승에 따른 전기적 특성시험 결과는 표 3과 같다.

이상과 같이 기계적, 전기적 물성은 애자를 구성하는 미세 결정구조에 의해서 결정된다고 할 수 있으며, 본 연구에서는 SEM에 의한 표면을 분석하였다. 사고품의 애자를 배율 1,000배로 확대하여 미세구조 조직을 그림 10과 같이 측정하여 본 결과 기공(void)이 다량 검출되었으며, 상당히 불균일하게 분포됨을 알 수 있다. 이런 원인으로서는 재료 가공시 균일도가 떨어지고 급속 소성으로 인한 것으로 추정되며, 기계적, 전기적 특성변화의 원인이 되어 결국에는 부분파괴의 원인이 된 것으로 사료된다.

4.3 포틀랜드 시멘트의 오토클래브 팽창도시험

자기제 애자의 기계적 강도는 경년에 따라 정격강도의 33[%]에서 90[%]까지 감소되는 것으로 카나다 O.H사의 시험결과 보고된 바 있다.[1] 그 당시 신품 현수애자의 약 50[%]가 결함이 있는 것으로 발견되었고, 이들 중 일부는 전기적 고장이 뇌 관통의 결과이거나 자기 유전체의 결함에 의한 것으로 조사되었다. 특히 애자 조립시에 사용되는 포틀랜드 시멘트의 팽창과 수축에 의해서 애자사고의 잠재적 결함이 존재하게 되며, 또한 포틀랜드 시멘트는 자기 표면의 균열에 영향을 주는 것이 실증시험 결과 밝혀졌다.[1, 2] 자기 시멘트의 입방체 시험으로부터 시멘트가 팽창보다는 오히려 수축에 의한 영향이 큰 것으로 보고되고 있으며, 자기 애자는 시멘트 팽창에 의한 응축시 스트레스를 받기 때문에 설계시 자기부, 시멘트 및 금구류 부분의 열팽창계수 차이로 인한 사고 요인이 항상 존재되고 있다.[2, 10] 때문에 포틀랜드 시멘트의 오토클래브 팽창도 제한은 부분파괴로 진전할 수 있는 가능성을 사전에 제거하는 요소가 된다. 국내 시험용 시료와 외국의 시험용 시료를 비교 시험해 본 결과는 표 4와 같다.

이상의 실험 결과치와 같이 사고가 난 A시료는 오토클래브 팽창도가 0.31～0.37[%]로 나타났으며 사고가 없었던 B, C 시료들은 0.1[%]이하로 나타났다. 단순히 오토클래브 팽창도 시험 결과치만 가지고 관통사고로 진전된다고 할 수 없으나, 일부는 크랙사고의 원인으로 발전되고, 일부는 관통사고로도 진전될 수 있다고 사료된

표 3 온도상승에 따른 전기적 특성시험
Table 3. Electrical characteristic test with variation of temperature

온도	t (mm)	ϕ (mm)	C (PF)	ε_r	$\tan\delta$ 10^{-3}	비고
25℃	2.02	50	1.713	6.60	48.6	
50℃	2.02	50	1.633	6.99	81.81	
100℃	2.02	50	1.118	10.20	529	

그림 10 불량애자의 SEM 사진(배율 1000배)
Fig. 10 SEM picture of badness insulator(magnification 1000)

표 4 포틀랜드 시멘트의 오토크레브 팽창도 시험 결과치
table 4 The autoclave expansion test results of portland cement

ESB 규격	외국의 규격	실측정치	비 고
o KSL 5201 : 0.8% 이하	o CNA/CSA : 0.12% 미만	o A시료 : 0.31～0.37%	
o KSL 5107 : 팽창도 시험	o AS 2947.1 : 0.12% 미만	o B시료 : 0.1% 이하	
※ KSL과 동일하게 시험함	o NGK회사규격 : 0.12% 미만	o C시료 : 0.1% 이하	

다.

따라서 애자의 잠재적 결함으로 내재할 수 있는 포틀랜드 시멘트의 오토클래브 팽창도 시험기준은 현재 0.8[%]이하를 0.12[%]미만으로 강화시켜서 이종 물질간의 열팽창 계수 차이로 인한 잠재적 사고를 사전에 예방하여야 한다.

7. 결 론

뇌 임펄스를 이용한 자기제 현수애자의 미세한 내부결함 검출에 관한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자기제의 미세 결함이 내부에 상존해 있는 완제품 애자는 IVG를 이용한 2,500[kV/μs]급 준파 전압시험으로 내부결함 검출이 가능함을 확인하였다.

2. 자기 특성을 분석한 결과에 의하면, 사고가 난 시료는 열팽창 계수가 크게 나타났으며, 특히 온도 상승에 따른 전기적 특성 변화에서 유전율과 유전정접은 급격히 증가하는 경향을 나타냈다.

3. 자기부, 금구류부의 접착제로 사용하는 포틀랜드 시멘트의 오토클래브 팽창도 시험규격은 0.8[%]이하를 0.12[%]미만으로 강화시켜서 잠재적 결함으로 존재하는 열팽창계수를 제한하여야 한다.

참 고 문 헌

1) E. A Cherney, "Cement growth failure of porcelain suspension Insulators," IEEE, Vol PAS-102, pp. 2765~2774, 1983 8
2) 박구범 외, "배전용 애자류 품질확보를 위한 경년시험방법에 관한 연구," 전력연구원, 1995, 9
3) "懸垂ガイシの急峻雷インパルス電壓特性," 日本ガイシ株式會社, pp.1~9, 1993 9
4) CIGRE TF 33 07 01 Report, "Puncture testing of ceramic and glass insulators," ELECTRA, No.136, pp 113~137, 1991
5. IEC doc 36B(S) 111, "Puncture test of insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V." 1991
6) IEC doc. 42(S)98, "High voltage testing technique, Part 2 : Measuring systems," April 1993
7) ANSI 151, "Method for autoclave expansion of portland cement," 1978
8) CAN/CSA-C411.1-M89, "AC suspension insulators," 1989
9) AS 2947.1-1989, "Insulators-Porcelain and glass for overhead power lines-voltage greater than 1000V a c, Part 1 : Test methods," 1989
10) 송일근 · 곽희로 외, "자기제 애자의 절연파괴 감소대책 연구," 대한전기 학회 pp 1042~1044, 1995, 7
11) I.K SONG, H R.KWAK, "Characterstic analysis of electric field for suspension insulator using an optimization technique with FEM," ISEM, U K ,1995
12) M. Abdel-salam and E K Stank, "Optimizing field stress on high voltage insulators," IEEE Trans, Electrical Insulation Vol 22, No 1, pp.47~56, 1987

◇ 著 者 紹 介 ◇

송 일 근(宋一根)

1961年 3月 3日生. 1984年 崇實大 工大 電氣工學科 卒. 1986年 同 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 現在 同 大學院 電氣工學科 博士課程, 電力研究院 電力研究室 勤務.

곽 희 로(郭熙魯)

1942年 3月 1日生. 1967年 서울工大 電氣工學科 卒. 1978年 호주 New South Wales 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1986年 中央大 大學院 電氣工學科 卒(博士). 1967年 韓電勤務. 1986年 美國 M.I.T Visiting Scientist. 現在. 崇實大 敎務處長, 電氣工學科 敎授, 當學會 副會長.