

400kN 송전용 자기애자의 재질에 따른 특성 연구

최인혁\*, 최장현\*, 정운환\*, 이동일\*, 정길조\*, 민병욱\*  
 한전 전력연구원\*, 한국전력공사\*

A study on properties of 400kN porcelain suspension insulator for transmission line by analyzing of raw materials.

In-Hyuk Choi\*, Jang-Hyun, Choi\*, Yoon-Hwan Jung\*, Dong-Il Lee\*, Gil-Jo Jung\*, Wook-Byeong Min\*\*  
 KEPRI\*, KEPCO\*\*

**Abstract** - In order to analyze the physical and chemical characteristics of the home production porcelain insulators by change of the alumina addition amount, 36000lbs ball socket type suspension insulators which were manufactured in 1989, 1995 and 2001 removed in transmission line and an experiment was performed. By the result, 8 [wt.%] alumina that influences the mechanical properties and arc resistance properties in case of insulators that were manufactured in 1989 was contained, and the relative density and the fracture toughness of insulators appeared by 94.2% and 1.4 [MPa·M<sup>1/2</sup>], respectively. However, 12 [wt.%] alumina was contained in case of insulators that were manufactured in 1995, and the relative density and the fracture toughness of insulators appeared preferably lower by 92% and 1.3 [MPa·M<sup>1/2</sup>], respectively. Amount of alumina was contained most by 17 [wt.%] in case of insulators that were manufactured in 2001. It was confirmed that the electrical and mechanical characteristics such as the relative density and the fracture toughness appeared excellently by 96% and 1.7 [MPa·m<sup>1/2</sup>], respectively.

1. 서 론

오늘 날 산업기술의 발달로 송전 용량의 증가로 전압 격상과 함께 수용자에게 신뢰성 높은 안정된 송전을 위한 연구가 다 각도로 진행되고 있다. 현재와 같은 초고압 대용량을 송전하는 선로에서의 사고는 과거보다도 더욱 심각한 피해를 가져올 수 있으므로 송전용 애자의 신뢰성은 매우 중요한 과제로 부각되고 있다. 특히 애자는 절연물로서 송전탑과 선로를 연결하는 동시에 전선을 지지하는 중요한 송전용 기자재로 점토, 장석, 도석, 그리고 alumina를 주원료로 이용하여 제조되고 있다.[1] 현재 송전용 애자의 주류할 이루는 자기 애자는 물과 원료를 배합하여 ball milling 후 성형이 용이하도록 수분을 제어하여 jiggering법으로 성형체를 건조하고 터널가마에서 1300℃의 고온에서 소결하여 자기를 제조한다. 이 자기와 금구를 시멘트로 결합하여 애자를 제조하고 있다. 송전선로의 고신뢰도를 유지하기 위하여 송전용 애자에 대하여 현재 ANSI C29.2나 IEC 60383-1에 따른 시험보다 더 가혹한 조건하에서 많은 시험들이 이루어지고 있으며 특히 '95년도부터 채택된 72 [kA·cycle]의 아크전류를 발생시켜 시험하는 내아크 시험은 애자의 시험 중 가장 가혹한 시험으로 순간적으로 수천도의 열충격에 애자가 견디어야 한다.

따라서 본 연구에서는 애자의 사고율과 구성소재의 성분이나 결정구조와의 상관성을 규명하기 위하여 애자에 사용된 주원료 중의 하나인 alumina의 첨가량 변화에 따른 애자의 물리적, 화학적 특성 변화를 조사하고 배합과 소결에 따른 애자의 불량원인을 분석함과 동시에 이를

토대로 기계적, 전기적 특성이 우수한 고신뢰성 애자를 생산하는 기술을 확보하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시료 채취 및 실험방법

자기에 첨가된 alumina 양의 변화에 맞추어 '89년도, '95년도, 2001년도에 제조한 36000lbs 볼소켓형 현수애자를 국내의 송전선로에서 철거하여 시료로 채취하였다. 각 해당 년도 애자에 함유된 alumina 첨가량은 '89년도 산은 8 wt.%, '95년도 12 wt.%, 2001년도 산은 17 wt.%로 확인되었다. 애자에 도포된 유약을 연마하여 제거한 자기의 일부분을 분쇄하여 분말로 만들어 philips사의 x-선 형광분석기(XRF)로 화학성분을 분석하였고 동일 분말로 philips사의 x-선 회절분석기(XRD)로 scanning speed를 2°/min으로 하여 결정상을 분석하였다. 자기의 미세구조를 분석하기 위하여 일부분을 잘라내어 마운팅한 후 표면을 연마하여 주사전자현미경(SEM : R. J. Lee사)으로 기공의 크기와 형태를 관찰하였고, 자기의 열팽창률을 가로×세로×높이가 0.5×0.5×5cm 인 시편을 제작하여 열팽창계수 측정기(Dilatometer : tokyo industrial company)로 650℃에서 측정하였다. 또한 소결 밀도는 ASTM C20에 따라 archimedes 방법을 이용하였고 경도 및 파괴인성을 측정하기 위해 시편을 15, 9, 6, 3, 1 [µm] 다이아몬드 페이스트에서 차례로 경면 연마한 후 경도(Hv)는 vickers 경도계(Mitutoyo, Japan)를 이용하여 하중 10kg, 유지시간 10sec에서 생긴 압흔으로 측정하였고, 파괴인성(K<sub>IC</sub>)은 압자압입법(ICL, Indentation Crack Length : 1360 Vickers indenter, Mitutoyo, Japan)으로 측정하였다[2]. 이 때 하중은 10kg, 유지시간은 10sec로 하였으며 다음의 식을 이용하여 경도와 파괴인성을 계산하였다.

$$H = \frac{F}{2a^2} \tag{1}$$

$$K_{IC} = 0.032HN \sqrt{a} \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \left(\frac{c}{a}\right)^{-2/3} \tag{2}$$

- F: Load
- a: Length in diagonal of vickers indent
- c: Crack length
- E: Young's modulus
- H: Hardness
- K<sub>IC</sub>: Fracture toughness

전기적 성질인 tanδ는 유전특성분석기 DEA-2970(TA instruments, USA)을 사용하여 실험하였고, 시편에 인가되는 전압은 5V이고, 진공 유리관내에서 외부 영향을 최소화할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 시편의 두께는 1~2mm로 정확한 두께는 자동으로 측정계산되며, 시편의 크기는 가로와 세로가 2~25cm인 사각형으로 주전극의 크기에 맞게 제작하여 실험하였다.

## 2.2 실험결과 및 분석

### 2.2.1 미세구조 분석

소결하는 과정에서 생성되는 기공의 크기 및 형태가 애자의 물리적 특성에 미치는 중요한 요소이기 때문에 주사전자현미경으로 미세조직을 관찰하였으며, '89년, '95년 및 2001년도 애자의 미세조직을 분석하였다. '89년도에 제조한 애자의 기공 수보다 2001년도에 제조한 애자의 기공 수가 현저하게 감소하고 있는 것을 주사 전자현미경으로 관찰한 결과 알 수 있었다. 즉 제조 기술의 발전으로 인하여 '89년 및 '95년에 생산한 애자 보다는 2001년도에 제조한 자기의 소결밀도가 높고, 이로 인하여 기계적 특성이 우수하리라 기대할 수 있다[3-5].

### 2.2.2 기계적 특성

'89년, '95년 및 2001년도에 제조한 애자의 상대밀도는 그림 1와 같이 나타났다. '95년도에 제조한 자기의 상대밀도는 다른 년도에 생산한 자기의 이론밀도보다 약 1~1.5% 낮은 것을 볼 수 있다. 반면에 2001년도에 제조한 자기의 상대밀도는 매우 높게 나타났다. 따라서 '95년도에 제조한 현수애자가 다른 제조년도에 비해 낮은 소결밀도로 인하여 기계적 및 전기적 특성이 낮으리라 생각된다. 이것은 애자의 성능시험에 내아크시험이 추가되면서 애자의 원료에 alumina 함유량을 증가시켜 내아크에 강한 자기를 제조하고자 하였으나 소결조건 등의 기술적인 문제로 인해 오히려 소결밀도가 약간 감소하는 경향을 보여주었다.

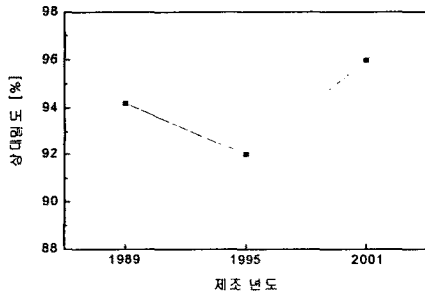


그림 1. 제조년도에 따른 자기의 상대밀도  
Fig. 1. Relative density of porcelain insulators

주사전자현미경으로 확인한 바 2001년도 자기의 기공 수보다 '95년도 제품의 기공 수가 현저히 많은 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 기계적 특성은 '95년도에 제작된 애자가 전반적으로 약 10%정도 낮은 것을 표 1에서 볼 수 있다.

표 1. 경도, 탄성율, 파괴인성 측정결과  
Table 1. Results of hardness, modulus of elasticity, and fracture toughness

제조년도	1989	1995	2001
절대밀도 [g/cm <sup>3</sup> ]	2.27	2.38	2.54
탄성율 [GPa]	81.6	73.9	96.2
경도(Hv) [GPa]	5.8	6.9	6.9
파괴인성(K <sub>1c</sub> ) [MPa · m <sup>1/2</sup> ]	1.4	1.3	1.7

### 2.2.3 화학성분

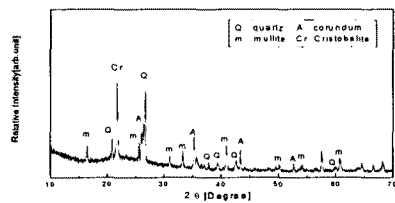
내 X-선 형광 분석기로 측정한 결과 자기의 기계적, 전기적 특성에 중요한 영향을 주는 실리카와 alumina의 양이 가장 많이 변화한 것을 확인할 수 있으며, SiO<sub>2</sub> 양은 68.45 [wt.%(89년)]에서 59.63 [wt.%(2001년)]로 점차 감소하였고 기계적 및 열 충격 특성을 향상시키는 alumina의 함유량은 증가하고 있다는 것을 볼 수 있었다.

표 2. X-선 형광분석기로 측정된 결과  
Table 2. X-ray fluorescence results of insulators

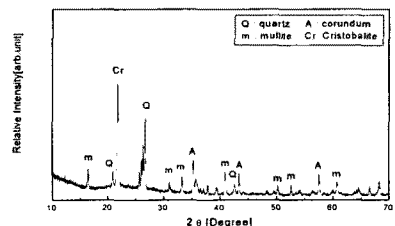
제조년도 성분	89(wt.%)	95(wt.%)	2001(wt.%)
SiO <sub>2</sub>	67.10	64.15	59.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.53	30.24	34.80
CaO	0.93	0.75	0.24
MgO	0.22	0.25	1.07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00	0.81	0.28
TiO <sub>3</sub>	0.53	0.45	0.20
Na <sub>2</sub> O	1.76	1.54	1.78
K <sub>2</sub> O	0.93	1.81	1.74

또한 도전성에 영향을 줄 수 있는 Fe, Na, K 등의 알칼리 금속이 미세하게 포함되어 있지만 철분의 경우 정제방법의 발전으로 해를 거듭할수록 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. X-선 형광 분석기로 측정된 화학성분의 결과를 표 2에 나타내었으며 자기의 결정상태를 관찰하고자 x-선 회절분석기로 결정 및 결정 양을 분석하였다. 분석한 결과를 그림 2에 나타내었다.

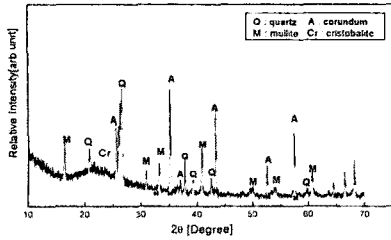
전기적 및 기계적 성질에 많은 영향을 미치는 mullite(3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2SiO<sub>2</sub>), quartz(SiO<sub>2</sub>), cristobalite(SiO<sub>2</sub>) 및 corundum(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 결정들을 관찰할 수 있다. '89년 및 '95년도에 제조된 애자에서는 열 충격에 취약한 cristobalite 결정이 관찰되었으나 2001년에 제조한 애자에서는 크리스토파라이트 결정을 거의 관찰할 수 없다. 즉 증가된 alumina의 양('89년 8 [wt.%], '95년 12 [wt.%], 2001년 17 [wt.%])이 잔류하고 있는 실리카(SiO<sub>2</sub>) 결정과 화학적 반응을 통해서 mullite 생성을 활발하게 함으로써 cristobalite의 결정을 억제할 수 있었다. 표 3에는 X-선 회절 분석기로 정량 분석한 결정 양을 나타내었다.



(a) '89년도 제조한 애자



(b) '95년도 제조한 애자



(c) 2001년도 제조한 애자

그림 2. X-선 회절분석기로 측정된 결과  
Fig. 2. X-ray diffraction results of insulators

표 3. X-선 회절분석기로 측정된 결정 양  
Table 3. X-ray diffraction results of various materials

결정	1989	1995	2001
Mullite(%)	12.7	17.11	11.89
Quartz(%)	5.46	3.72	3.3
Cristobalite(%)	4.0	5.74	0.5
Corundum(%)	8.10	9.08	16.4

'89년도에 제조한 애자보다 2001년도에 제조한 애자에 함유되어 있는 alumina 양이 증가하여 내아크성 및 내충격성을 향상시키는 corundum 결정양이 증가하였고 열충격에 약한 cristobalite의 양은 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 '95년의 경우 alumina의 함유량은 증가하였으나 소결조건이 맞지 않아 SiO<sub>2</sub> 일부가 alumina와 반응하여 mullite를 형성하였고 일부는 cristobalite를 형성하여 cristobalite 양이 증가한 것을 볼 수 있다. cristobalite 양의 변화에 따른 자기의 열팽창율을 측정하기 위하여 시편을 제작한 후 dilatometer를 이용하여 650°C에서 열팽창율을 측정하여 표 4에 나타내었다. 열팽창율이 높은 cristobalite를 많이 함유하고 있는 '95년에 생산한 자기의 열팽창율이 가장 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

표 4. Dilatometer를 이용하여 650°C에서 측정된 열팽창율  
Table 4. Coefficient of thermal expansion results of insulators used dilatometer in 650°C

제조년도	1989	1995	2001
열팽창계수 (×10 <sup>6</sup> /K)	5.540	5.683	5.143
열팽창률(%)	0.349	0.358	0.324

### 2.4 tanδ 특성

원료변화에 따른 애자의 제조년도별로 전기적 특성을 분석하기 위해 tanδ를 측정하여 alumina 함유량에 따른 애자의 특성변화를 분석하였다. 그림 3은 상용주파수대인 60Hz일 때의 온도변화에 따른 tanδ를 나타낸 것이다. 밀도 측정결과와 주사전자현미경 관찰결과에서 나타난 것처럼 밀도가 가장 낮고 기공 수가 많았던 '89년도와 '95년도 제품의 tanδ가 온도변화에 따른 영향을 가장 많이 받은 것을 확인할 수 있다. 특히 '95년도 애자의 경우 tanδ 값이 현저히 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 2001년도 제조한 애자의 경우 매우 안정적인 tanδ 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 2001년도 제조한 애자가 '89년도와 '95년도에 제조한 애자보다 장기 열화특성이 양호할 것이라 생각된다.

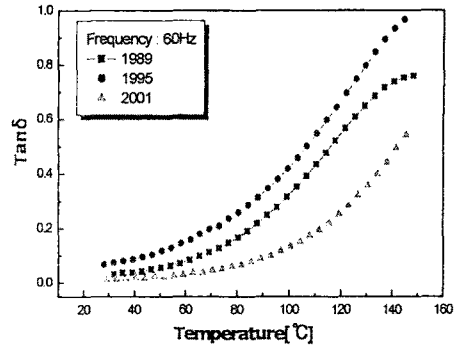


그림 3. Tanδ의 온도 의존성(60Hz)  
Fig. 3. Dependence upon temperature of tanδ

### 3. 결 론

송전선로에 사용하고 있는 애자를 원료 및 결정의 변화에 따라 제작연도별로 구분하여 화학적 물리적 특성을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같이 얻을 수 있었다.

- '95년도에 제조한 애자의 경우 내아크시험에 견딜 수 있는 자기를 개발하기 위하여 alumina 함유량을 증가시켰으나 소결조건 등의 문제로 인한 cristobalite 결정의 생성과 소결밀도의 감소로 '89년도에 제작한 애자의 물리적 특성보다 약 5% 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.
- 2001년도에 제조한 애자의 경우 SiO<sub>2</sub>의 양은 감소시키고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 양은 증가시켜서 cristobalite 결정이 생성되는 것을 억제하였으며, 이로 인하여 자기의 열팽창률이 감소하여 열 충격 특성이 향상되었다는 것이 나타났다.
- 2001년도에 제조한 애자의 기계적 특성이 '89년도와 '95년도에 제조한 애자와 비교하여 전반적으로 약 10% 향상된 것을 확인할 수 있었다.
- tanδ 실험 결과 alumina 첨가량에 따른 특성 차이보다는 소성조건에 따르는 자기의 밀도나 기공이 애자의 전기적 특성에 더 많은 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

[1] 한세원, 조한근, 박기호, 이동일, 최인혁, "송전용 자기제 애자의 성능평가 및 가속열화시험", 한국전기전자재료학회, Vol. 16, No.9, p.842, 2003.  
[2] K. Niihara, R. Morena and D. P. H. Hasselman, "Evaluation of K<sub>1c</sub> of Brittle Solids by the Indentation Method with Low Cracks to Indent Ratio", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 1, No. 1, p. 13, 1982.  
[3] K. Khandelwal and R. L. Cook, "Effect of Alumina Additions on Crystalline Constituents and Fired Properties of Electrical Porcelains", Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 49, No. 5, p. 522, 1970.  
[4] W. E. Blodgett, "High Strength Alumina Porcelains", Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 40, No. 2, p. 74, 1961.  
[5] R. Harada, N. Sugiyama and H. Ishida, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> strengthened Feldspathic Porcelain Bodies: Effect of the Amount and Particle Size of Alumina", Ceram. Eng. Sci. Proc., Vol. 17, No. 11, p. 88, 1996.