

초고압 송전용 자기재 애자의 재질에 따른 특성 분석

최인혁*, 최장현*, 정윤환*, 이동일*, 정길조*

한전전력연구원

A Characteristic Analysis of EHV Porcelain Insulators by Raw Materials

(In-Hyuk Choi*, Jang-Hyun, Choi*, Yoon-Hwan Jung*, Dong-Il Lee*, Gil-Jo Jung*)

KEPRI

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. Amount of alumina was contained most by 17 wt.% in case of insulators that were manufactured in 2001.

Key Words : Suspension insulator, Fracture toughness, $\tan\delta$, Relative density, Alumina

1. 서 론

세계적으로 송전 전압 격장을 통한 송전용량 증가와 신뢰성 높은 안전된 송전 능력에 관한 연구가 각도로 진행되고 있다. 특히 송전용 기자체인 애자는 절연물로서 송전탑과 선로를 연결하는 동시에 전선을 지지하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 그중 자기애자의 주원료는 점토, 장석, 도석, 그리고 alumina 등으로 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[1]. 초창기 애자산업의 시작단계에서는 배합과 소결기술이 부족하여 애자의 불량으로 인한 송전선로의 애자런 이탈이나 절연불량으로 인한 지락사고가 발생하는 문제점을 가지고 있었으나 현재는 대부분의 문제들이 개선되어 765kV에 사용되는 400kN 초고압용 애자를 개발하는 단계까지 왔다. 하지만 현재와 같은 초고압 대응량을 송전하는 선로의 사고는 과거보다도 더욱 심각한 피해를 가져올 수 있으므로 송전용 애자의 신뢰성은 매우

중요한 과제로 부각되고 있다.[2]

따라서 본 연구에서는 애자의 년도별 사고율과 구성소재의 성분이나 결정구조와의 상관성을 규명하기 위해 애자의 사용된 주원료 중의 하나인 alumina의 첨가량 변화에 따른 애자의 물리적, 화학적 특성 변화를 조사하고 이를 토대로 기계적, 전기적 특성이 관하여 분석하여 애자의 불량원인을 분석하고자 한다.

2. 실험

2.1 자기애자의 사고율

송전선로의 고신뢰도를 유지하기 위하여 현재 ANSI C29.2나 IEC 60383-1에 따른 시험보다 더 가혹한 조건하에서 많은 시험들이 이루어지고 있으며 특히 1995년도부터 채택된 72kA·cycle의 아크전류를 발생시켜 시험하는 내아크 시험은 애자의 시험 중 가장 가혹한 시험으로 순간적으로 수천도의 열충격에 애자가 견디어야 한다. 따라서 국내업계는 내아크에 견딜 수 있는 애자를 제조하기 위하여 알루미나(Alumina)의 첨가 양을 증가시켜서 열충격에 약한 크리스토탈라이트(Cristobalite)

의 생성을 억제할 수 있는 방법을 개발하기 시작하였으나 여러 가지 원인으로 인하여 1995년도에 제조한 애자의 선로사고율이 약 0.25%로 가장 높게 나타나는 것을 그림 1을 통하여 알 수 있다. 그러나 1996년도 이후에 제조된 애자에서는 이러한 사고율이 급격히 감소하여 최근에 제조한 애자의 사고율은 거의 0%인 것을 알 수 있다.

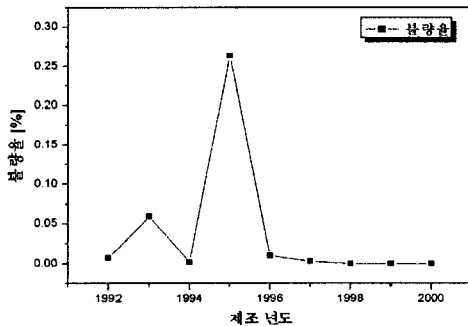


그림 1. 제조년도별 송전용 애자의 사고분포

2.2 실험용 자기애자 채취

자기에 첨가된 alumina 양의 변화에 맞추어 1989년도, 1995년도, 2001년도에 제조한 36000lbs 볼소켓형 현수애자를 국내의 송전선로에서 철거하였다. 각 해당 년도 애자에 함유된 alumina 첨가량은 표 1과 같다.

표 1. 연도별 애자의 alumina 첨가량

제작년도	alumina 첨가량
1989	8 wt.%
1995	12 wt.%
2001	17 wt.%

2.3 실험방법

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. 또한 소결밀도는 ASTM C20에 따라 archimedes 방법을 이용하였고 경도 및 파괴인성을 측정하기 위해 시편을 15, 9, 6, 3, 1 μ m 다이아몬드 페이스트에서 차례로 경면 연마한 후 경도

(H_v)는 vickers 경도계(Mitutoyo, Japan)를 이용하여 하중 10kg, 유지시간 10sec에서 생긴 압흔으로 측정하였고, 파괴인성(K_{IC})은 압자압입법(ICL, Indentation Crack Length : 136° Vickers indenter, Mitutoyo, Japan)으로 측정하였다[3]. 이 때 하중은 10 kg, 유지 시간은 10 sec로 하였으며 다음의 식을 이용하여 경도와 파괴인성을 계산하였다.

$$H = \frac{F}{2a^2} \quad (1)$$

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

F: Load

a: Length in diagonal of vickers indent

c: Crack length

E: Young's modulus

H: Hardness

K_{IC} : Fracture toughness

전기적 성질인 tan δ 는 유전특성분석기 DEA-2970(TA instruments, USA)을 사용하여 실험하였고, 시편에 인가되는 전압은 5V이고, 진공 유리관 내에서 외부영향을 최소화할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 시편의 두께는 1~2 mm로 정확한 두께는 자동으로 측정 계산되며, 시편의 크기는 가로와 세로가 2~25 cm인 사각형으로 주전극의 크기에 맞게 제작하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화학성분

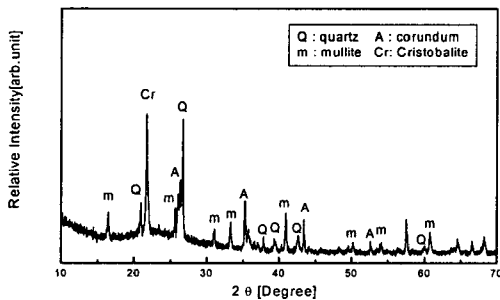
X-선 형광 분석기로 측정된 결과 자기의 기계적, 전기적 특성에 중요한 영향을 주는 실리카와 alumina의 양이 가장 많이 변화한 것을 확인할 수 있으며, SiO₂ 양은 68.45 wt.%(1989년)에서 59.63 wt.%(2001년)로 점차 감소하였고 기계적 및 열 충격 특성을 향상시키는 alumina의 함유량은 증가하고 있다는 것을 볼 수 있다. 또한 도전성에 영향을 줄 수 있는 Fe, Na, K 등의 알칼리 금속이 미세하게 포함되어 있지만 철분의 경우 정제방법의 발전으로 해를 거듭할수록 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. X-선 형광 분석기로 측정된 화학성분의 결과를 표 2에 나타내었으며 자기의 결정상

태를 관찰하고자 x-선 회절분석기로 결정 구조를 측정하여 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

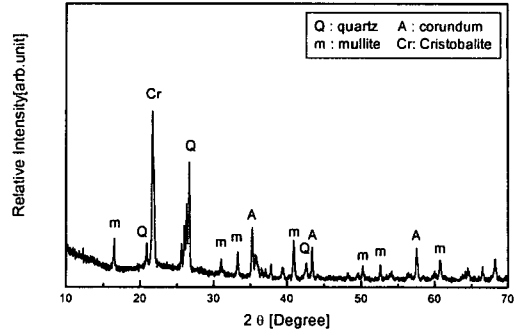
표 2. X-선 형광분석기로 측정된 결과

제조년도 성분	89(wt.%)	95(wt.%)	01(wt.%)
SiO ₂	67.10	64.15	59.88
Al ₂ O ₃	27.53	30.24	34.80
CaO	0.93	0.75	0.24
MgO	0.22	0.25	1.07
Fe ₂ O ₃	1.00	0.81	0.28
TiO ₂	0.53	0.45	0.20
Na ₂ O	1.76	1.54	1.78
K ₂ O	0.93	1.81	1.74

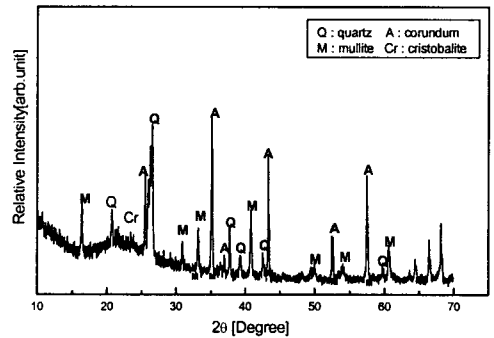
전기적 및 기계적 성질에 많은 영향을 미치는 mullite(3Al₂O₃ · 2SiO₂), quartz(SiO₂), cristobalite(SiO₂) 및 corundum(Al₂O₃)의 결정들을 관찰할 수 있다. 1989년 및 1995년도에 제조된 애자에서는 열충격에 취약한 cristobalite 결정이 관찰되었으나 2001년도에 제조한 애자에서는 크리스토팔라이 결정을 거의 관찰할 수 없다. 즉 증가된 alumina의 양(1989년 8 wt.%, 1995년 12 wt.%, 2001년 17 wt.%)이 잔류하고 있는 실리카(SiO₂) 결정과 화학적 반응을 통해서 mullite 생성을 활발하게 함으로써 cristobalite의 결정을 억제할 수 있었다.



(a) 1989년도 제조한 애자



(b) 1995년도 제조한 애자



(c) 2001년도 제조한 애자

그림 2. X-선 회절분석기로 측정된 결과

3.2 기계적 특성

1989년, 1995년 및 2001년도에 제조한 애자의 상대밀도를 그림 3에 나타내었다. 1995년도에 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 1995년도에 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.

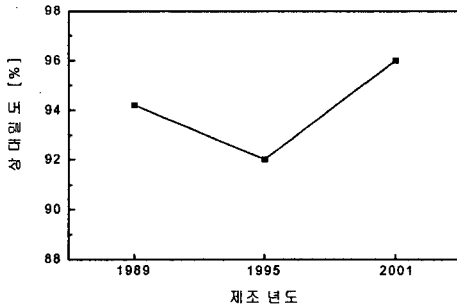


그림 3. 제조년도에 따른 자기의 상대밀도

년도별 절대밀도, 탄성율, 경도, 파괴인성 등 기계적 특성에 관하여 표 3에 나타내었다. 그림 3과 같이 1995년도의 생산된 애자의 경우 다른 년도와 비교하여 현저히 낮은 상대밀도로 인해 기계적 특성이 낮음을 표 3을 통하여 확인 할 수 있다.

표 3. 경도, 탄성율, 파괴인성 측정결과

제조년도	1989	1995	2001
절대밀도[g/cm ³]	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 _{IC})[MPa · m ^{1/2}]	1.4	1.3	1.7

3.3 tanδ 특성

원료변화에 따른 애자의 제조년도별로 전기적 특성을 분석하기 위해 tanδ를 측정하여 alumina 함유량에 따른 애자의 특성변화를 분석하였다. 그림 4는 상용주파수대인 60Hz일 때의 온도변화에 따른 tanδ를 나타낸 것이다. 특히 1995년도 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 1989년도와 1995년도에 제조한 애자보다 장기 열화특성이 양호할 것이라 생각된다.

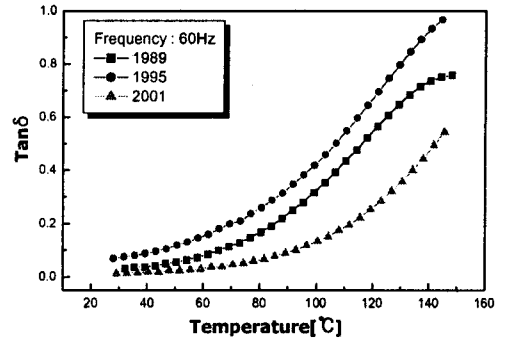


그림 4. Tanδ의 온도 의존성(60Hz)

4. 결론

송전선로에 사용하고 있는 애자를 원료 및 결정의 변화에 따라 제작연도별로 구분하여 화학적 물리적 특성을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 1995년도에 제작한 애자의 경우 내아크시험에 견딜 수 있는 자기를 개발하기 위하여 alumina 함유량을 증가시켰으나 소결조건 등의 문제로 인한 cristobalite 결정의 생성과 소결밀도의 감소로 1989년도에 제작한 애자의 물리적 특성보다 약 5% 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

(2) tanδ 실험 결과 alumina 첨가량에 따른 특성 차이보다는 소성조건에 따르는 자기의 밀도나 기공이 애자의 전기적 특성에 더 많은 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] W. M. Carty and U. Senapati, "Porcelain-raw Materials, Processing, Phase Evolution and Mechanical Behavior", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 81, No. 1, p. 3, 1990.
- [2] J. E. Schroeder, "Inexpensive High Strength Electrical Porcelain", Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 57, No. 10, p. 526, 1978.
- [3] K. Niihara, R. et al, "Evaluation of K_{IC} of Brittle Solids by the Indentation Method with Low Cracks-to-indent Ratio", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 1, No. 1, p. 13, 1982.