

송전용 자기재 현수애자의 고강도 특성 연구

조한구, 한세원, 박기호, **최연규, *이동일, *최인혁, *김태영

한국전기연구원, 고려애자공업(주), 전력연구원

A Study on the High Strength of porcelain insulators for transmission line

S W Han, H G Cho, K H Park, Y K Choi, D I Leel, I H Choi, T Y Kim

KERI, **KRI Co., *KEPRI

Abstract

In this study, porcelain insulator samples which have a different alumina composition were manufactured in order to test electrical and mechanical properties and make an analysis of the propagation phenomena of micro cracks on porcelain body. From XRD quantitative analysis the crystalline phases were different with alumina composition, sample C and D which have about 17wt% Corundum phase without the Cristobalite phase shows better electrical and mechanical properties than sample A and B which have the Cristobalite phase. In dielectrics test on porcelain samples with below 17wt% alumina composition, it was found that the amount of glass phase(SiO_2) have an main effect to decrease the dielectric loss($\tan\delta$), and the dielectric breakdown voltage of aluminous porcelain insulators was largely affected by its relative density. As a micro cracks analysis, HRB were measured, then the intensity of HRB increased with the amount of alumina composition. On the other hand, the propagation behaviors of cracks was fairly influenced by the distribution of pores.

Key Words : Porcelain insulator, Alumina composition, Dielectric constant and loss, HRB, Micro crack propagation

1. 서론

전력용 애자는 기계적 강도와 전기적 내구성의 2 가지 기능을 가지도록 설계된다. 현재 세계적으로 가장 많이 사용하는 송전용 애자 종류는 자기재 애자(porcelain insulator)로 유리 애자와 고분자 애자보다 훨씬 많다. 국내의 경우 송전용 애자의 거의 전부가 자기재가 사용되고 있는 실정이다. 사용 환경상 모든 절연물은 열화가 불가피하다. 자기재 애자는 절연을 담당하는 자기부, 접합을 위한 시멘트 부 및 기계적 강도를 유지하는 금구류부의 조합으로 이루어져있기 때문에 현장에서 냉열 변화와 같은 스트레스를 받는 경우 각 부위의 열팽창차이로 인한 응력이 자기부에 작용하게 된다. 또한 바람의

영향으로 지속적으로 기계적 진동이 발생하여 응력이 애자를 열화시키는 원인이 된다. 따라서 이러한 응력이 자기 절연물의 파단에 이르지 않도록 자기부의 소재를 강화하여 제조하는 것이 중요하다.

최근 국내 전력용 자기재 애자를 제조하는 기술도 많이 향상되어 선진국에서 채택하는 고강도 알루미늄계 애자를 생산하고 있다. 하지만 아직도 송전급에 사용되는 상당수의 자기재 애자를 수입에 의존하고 있으며 국산 애자 제품의 경우 고강도 알루미늄계로 전이되기 전 제품들도 현장에 사용되고 있는 실정이다. 애자는 전력계통의 기본적 절연 구조물로 사고가 발생하는 경우 정전 또는 단전 등의 피해가 발생하기 때문에 외국 선진국의 경우 고성

능의 애자 소재 개발은 물론 장기적 사용에 따른 열화를 관리할 수 있는 다양한 연구가 이루어져 있다. 반면 국내에서는 아직 이러한 연구 실적이 부진하고 특히 알루미늄계 자기재 애자의 전기적 특성, 기계적 강화 메카니즘 및 미세 균열(micro crack)의 진전과 억제 등에 대한 보다 정량적이고 학술적인 연구는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 전력용으로 사용되는 고강도 자기재 애자를 알루미늄나 조성을 달리한 4 종류의 시편을 제조하여 전기적, 기계적 특성을 시험하고 알루미늄계 자기재 소재의 미세 균열의 진전에 관한 경도 특성을 검토하였다.

2. 실험 방법

자기재 애자를 제조하기 위해서는 일반적으로 점토(Clay), 도석(Pottery stone), 장석(Feldspar) 및 알루미늄나(Alumina) 등의 원료를 적정배율로 혼합한 후 그림 1과 같은 제조 공정에 따라 제조하였다. 이 공정에서 자기 소재의 수분을 적절히 관리하여 성형이 이루어지도록 하는 filter pressing 공정과 cake화를 위한 진공 토런 공정이 중요하다. 성형 후 건조된 시편은 소성되는데 이때 본 연구에서 채택한 주요 소성 조건은 1300℃에서 50분간 환원 분위기로 시편을 제조하였다.

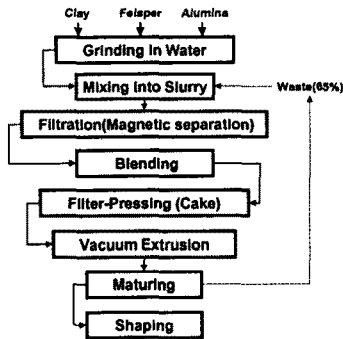


그림 1. 자기재 애자의 제조 공정

알루미늄나 조성에 따라 결정상의 형태를 변화시켜 애자의 기계적, 전기적 특성이 강화되는 특성을 확인하기 위해 다음과 같은 기본 배합 비율을 갖는 4 가지 종류의 시편을 설계하여 특성 시험 및 분석을 실시하였다. 제조된 시편의 기본적인 제조 공정과 원료 종류는 유사하지만 고강도를 구현하기 위해 기본적으로 알루미늄나(Alumina) 첨가 조성에 변화를

주어 코런덤(Corundum), 크리스토팔라이트(Cristobalite), 물라이트(Mullite) 및 석용(Quartz) 결정상 등이 다른 형태로 제조하였다.

표 1. 시편의 기본 배합 비율

Materials	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
Pottery stone	20wt%			
Feldspar	23wt%			
Clay A	19wt%			
Clay B	21wt%			
Alumina	8wt%	12wt%	17wt%	17wt%
Glass(SiO ₂)	68.5wt%	64.5wt%	60wt%	61wt%

제조된 시편의 결정상 분석과 미세 조직 관찰을 위하여 XRD(X-ray Diffraction, Phillips 40kV)과 SEM(Scanning Electron Microscope, Hitachi S2700)을 사용하였다. 전기적 특성 시험으로 ASTM D150에 따라 $\tan\delta$ 및 유전 손실을 Impedance Analyser(HP 4194, 40MHz)을 이용하여 시험하였다. 자기 소재의 전기적 절연 내력을 검증하는 절연 파괴 시험은 ASTM D149에 따라 유중 파괴 시험기에서 시험하였다. 이때 시편은 30×30×1.5mm의 형태로 가공하여 시험하였다. 자기 소재의 기계적 특성은 ASTM C 369에 따라 3-point 시험법으로 실시하였다. 시편은 규격에 따라 직경 21mm, 길이 152mm의 봉형으로 가공하여 인장 시험기(Instron 6022, 1 Ton)로 시험하여 탄성을, 굴곡 강도 등을 측정하였다. 자기 소재의 미세 크랙(micro crack)의 진전과 억제 현상을 고찰하기 위해 HRB 측정법(Hardness Rockwell B scale Method)을 적용하여 시편의 특성을 비교 하였다. B 스케일 압자는 1/16" 강구로 1000kg 하중을 가하게 된다. 측정 횟수는 각 시편에 대해 모두 30여개의 포인트를 측정하여 평균값과 분포 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 결정상 분석

표 2는 XRD 측정 데이터로부터 분석 프로그램을 이용하여 결정양을 정량적으로 비교한 것이다. 시편 C와 D의 경우 시편 A와 B에 비해 원료의 화학 성분 분석의 결과 알루미늄나(Al₂O₃)량은 5wt% 정도 많고 유리 양은 5~8wt% 정도 적은 조성을 갖는

다. 이러한 차이는 시편 C와 D의 경우 순수 알루미늄 나 분말을 초기에 보강하는 한편 코런덤 결정상이 활성화 될 수 있도록 유리(SiO₂) 양을 상대적으로 감소시켜 나타낸 효과이다. 시편 C, D에서 나타나는 16% 정도의 코런덤 결정량은 고강도 알루미늄계 자기애자의 전형적인 조직 형태에 해당한다.

표 2. XRD 결정상 정량 분석

Crystalline Phase	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
Mullite(%)	12.7	17.1	11.89	10.65
Quartz(%)	5.46	3.72	3.3	3.43
Cristoballite(%)	4.0	5.74	0.5	-
Corundum(%)	8.1	9.08	16.4	16.06

열적, 기계적 충격 강도에 중요한 영향을 미치는 기공(pores)의 형태는 약 1200℃ 부근에서 수축되면서 개기공(open pore)에서 폐기공(closed pore)으로 전이된다. 일반적으로 전력용 자기재 애자의 폐기공은 8vol% 이하가 되도록 제어하면 약 95%의 상대 밀도를 갖게 된다. 표 3은 각 시편의 주요 기계적 특성을 측정된 결과이다. 시편 C의 경우 다른 시편과 비교하여 상대 밀도, 탄성을 및 파괴 인성 등에서 상대적으로 우수한 특성값을 갖는 것으로 나타났다. 그림 2는 시편 C의 미세 조직 사진이다.

표 3. 시편의 기계적 특성

Samples	Density[g/cm ³]	Relative Density[%]	Young's Modulus[GPa]	파괴인성 [MPa·m ^{1/2}]
Sample A	2.27	94	82	1.4
Sample B	2.38	92	74	1.3
Sample C	2.54	96	96	1.7
Sample D	2.48	94	88	1.6

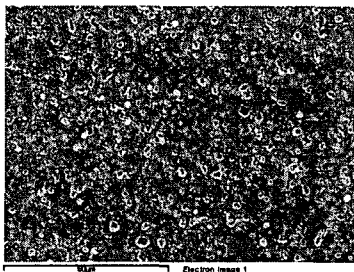


그림 2. 시편의 미세 조직 SEM 사진(시편 C)

3-2. 유전 손실 특성

그림 3은 각 시편에 대하여 주파수를 60Hz와 100 kHz로 달리할 때 온도 변화에 따른 유전 상수(dielectric constant)를 측정된 결과이다. 60Hz에서 측정된 경우 온도가 증가함에 따라 120℃ 부근에서 유전 상수의 급작스런 상승을 가져다주는데 이는 대전된 캐리어의 농도 증가로 인한 이온 점프 배향(ion jump orientation)과 공간 전하(space charge) 효과에 의한 것이다.

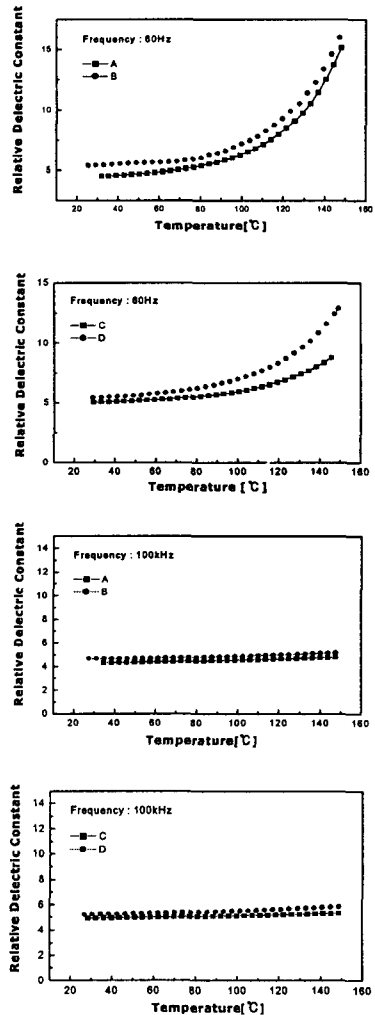


그림 3. 온도 변화에 따른 유전 상수 특성

유전 상수를 증가시키는 공간 전하 효과는 전극 물질과 전극의 분극 효과에 따라 크게 달라진다. 이온 전도의 경우 전극의 반응은 전원을 제공하는 전극 표면에서 발생하도록 공간 전하의 제거가 필요하다. 이러한 반응이 유지되지 않으면 분극과 유

전 상수의 증가를 가져온다. 일반적으로 전극 분극 효과를 피하기 위해 유전 상수의 측정은 100Hz 이상에서 이루어진다. 주파수를 100kHz로 높여 측정된 결과 이러한 전극 분극 효과는 배제된 상태에서 모든 시편에서 150℃까지 거의 5정도의 일정한 유전 상수를 유지하는 것을 알 수 있다. 한편 각 시편에 대하여 주파수를 60Hz와 100kHz로 달리할 때 온도 변화에 따른 유전 손실을 측정된 결과, 60Hz에서 측정된 경우 온도에 따른 유전 손실 증가 폭이 크게 나타나지만 100kHz에서 측정된 경우 온도에 따른 유전 손실의 증가 폭은 1/10수준에 불과하였다.

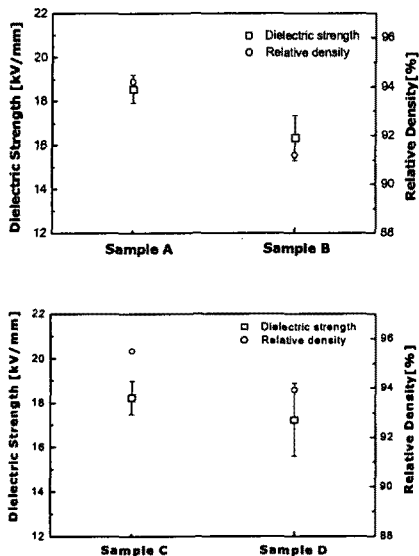


그림 4. 시편의 절연 파괴 강도 특성

자기 애자는 8vol% 미만의 기공이 존재한다. 따라서 절연 파괴가 기공을 따라 발생하고 기공 내에서 가스의 방전이 중요한 역할을 하게 된다. 기계적 강도와 마찬가지로 절연 파괴 강도는 시편 두께가 얇을수록 커지는데 이는 결정적인 결함이 존재할 확률이 감소하기 때문이다. 절연 파괴는 최대수의 기공을 갖는 경로와 최소수의 결정상을 갖는 경로를 통해 발생한다. 기공이 많은 표면을 갖는 애자는 비교적 낮은 절연 파괴 강도 특성을 보이는 데 이것은 기공이 많아 파괴 경로를 제거할 확률이 증가하기 때문으로 생각된다. 그림 4는 시편의 절연 파괴 강도를 측정된 결과이다. 그림에서 보면 절연 파괴 강도가 알루미늄의 첨가로 인한 코런덤 결정상의 양의 증가 따라 비례하여 증가하지 않고

오히려 알루미늄이 가장 적은 시편 A에서 높은 절연 파괴 강도가 나타나고 있다. 이것은 절연 파괴 내구성은 알루미늄, 석영, 물라이트와 같은 결정상의 강화 형태보다는 앞에서 설명한 기공의 상태 즉 상대 밀도값과 보다 직접적인 관계를 가지고 변화하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

전력용으로 사용되는 고강도 자기재 애자를 알루미늄 조성을 달리한 4종류의 시편을 제조하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 알루미늄 첨가량에 따라 결정상의 형태가 차이를 나타내었으며 충격 강도에 취약한 크리스토팔라이트 결정상이 거의 없이 코런덤 결정상은 최고 17%까지 형성되었다. 이 시편의 경우 알루미늄 조성이 낮은 시편과 비교하여 상대 밀도, 탄성률 및 파괴인성 등에서 상대적으로 우수한 특성값을 나타내었다.
- 2) 유전 특성 실험에서 주파수를 100kHz로 높여 측정된 결과 전극 분극 효과는 배제된 상태에서 모든 시편에서 150℃까지 거의 5정도의 일정한 유전 상수를 유지하였다.
- 3) 절연 파괴 내구성은 알루미늄, 석영, 물라이트와 같은 결정상의 강화 형태보다는 자기 기공의 상태 즉 상대 밀도값과 직접적인 관계를 가지고 변화하였다.

참고 문헌

- [1] W. D. King, H. K. Bowen, D. R. Uhlmann, "Introduction to ceramics", Wiley Interscience Publication, Chap. 11, 1976.
- [2] J. S. T. Looms, "Insulators for high voltages", IEE Power Engineering Series 7, 1988.
- [3] S. W. Han, H. G. Cho, T. Y. Kim, D. I. Lee, and I. H. Choi, "A study on electrical and mechanical simulation for designing porcelain insulators with high strength", International Conference on Electrical Engineering 2002, Vol. 3, 2002.
- [4] "배전선절연사고방비대책", 일본전기협동연구, 27(3).