

알루미나 조성에 따른 고강도 자기 애자의 특성 연구

Study on Characteristics of Porcelain Insulators for High Strength with Alumina Composition

조한구^{1,a}, 한세원¹, 박기호¹, 최연규²
(Han-Goo Cho^{1,a}, Se-Won Han¹, Ki-Ho Park¹, and Yeon-Kou Choi²)

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(SiO₂) have an main effect to decrease the dielectric loss(tanδ), 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, Micro crack propagation

1. 서 론

전력용 애자는 기계적 강도와 전기적 내구성의 2가지 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 시멘트부 및 기계적 강도를 유지하는 급구류부

의 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.

최근 국내 전력용 자기재 애자를 제조하는 기술도 많이 향상되어 선진국에서 채택하는 고강도 알루미나계 애자를 생산하고 있다. 하지만 아직도 송전급에 사용되는 상당수의 자기재 애자를 수입에 의존하고 있으며 국산 애자 제품의 경우 고강도 알루미나계로 전이되기 전 제품들도 현장에 사용되고 있는 실정이다. 애자는 전력시스템의 기본적 절연 구조물로 사고가 발생하는 경우 정전 또는 단전 등의 피해가 발생하기 때문에 외국 선진국의 경우 고성능의 애자 소재 개발은 물론 장기적 사용에 따른 열화를 관리할 수 있는 다양한 연구가 이루어져 있다[1,2]. 반면 국내에서는 아직 이러한

1. 한국전기연구원 재료응용연구단
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 고려애자공업(주)
a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr
접수일자 : 2003. 7. 31
1차 심사 : 2003. 9. 25
심사완료 : 2003. 11. 27

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 알루미늄 조성을 달리한 4 종류의 시편을 제조하여 전기적, 기계적 특성을 시험하고 알루미늄계 자기재 소재의 미세 균열의 진전에 관한 경도 특성을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제조

자기재 애자를 제조하기 위해서는 일반적으로 점토(Clay), 도석(Pottery stone), 장석(Feldspar) 및 알루미늄(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 토련 공정이 중요하다. 성형 후 건조된 시편은 그림 2와 같은 열처리 조건으로 소성되는데 이때 본 연구에서 검토된 제조 공정 연구에서 얻어진 최적 열처리 조건인 1300℃에서 50분간 환원 분위기로 시편을 제조하였다[3,4].

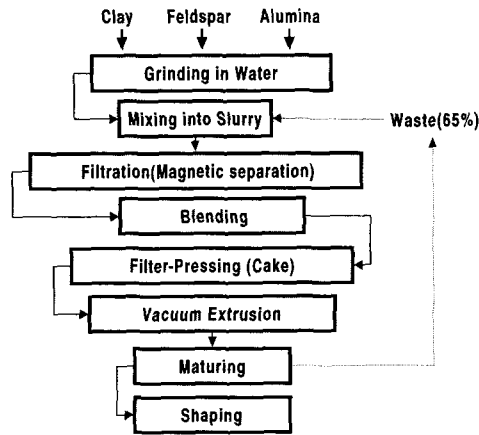


그림 1. 자기재 애자의 제조 공정.
Fig. 1. Manufacturing process of porcelain insulator.

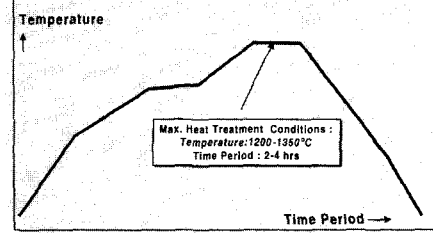


그림 2. 자기재 애자의 열처리 시험 조건.
Fig. 2. Annealing condition of porcelain insulator.

알루미늄 조성에 따라 결정상의 형태를 변화시켜 애자의 기계적, 전기적 특성이 강화되는 특성을 확인하기 위해 다음과 같은 기본 배합 비율을 갖는 4가지 종류의 시편을 설계하여 특성 시험 및 분석을 실시하였다. 제조된 시편의 기본적인 제조 공정과 원료 종류는 유사하지만 고강도를 구현하기 위해 기본적으로 알루미늄(Alumina) 첨가 조성에 변화를 주어 코런덤(Corundum), 크리스토팔라이트(Cristobalite), 물라이트(Mullite) 및 석영(Quartz) 결정상 등이 다른 형태로 제조하였다.

표 1. 시편의 기본 배합 비율.

Table 1. Basic composition of samples.

| 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% |
| | balance | balance | | |
| Glass(SiO ₂)성분 | 68.5wt% | 64.5wt% | 60wt% | 61wt% |

2.2 분석 및 시험

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 tanδ 및 유전 손실을 임피던스 분석기(Impedance Analyser(HP 4194, 40MHz))를 이용하여 시험하였다. 자기 소재의 전기적 절연 내력을 검증하는 절연 파괴 시험은 ASTM D149에 따라 유중 파괴 시험기에서 시험하였다. 이때 시편은 가로 0.03m, 세로 0.03m, 두께 0.015m의 형태로 가공하여 시험하였다[5]. 자기 소재의 기계적 특성은 ASTM C 369에 따라 3-point 시험법으로 실시

하였다. 시편은 규격에 따라 직경 0.021m, 길이 0.152m의 봉형으로 가공하여 인장 시험기(Instron 6022, 1 Ton)로 시험하여 탄성율, 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

제조된 각 시편에 대하여 결정상의 분포를 확인하기 위해 XRD를 분석하였다. 그림 3은 XRD 측정 결과를 비교한 것이다. 본 연구에서 의도한 시편간 차별화는 알루미늄 성분이 지배적으로 결정하는 코런덤 결정상(A)의 양을 제어하는 것과 충격 강도 내구성이 불리한 크리스토팔라이트 결정상(Cr)을 억제하려고 하였다.

그림 3에서 알 수 있듯이 시편 A와 B는 크리스토팔라이트 결정상이 우세적으로 나타나는 반면 시편 C와 d는 크리스토팔라이트 결정상이 거의 억제되고 주로 코런덤 결정상이 잘 발달된 전형적인 알루미늄계 자기애자 소재 특성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 알루미늄 입자가 많이 첨가되어 분산된 시편 C, D에서 열처리 과정에서 석영에서 크리스토팔라이트로 상전이의 발생을 억제하는 효과가 발생한 것으로 판단된다. 표 2는 XRD 측정 데이터로부터 분석 프로그램을 이용하여 결정량을 정량적으로 비교한 것이다. 시편 C와 D의 경우 시편 A와 B에 비해 원료의 화학 성분 분석의 결과 알루미늄(Al_2O_3)양은 5wt% 정도 많고 유리 양은 5~8wt% 정도 적은 조성을 갖는다. 이러한 차이는 시편 C와 D의 경우 순수 알루미늄 분말을 초기에 보강하는 한편 코런덤 결정상이 활성화 될 수 있도록 유리(SiO_2) 양을 상대적으로 감소하면서 나타난 효과이다. 시편 C, D에서 나타나는 16% 정도의 코런덤 결정량은 고강도 알루미늄계 자기애자의 전형적인 조직 형태에 해당한다[6].

애자 소재의 열처리 온도에 따른 결정 조직의 변화는 우선 약 600~1000℃ 사이에서 소성 수축이 시작되면서 디펙트 스핀넬(defect spinel)을 형성하고 장석이 용해된다. 1000~1300℃ 사이에서 소성 수축이 완료되며 이때 defect spinel은 물라

아트를 형성하면서 장석과 함께 유리상을 이룬다 [7]. 이 과정에서 석영상은 크리스토팔라이트로 상전이 하기 시작한다. 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. 강도와 기공과는 직접적인 관계를 가지고 있는데 강도(δ)는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

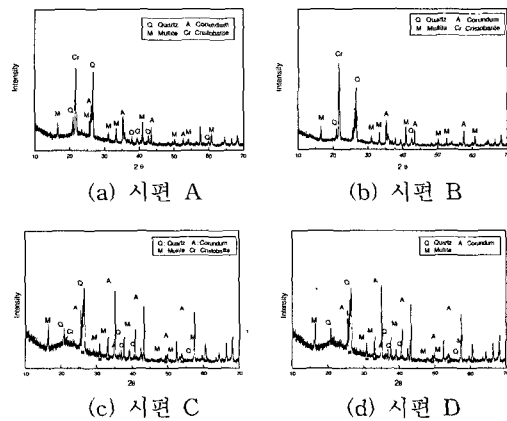


그림 3. 시편의 XRD 분석.

Fig. 3. X-ray diffraction pattern of samples.

표 2. XRD 결정상 정량 분석.

Table 2. Crystalline phase of X-ray diffraction.

| 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 |
| Cristobalite(%) | 4.0 | 5.74 | 0.5 | - |
| Corundum(%) | 8.1 | 9.08 | 16.4 | 16.06 |

$$\delta = \delta_0 \exp(-np)$$

여기서 δ_0 는 기공이 없는 시편의 강도, n은 상수 (4~7), p는 기공율(vol%)이다. 표 3은 각 시편의 주요 기계적 특성을 측정한 결과이다. 시편 C의 경우 다른 시편과 비교하여 상대 밀도, 탄성율 및 파괴 인성 등에서 상대적으로 우수한 특성값을 갖는 것으로 나타났다. 시편 C의 경우 전반적인 기계적 특성값이 안정되고 특히 미세 기공의 형태가 시편 D

와 비교하여 다소 크지만 그림 4의 미세 조직 사진을 비교하면 전반적으로 분포가 고른 원형의 형태를 잘 유지하는 조직을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 특성은 차 후 언급할 HRB 경도 시험에서 미세 크랙의 억제에 중요한 역할을 하게 된다.

표 3. 시편의 기계적 특성.

Table 3. Mechanical properties of samples.

| 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 |

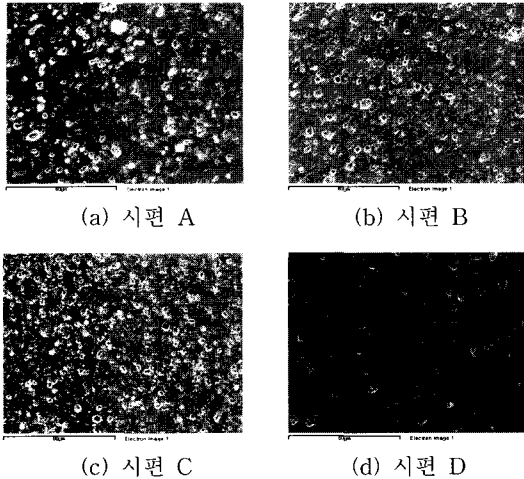


그림 4. 시편의 미세 조직 SEM 사진.
Fig. 4. SEM photographs of samples.

3.2 유전 손실 특성

그림 5는 각 시편에 대하여 주파수를 60Hz와 100kHz로 달리할 때 온도 변화에 따른 유전 상수(dielectric constant)를 측정된 결과이다. 유전 특성은 주파수와 온도에 따라 달리 나타난다. 전자분극(electronic polarization)과 이온분극(ionic polarization)의 경우 주파수 효과는 저주파에서 100Hz까지는 무시할 수 있다. 그러나 온도가 높아지면 이온 이동(ion mobility)과 결정 결함 이동(crystal imperfection mobility)에 의한 영향이 증가하게 된다[8]. 그림 5에서 60Hz에서 측정된 경우 온도가 증가함에 따라 120°C 부근에서 유전 상수의 급작스런 상승을 가져다주는데 이는 대전된 캐

리어의 농도 증가로 인한 이온 점프 배향(ion jump orientation)과 공간 전하(space charge)효과에 의한 것이다. 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 유전 상수의 증가를 가져온다. 일반적으로 전극 분극 효과를 피하기 위해 유전 상수의 측정은 100Hz 이상에서 이루어진다. 주파수를 100kHz로 높여 측정할 결과 이러한 전극 분극 효과는 공간 전하가 배제된 상태에서 모든 시편에서 150°C까지 거의 5정도의 일정한 유전 상수를 유지하는 것을 알 수 있다.

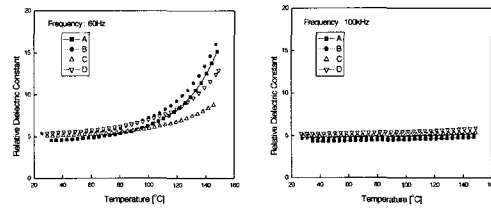


그림 5. 온도 변화에 따른 유전 상수 특성.
Fig. 5. Relationship of relative dielectric constant and temperature.

교류 전계에서 사용되는 절연물은 유전 손실에 의해 전기에너지가 열에너지로 변환된다. 이때 인가 전계와 전류 사이의 위상각은 90°이하의 값을 갖는다. 즉 90°-δ, 여기서 tanδ가 손실각을 나타내며 절연물의 손실 특성을 규정하는 요인으로 사용된다. 자기 애자의 경우 유리상 내에 흩어져 있는 결정입자로 구성되어 있기 때문에 유리의 구조와 조성이 유전 손실을 결정하는 주 요인이다.

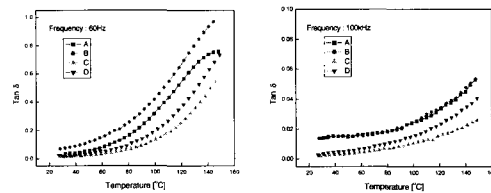


그림 6. 온도 변화에 따른 유전 손실 특성.
Fig. 6. Relationship of dielectric loss and temperature.

유리상에서 발생하는 유전 손실은 주파수 영역에 따라 크게 도전 손실(직류- 10^2 Hz), 쌍극자 완화 손실(10^3 - 10^6 Hz) 그리고 변형 손실(수kHz-수MHz)로 구분할 수 있다. 이 3가지 손실 모두 유리상에서의 이온 이동이나 변위(displacement)에 의해 발생하는 현상이다. 10^{10} Hz이상의 높은 주파수에서는 진동이나 공진에 의한 손실이 유리에서의 주된 손실 요인이다.

그림 6은 각 시편에 대하여 주파수를 60Hz와 100kHz로 달리할 때 온도 변화에 따른 유전 손실을 측정된 결과이다. 60Hz에서 측정된 경우 온도에 따른 유전 손실 증가 폭이 크게 나타나지만 100kHz에서 측정된 경우 온도에 따른 유전 손실의 증가 폭은 1/10수준에 불과하다. 60Hz에서와 100kHz에서 나타나는 손실 특성은 모두 온도 증가에 따른 유전 손실이 증가하는 전형적인 도전 손실과 쌍극자 완화에 의한 손실에 해당한다.

유전 손실의 크기는 유리의 화학적 조성에 따라 달라진다. 일반적으로 높은 전도도를 갖는 유리가 높은 유전 손실값을 갖는다. 유리상이 풍부한 애자의 경우 전기 전도도는 유리의 전기 전도도에 의해 결정되는데 결국 유리의 화학적 조성에 의해 결정된다고 할 수 있다[9]. 한편 알루미늄양이 증가하는 유전 손실을 증가시키는 원인으로 알려져 있다. 그림 6에서 유전 손실의 크기가 시편 A→시편 B→시편 D→시편 C 순으로 나타나는 것은 표 1에서 분석한 화학 성분 분석의 결과에서 알 수 있듯이 유리상의 양을 나타내는 SiO_2 조성의 차이로 인한 영향이 큰 것으로 판단된다. 한편 유리상의 양이 70-80% 이상이 되는 경우에는 유리상에 이동하는 알칼리 이온(Na^+ , K^+) 또는 알칼리 회토류 이온(Mg^+ , Ca^+)과 같은 점핑 이온의 분포에 의해 유전 손실이 결정된다[10]. 결국 알루미늄양을 17wt% 이하로 제조된 애자의 경우 유리상의 조성이 유전 손실의 증가에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

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. 기공 내에서 방전이 전체적인 절연 파괴에 이르는 기구는 다음과 같다. 방전이 발생한 기공 사이의 재료에서 응력이 증가하거나 방전이 발생하는 기공 근처의 재료에서 증가된 응력에 의해 기공과 기공 사이로 전파되면서 방전 띠를 형성하거나 방전에 의한 열 발

생이 직접적인 원인이 되어 파괴에 이르게 된 것으로 알려져 있다. 일반적으로 기공이 클수록 절연 파괴에 쉽게 이른다. 절연 파괴는 최대 수의 기공을 갖는 경로와 최소수의 결정상을 갖는 경로를 통해 발생한다[11]. 기공이 많은 표면을 갖는 애자는 비교적 낮은 절연 파괴 강도 특성을 보이는데 이것은 기공이 많아 파괴 경로를 제공할 확률이 증가하기 때문으로 생각된다.

그림 7은 시편의 절연 파괴 강도를 측정된 결과이다. 그림에서 보면 절연 파괴 강도가 알루미늄의 첨가로 인한 코런덤 결정상의 양의 증가 따라 비례하여 증가하지 않고 오히려 알루미늄양이 가장 적은 시편 A에서 높은 절연 파괴 강도가 나타나고 있다. 이것은 절연 파괴 내구성은 알루미늄, 석영, 플라이트와 같은 결정상의 강화 형태보다는 앞에서 설명한 기공의 상태 즉 상대 밀도값과 보다 직접적인 관계를 가지고 변화하는 것을 알 수 있다.

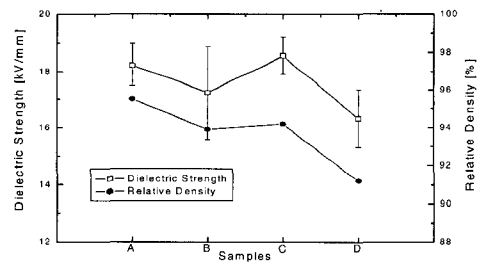


그림 7. 시편의 절연 파괴 강도 특성.
Fig. 7. Dielectric strength of samples..

3.3 HRB 경도 특성

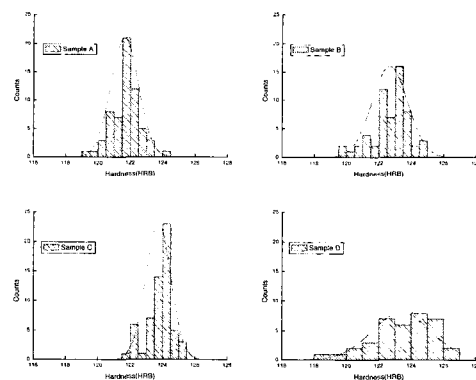


그림 8. 시편의 HRB 경도 특성.
Fig. 8. The hardness distribution of samples.

자기 소재는 크리스토팔라이트, 물라이트, 석영 및 알루미늄 등의 결정질과 비정질의 불균일한 유리상의 결합으로 구성되어 있다. HRB 경도 시험은 이러한 자기 조직에 경도계 압자를 가압하여 분쇄시켜 그 압자의 침입 깊이와 면적을 미세 조직 사진과 함께 관찰하여 결합 강도를 측정하는 방법이다. 따라서 이 시험은 결정상과 유리상 간의 결합력을 직접적으로 판단할 수 있으며 가압 충격에 의한 균열 진전을 미세 조직 사진으로 확인하므로 보다 미시적인 고강 상태를 추적할 수 있다. 비정질 유리 조직의 응력을 강화시키기 위해서는 물라이트나 고강도 알루미늄과 같은 결정입자를 풍부하게 분포시켜 소성이 이루어지면 가능하다[13,14].

그림 8은 각 시편에 대해 HRB 경도를 측정하여 분포 상태를 비교한 결과이다. HRB 측정값의 분포는 전반적으로 정규 분포(Normal distribution)를 나타낸다. HRB 경도의 평균 크기는 A(121.5)→B(122.6)→D(123.4)→C(123.7)순으로 높은 값을 나타낸다. 시편 A의 경우 평균 경도값이 121.5로 이는 일반적으로 제시되는 자기의 불건진 경도 기준값인 120이하의 값보다 높은 양호한 자기 특성값에 해당한다[12]. 특히 시편 C의 경우 HRB 경도가 123.7 정도의 값을 나타내고 있으며 분포 특성에서 가장 포아송 분포(Poisson distribution)에 가까운 형태를 나타내었다. 이상의 HRB 경도 시험 결과로부터 애자의 자기부의 경도 특성은 고강도 알루미늄의 첨가량이 늘어나면서 강화되어 개선되었던 것으로 판단된다.

한편 강구 압자가 가압된 자기 시편의 균열 진전에 관한 미세 조직 사진은 그림 9와 같다. 시편 A의 경우 경도값이 낮게 나타난 가압점(press point)로 가압 면적이 넓고 특히 주변 방사선 방향으로 균열의 진전이 크다. 이러한 구조의 자기 소재는 충격 스트레스가 가해지는 환경에 노출되면 취약한 손상으로 이어질 가능성이 높다. 이러한 균열 진전 현상은 알루미늄 첨가량이 높아 HRB 경도값이 높은 시편 C의 경우에도 발생하고 있다. 하지만 시편 D의 경우 가압점으로부터 방사선 방향의 균열 진전은 거의 발생하지 않고 억제된 현상을 잘 보여준다. 이러한 차이는 균열의 진전에 가장 큰 영향을 미치는 기공의 상태와 직접적인 관련이 있다. 시편 C의 경우 알루미늄의 강화로 강도 특성은 개선이 되었으나 시편 D와 비교하여 작은 기공의 수가 많이 분포하는 미세 구조를 갖는다. 기공율(상대밀도 96%)에서는 우수하지만 실제 스트레스에 의한 미세 크랙이 발생하는 경우 이를 억제하기 위해서는 기공간의 거리를 일정하고 가능하면 길게 유지하는 분포가 요구된다. 따라서 시편 D의 기공 분포가 미세 균열의 진전을 억제하는데 유리한 것으로 사료된다. 물론 균열의 진전을 억제하는 메카니즘은 복잡하다. 향후 앞에서 언급한 기공의 상태뿐 아니라 결정상의 종류와 크기 또한 관련하여 검토하는 것이 필요하다.

4. 결론

전력용으로 사용되는 고강도 자기재 애자를 알루미늄 조성을 달리한 4 종류의 시편을 제조하여 전기적, 기계적 특성을 시험하고 알루미늄계 자기재 소재의 고강도 특성과 미세 크랙의 진전에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) XRD 정량 분석 결과에 따르면 알루미늄 첨가량에 따라 결정상의 형태가 차이를 나타내었으며 충격 강도에 취약한 크리스토팔라이트 결정상이 거의 없이 코런던 결정상은 최고 17%까지 형성되었다. 이 시편의 경우 알루미늄 조성이 낮은 시편과 비교하여 상대밀도, 탄성을 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 유전상수를 유지하였다.

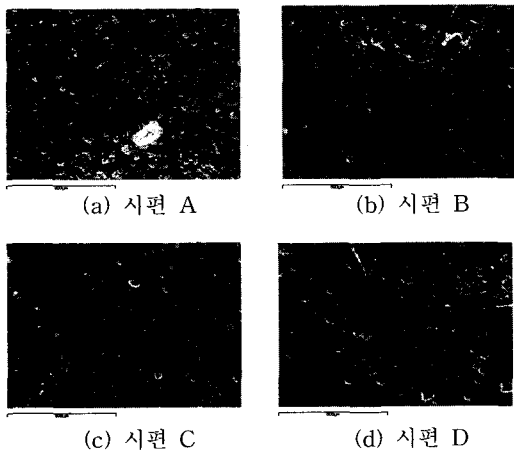


그림 9. HRB 경도 시험 가압점의 미세 조직 사진.
Fig. 9. The SEM picture of insulator surface from HRB test.

- 3)유전 손실 특성 실험에서 알루미늄나 양을 17wt% 이하로 제조된 애자의 경우 유리상의 조성이 유전 손실의 증가에 가장 큰 영향을 주었다.
- 4)절연 파괴 내구성은 알루미늄, 석영, 플라이트와 같은 결정상의 강화 형태보다는 자기 기공의 상태와 밀접한 관계를 갖는다.
- 5)자기의 미세 균열 진전 내구성을 확인하는 HRB 경도 시험 결과로부터 애자의 자기부의 경도 특성은 고강도 알루미늄의 첨가량이 늘어나면서 강화되었으며, 가압에 의한 방사선 균열의 진전은 기공의 분포에 따라 큰 차이가 있었다.

and mechanical simulation for designing porcelain insulators with high strength", International Conference on Electrical Engineering 2002, Vol. 3, 2002.

- [12] "배전선 절연 사고방비 대책", 일본전기협동연구, 27권, 3호.
- [13] 한세원, 조한구, 박기호, 이동일, 최인혁, "송전용 자기재 애자의 성능평가 및 가속열화시험" 전기전자재료학회논문지, 16권, 9호, p. 842, 2003.
- [14] 한세원, 조한구, 우병철, "송전용 자기재 애자의 시멘트 변위응력에 관한 시뮬레이션", 한국전기전자재료학회 2002년 추계학술대회논문집, 15권, p. 476, 2002.

참고 문헌

- [1] J. Bellerive, "Performance of porcelain insulator forty years experiences at Hydro Quebec", CEA Peper, March, 1990.
- [2] K. Morita, Y. Suzuki, and H. Nozaki, "Study on long term reliability of suspension insulators", T. IEE Japan, Vol. 117-B, No. 12, p. 1529, 1997.
- [3] 한국전력공사, "고신뢰성 자기재 배전용 현수 애자 개발" 최종보고서, 1996.
- [4] 한세원, 조한구, 강형부, "고강도 알루미늄질 애자의 미세 결정구조 강화에 관한 연구" 대한전기학회, 전기전자재료연구회, 춘계학술대회 논문집, p. 97, 2000(5).
- [5] R. Bartnikas, "Engineering Dielectrics", STP, 1987.
- [6] 일본전기학회통신교육부, "애자", 일본전기학회, Chap. 2, 1983.
- [7] W. E. Blodgett, "High strength alumina porcelains", Ceramic Bulletin, 40[2], 1961.
- [8] M. L. Altas, H. Nagao, and H. H. Nakamura, "Control of dielectric constant and loss in alumina ceramics", Journal of the American Ceramic Society, 45[10], 1962.
- [9] W. D. Kinger, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, "Introduction to ceramics", Wiley Interscience Publication, Chap. 11, 1976.
- [10] J. S. T. Looms, "Insulators for high voltages", IEE Power Engineering Series 7, 1988.
- [11] S. W. Han, H. G. Cho, T. Y. Kim, D. I. Lee, and I. H. Choi, "A study on electrical