

자기재 현수 애자의 HRB 경도 특성

한세원 조한구 박기호
한국전기연구원 신소재응용연구그룹

Stdy on HRB Characteristics of Suspension Porcelain Insulators

S. W. Han, H. G. Cho, K. H. Park

Korea Electrotechnology Research Institute, Advanced Electrical Materials Group

Abstract - The suspension insulators are subjected to harsh environment in service for a long time. Long term reliability of the insulators is required for both mechanical and electrical performances. We studied HRB characteristics to find out a deformation of suspension porcelain with alumina contents. These experimental results show that HRB intensity was affected severely by alumina contents, and the propagation properties was affected mainly by a distribution and shape of micro pores on porcelain samples.

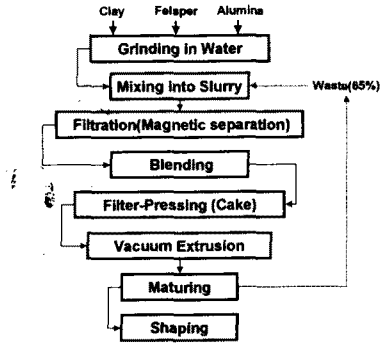


그림 1. 자기재 애자의 제조 공정

1. 서 론

자기애자의 시험법에서 재질에 기인한 불량요인을 판정하는 방법으로 냉열시험과 흡습시험이 대표적이다. 하지만 이 시험만으로 자기 애자에 내재하는 불량요인을 완전히 발견하기란 쉽지않다. 애자자기 시험에 대하여 HRB(Hardness of Rockwell B scale) 경도를 측정하는 방법을 도입하면 자기소지의 결합강도를 확인하면서 경도의 크기와 분포를 가지고 제품의 상태를 판정할 수 있다. 경도계의 B 스케일 강구(1/16인치 강구, 100 kg 하중)를 사용하여 애자에 내재하는 불량유무를 확인한다. 자기애자는 유리상 매트릭스에 코런덤, 석영, 크리스탈라이트 및 몰라이트 등의 결정상과 기공이 분산된 조직을 갖는다. 불균질한 결정상에 HRB 시험에 따라 강구가 압착되면 그 부위가 파쇄된다. 이때 압착되는 강구의 침투깊이가 HRB 경도크기로 나타나는데 이는 자기의 결정 입자간의 결합강도를 나타낸다. 이러한 방법은 비커스(Vicker) 경도 측정법과는 달리 가압면적이 넓고 주변 기공과 결합과의 결합된 균열(cracks)의 진전을 확인할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서 자기재 현수 애자의 알루미늄 첨가량이 다른 시편에 대하여 HRB를 측정하여 애자의 미세균열의 진전과 경년상태를 집중 연구하였다.

2. 실험 방법

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

알루미나 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), 크리스탈라이트(Cristobalite), 몰라이트(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. 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 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. 그림 2는 HRB 특성 시험 장치와 시편 상태를 나타낸 것이다.

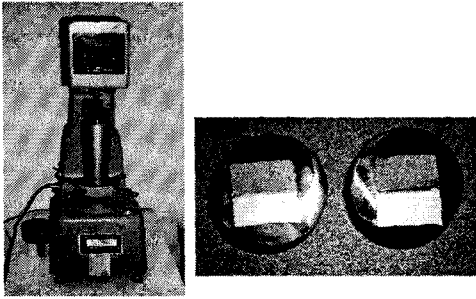


그림 2. HRB 특성 시험 장치와 시편 상태

3. 결과 및 고찰

3.1 결정상 분석

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)은 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 감소시켜 나타난 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°C 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 측정 한 결과이다. 시편 C의 경우 다른 시편과 비교하여 상대 밀도, 탄성률 및 파괴 인성 등에서 상대적으로 우수한 특성값을 갖는 것으로 나타났다. 그림 3은 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

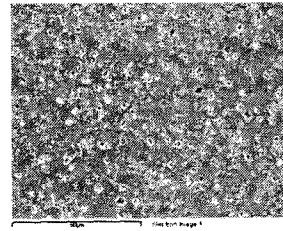


그림 3. 시편의 미세 조직 SEM 사진(시편C)

3.2 HRB 경도 특성

그림 4는 자기애자 시편(A, B, C, D)에 대해 HRB 경도를 측정하여 크기와 분포 상태를 분석한 결과이다. 경도의 평균 크기는 A→B→C(D) 순으로 높은 값을 나타낸다. A 시편의 경우 평균 경도값이 121.5로 이는 구주전력에서 제시하는 자기의 불건전 경도 기준값인 120이하의 값보다 높은 양호한 자기 특성값에 해당한다. 특히 최근에 제작된 시편 C의 경우 HRB 경도가 약124정도로 D 시편과 거의 대등한 값을 나타내고 있으며 분포 특성에 매우 우수한 값으로 나타났다. 알루미늄 함유량이 17%로 제작된 시편 B의 경도는 다른 시편과 비교하여 상당히 낮게 나타났다. 이것은 최상의 알루미늄 입자 강화가 이루어지지 않은 상태를 보여준다.

이상의 시험 결과로부터 애자의 HRB 경도 특성은 고강도 알루미늄 입자의 강화 더불어 개선되어진 것으로 판단된다.

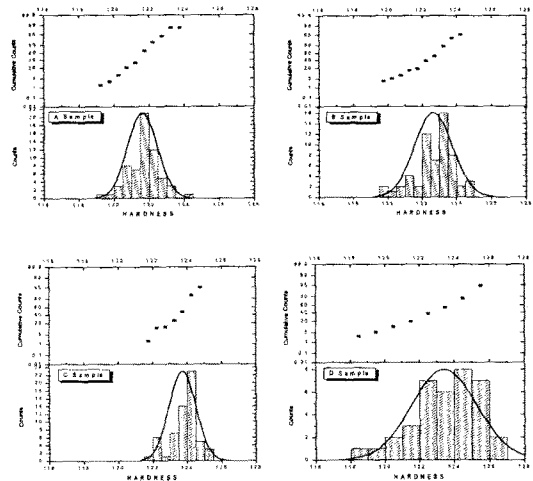


그림 4. 시편(A, B, C, D)의 HRB 경도 특성 분포

3.3 HRB 미세균열 진전 특성

한편 HRB 시험에서 강구 압자가 가압된 자기 시편의 미세 조직 사진은 그림 5와 같다. 시편 A의 경우 경도 값이 낮게 나타난 가압점(press point)로 가압 면적이 넓고 특히 주변 방사선 방향으로 균열의 진전이 크다. 이러한 자기 소재는 충격 스트레스가 가해지는 환경에 노출되면 취약한 손상으로 이어질 가능성이 높다. 반면 시편 D의 경도값이 높게 나타난 가압점으로 상대적으로 면적이 좁고 방사선 방향의 균열의 진전이 억제되는 현상을 잘 보여준다.

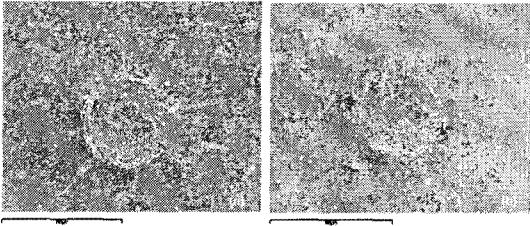
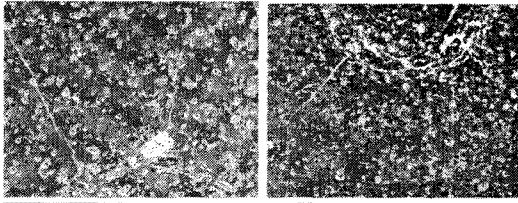
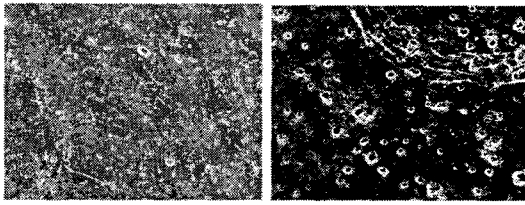


그림 5. 가압점 미세 조직 사진 (a)시편A,(b)시편D



(a) 시편A (b) 시편B



(c) 시편C (d) 시편D

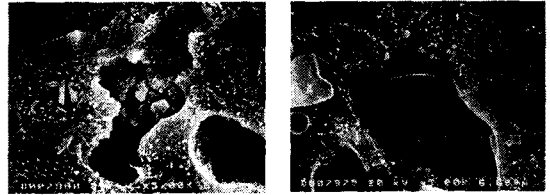
그림 6. HRB 경도 시험 가압점의 미세 균열 진전 상태

강구 압자가 가압된 자기 시편의 균열 진전에 관한 미세 조직 사진은 그림 6과 같다. 시편 A의 경우 경도 값이 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.

미세 균열 진전 현상은 알루미늄이 첨가량이 높아 HRB 경도값이 높은 시편 C의 경우에도 발생하고 있다. 하지만 시편 D의 경우 가압점으로 부터 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. 앞에서 언급한 기공의 상태뿐 아니라 결정상의 종류와 크기 또한 관련하여 검토하는 것이 필요하다.

3.4 미세 균열 억제

그림 7(a),(b)는 자기 애자 시편의 파단면으로 기계적, 열적 충격이 가해질 때 미세 균열을 진전 혹은 억제하는 결정 구조의 상태를 나타낸다. 고강도 알루미늄이 자기 애자의 경우는 미세한 알루미늄 입자의 분산으로 제조되기 때문에 제조공정에서 입자의 편석(agglomeration)이 발생할 가능성이 크다. 이 경우 분산 강화 효과가 저하되고 개 기공(open pores)의 형성되어 크랙의 진전이 용이하게 된다. (b)의 경우 열처리 과정에서 발생하는 결정 입자와 매트릭스 간의 열팽창 차이로 인한 미세 크랙이다. 주로 석영상의 계어로 억제되는데 이러한 크랙이 많으면 충격 강도 특성은 낮아지고 특히 지속적인 충격이 가해지는 경우 크랙의 진전 경로로 작용하게 된다.



(a)입자편석 (b) 미세균열

그림 7. 자기애자 시편의 파단면

미세 균열의 진전을 억제하기 위해서는 기공의 균일한 분포와 원형의 미세 구조가 요구된다. 결정 입자간의 분포가 균일하고 매트릭스와 결정상 사이에 적절한 섬유 형태의 플라이트 상이 분포하여 상호 보완하는 구조가 유리하다.

4. 결 론

자기재 현수 애자의 알루미늄이 첨가량이 다른 시편에 대하여 HRB를 측정하여 애자의 미세균열의 진전과 경년상태를 집중 연구하였다. HRB 경도 시험 결과, 경년 품인 A 시편의 경우 평균 경도값이 121.5로 이는 자기 소재의 불건전 경도 기준값인 120이하의 값보다 높은 양호한 특성값을 나타내었다. 이것은 HRB 경도 특성은 고강도 알루미늄 입자의 강화 더불어 개선되어진 것을 알 수 있다. 미세 균열 진전 현상은 알루미늄이 첨가량이 높아 HRB 경도값이 높은 시편 C의 경우에도 발생하고 있다. 하지만 시편 D의 경우 가압점으로 부터 방사선 방향의 균열 진전은 거의 발생하지 않고 억제된 현상을 잘 보여준다. 이러한 차이는 균열의 진전에 가장 큰 영향을 미치는 기공의 상태와 직접적인 관련이 있는 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1]Y. Yamada, "Slow crack growth of mullite ceramics", 일본세라믹협회, 논문지, 99(6), 1991
- [2] K. Morita, "Study on long term reliability of suspension insulators", 일본전기학회, 논문지B, 117(12), 1997
- [3]J. S. T. Looms, "Insulators for high voltages", IEE Power Engineering Series 7, 1988
- [4]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