

## 슬러리의 안정화가 애자의 물리적 특성에 미치는 영향

### Effect of the Physical Property of Insulator on the Slurry Stability

안용호\*, 최연규\*\*, 송병기\*\*\*, 한병성\*\*\*\*

(Yong-Ho Ahn\*, Yeon-Gyu Choi\*\*, Byoung-Ki Song\*\*\*, Byoung-Sung Han\*\*\*\*)

#### Abstract

This paper was researched the effect of slurry stability on the mechanical and electrical property of the porcelain insulator with various raw materials such as feldspar, quartz, clay and 17wt% alumina. The slurry was fabricated after ball milling the mixed raw materials. Green compacts were made by the extrusion and were sintered at 1300°C for 60min in the tunnel kiln. All of the specimens were densified 96% of the theoretical density. The 3-point flexural strength( $\sigma_B$ ) of the specimen stabilized slurry pH 7.8 was 1650 kg/cm<sup>2</sup> and the vickers hardness(Hv) and the fracture toughness(K<sub>IC</sub>) were 27.5 GPa and 2.2 MPa·m<sup>1/2</sup>, respectively. The mechanical properties of the specimen stabilized slurry pH 9.3 were 1716 kg/cm<sup>2</sup>( $\sigma_B$ ), 27.6 GPa(Hv) and 3.0 MPa·m<sup>1/2</sup>(K<sub>IC</sub>), respectively. The dielectric strength was increased from 8.3kV/mm to 13.2kV/mm as the increase of the slurry pH from 7.8 to 9.3. Therefore the physical properties of the specimen stabilized slurry pH 9.3 were improved.

**Key Words** : alumina porcelain, insulator, slurry stability, fracture toughness, dielectric strength, dielectric constant.

#### 1. 서론

현재 고압 전력용 절연물로 사용하는 자기 애자(porcelain insulator)는 제조 원료에 따라 장석질 애자, cristobalite질 애자, 알루미나질 애자로 구분될 수 있다. 애자 제조의 초기 제품으로 가장 많이 사용되었던 장석질 애자는 장석, 점토, 규석(silica flint)으로 구성되어지며, 보통 1200~1250°C에서 소결한다[1]. 이미 알려진 바와 같이 장석질 애자는 규석을 함유하고 있기 때문에 시유취입강도는

600~1000kg/cm<sup>2</sup>로 기계적 강도가 매우 낮다. Cristobalite질 애자는 높은 소성온도(1250~1300°C)로 인하여 석영상이 cristobalite로 상이 전이되어 cristobalite 결정상을 15~40% 함유하고 있으며, 그 외에도 mullite와 미량의 석영상으로 구성되어 있다. 그러므로 시유취입강도는 1000~1400 kg/cm<sup>2</sup>로 장석질 애자의 기계적 강도 보다 높다 [2-5]. 그러나 열팽창율이 높고 220°C 부근에 cristobalite에 의한 팽창의 굴곡점이 있으므로 열충격에 대한 저항이 낮은 단점이 있다. 최근에는 장석질 자기 애자의 성능을 개선하기 위해 장석질 자기 애자에 알루미나를 10~40wt% 첨가하여 알루미나질 애자를 제조하고 있으며, 이 자기의 시유취입강도는 1200~1700kg/cm<sup>2</sup> 으로 장석질 자기의 취입강도보다 약 두 배 향상되었다[6-8]. 장석질 자기의 취입강도보다 알루미나질 자기의 취입강도

\* : 한전 전력연구원  
(대전시 유성구 문지동 103-16,  
Fax : 042-865-5844  
E-mail : yhan@kepri.re.kr)

\*\* : 고려애자공업(주)

\*\*\* : 삼영중앙기술연구소

\*\*\*\* : 전북대학교 전기공학과 교수

2001년 8월 24일 접수, 2001년 9월 19일 1차심사완료

2001년 10월 19일 2차심사완료

가 높은 원인은 알루미늄이 가진 높은 탄성율과 고유강도 때문이다. 따라서 알루미늄의 함유량이 많고, 석영이 적을수록 강도는 높다.

오늘 날 산업의 발전은 전기에너지의 급격한 수요를 증가시켰고, 이러한 전력수요 증가를 대처하기 위해 154kV, 345kV인 송전전압을 765kV로의 승압송전이 진행되고 있으며, 일부가 현재 시험운영 중이다. 이와 같은 송전전압의 상승은 전력선의 도체수(2, 4도체→6도체)를 증가시켰고, 이로 인해 전선의 무게가 증가하였으므로 보다 더 높은 기계적 성질을 가진 애자를 요구하고 있다.

본 연구에서는 장식질 애자소지에 17wt% 알루미늄을 첨가하여 장식질 애자의 물리적 특성을 향상시키고, 또한 슬러리의 안정화가 애자의 기계적, 전기적 성질에 미치는 영향을 조사하고, 최적의 조건을 만족하는 슬러리를 제조하여 보다 더 우수한 물리적 성능을 갖는 알루미늄질 애자를 개발하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 출발원료 및 성형체와 소결체 제조

국내 애자 회사에서 사용하고 있는 도석, 장식, 점토(Kyoritsu Ceramic, Japan), 알루미늄(Nippon Light metal, Japan)로 구성된 원료로부터 자기 애자 소지를 제조하였다. 본 연구에서 사용한 소지의 배합비율은 도석 22wt%, 장식 21wt%, 점토 40wt% 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 17wt%을 혼합한 것이다. 애자 소지는 배합비율에 따라 원료를 칭량한 후 6시간 ball milling 하였다. Ball milling한 슬러리는 질산(HNO<sub>3</sub>)과 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 이용하여 정전기적(electrostatic)방법으로 안정화시켰으며, 탈철과 filter press한 후 압출 성형기(extrusion)로 성형체를 제작하였다. 이 성형체를 60℃ 오븐에서 24시간 건조한 후 1300℃, 60분 동안 터널가마에서 소결하였다. 애자의 결정상 및 절연파괴전압을 측정하기 위해 정전기적으로 안정화된 슬러리를 오븐에서 건조시킨 후, 50mesh로 파쇄한 분말을 이용하여 일축 가압 성형법으로 시편을 제조하였다.

### 2.2 분석 및 측정

#### 2.2.1 입자크기 분석

분쇄한 분말의 입자크기는 레이저를 이용한 입도분석기 mastersizer(Malvern, England)로 측정하

였다. 입자크기를 측정하기 위해 슬러리를 정전기적으로 안정화(electrostatic stable suspension)시켰으며, 2~3wt%의 슬러리를 사용하였다.

#### 2.2.2 X-선 회절분석

혼합 분쇄된 소지를 1300℃에서 열처리한 후 결정상의 변화를 관찰하기 위해 X-선 회절분석기(X'Pert, Philips, Netherlands)로 CuK $\alpha$ , 40kV-30mA, Scan speed 3°/min 조건하에서 회절각(2 $\theta$ ) 10~70° 범위에서 분석하였다.

#### 2.2.3 기계적 특성 측정

소결밀도는 ASTM C20에 따라 Archimedes 원리를 이용하여 측정하였다. 꺾임강도를 측정하기 위해 직경 15mm, 길이 150mm MOR-bar 시편을 제작하였고, 꺾임강도시험기 AFG-250N (Mecmesin, England)를 이용하여 3점 꺾임강도를 측정하였다. 이 때의 크로스헤드의 속도는 0.1mm/min 이고, 사용한 시편은 각각 15개였다. 경도 및 파괴인성을 측정하기 위해 시편을 15, 9, 6, 3, 1 $\mu$ m 다이아몬드 페이스트에서 차례로 경면 연마하였다. 경도(H<sub>v</sub>)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)[9](136Vickers indenter, Mitutoyo, Japan)[.]으로 측정하였다. 이 때 하중은 10kg, 유지 시간은 10sec로 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<sub>IC</sub> : 파괴인성

#### 2.2.4 전기적 특성 측정

절연파괴시험을 측정하기 위해 소결한 시편의



의 주된 spinel상과 소량의 mullite가 생성되고, 1150°C에서는 발열반응으로 인하여 mullite와 미량의 cristobalite가 생성된다.

### 3.2 슬러리 거동의 특성

DLVO[12] 이론에 의하면 수용액에 분산된 입자들의 거동이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 용액 중에 분산된 입자들의 상호작용력에 의해서 입자들의 엉킴(coagulation) 또는 분산(dispersion) 현상이 일어난다. 습식방법을 통하여 성형할 경우 슬러리에 분산되어 있는 입자들이 서로 엉킴 현상이 일어나지 않도록 주의해야 한다. 입자들의 엉킴 현상으로 인하여 슬러리의 viscosity가 증가하고, 성형한 성형체의 충전 밀도가 낮아지며, 이로 인하여 소성한 소결체의 밀도가 낮다. 따라서 이 소결체의 물리적 성질 또한 낮다. 슬러리를 이용하여 애자를 제조할 경우 슬러리의 상태가 애자의 물리적 특성에 매우 중요한 요인으로 작용하기 때문에 용액 중에 분산된 입자들의 엉킴현상이 일어나지 않도록 슬러리를 안정화시켜야 한다. 슬러리를 안정화시키는 방법에는 다음과 같은 세 가지 방법들이 연구되었다[13].

- 1) 정전기적 안정화법(Electrostatic stabilization)
- 2) 입체적 안정화법(Steric stabilization)
- 3) 일렉트로스테릭 안정화법  
(Electrosteric stabilization)

본 연구에서는 첫 번째 방법인 정전기적 방법(electrostatic stabilization)으로 슬러리를 안정화시킨 후 성형체를 제조하였다.

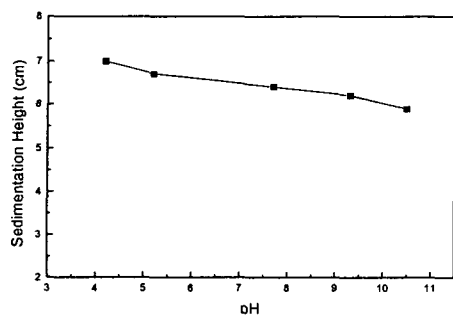


그림 3. 슬러리 pH가 침전높이에 미치는 영향.  
Fig. 3. Effect of variation of slurry pH on the sedimentation height.

슬러리의 안정화 상태를 조사하기 위하여 볼 밀(ball mill)법으로 분쇄한 슬러리에 질산(HNO<sub>3</sub>)과 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 이용하여 슬러리의 pH 값을 변화시켰다. 슬러리의 pH 값에 따라 변화하는 점도(viscosity)를 측정하여 안정화 정도를 조사할 수 있고, 또 유리시험관에 장시간 방치하여 생긴 침전 높이를 통하여서도 조사할 수 있다[14]. 시간에 따라 변화하는 침전의 높이를 조사하기 위해 pH를 적정한 슬러리를 14 일간 유리시험관에 보관한 후 측정된 침전의 높이를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 pH가 10.4일 때 침전의 높이는 5.8cm이고, pH가 4.3일 때 침전의 높이는 7.1cm로 산성에서 알칼리쪽으로 갈수록 침전의 높이는 감소하는 경향이 있다. 침전의 높이가 낮다는 것은 mono- 또는 bimodal 형태의 입도를 갖는 분말들이 치밀하게 충전하여 분말과 분말 사이에 발생하는 공극(void)이 적다는 것을 알 수 있다. 즉 pH를 9~10으로 적정한 슬러리로 제조한 성형체의 성형 밀도는 pH를 4~5로 적정한 슬러리로 제조한 성형체의 성형밀도보다 높다. 따라서 높은 성형밀도를 가지고 있는 성형체를 소성하면 높은 소결밀도를 나타낼 수 있다.

슬러리의 안정화도를 측정할 수 있는 또 다른 방법은 pH가 viscosity에 미치는 영향을 조사함으로써 판단할 수 있다. 슬러리의 pH가 viscosity에 미치는 영향을 조사하기 위하여 질산과 암모니아를 이용하여 슬러리의 pH를 변화시켰고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

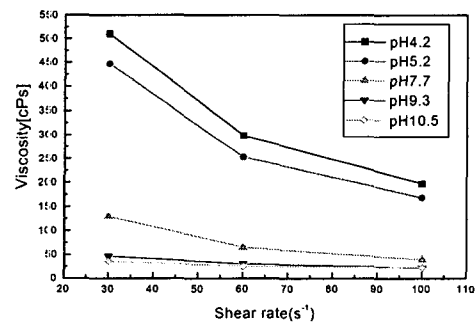


그림 4. 슬러리 pH 변화가 점도에 미치는 영향.  
Fig. 4. Effect of variation of slurry pH on the viscosity.

그림 4에서 보여주는 것처럼 슬러리의 viscosity

는 pH에 따라 크게 변화한다. 전단응력이 증가할수록 모든 슬러리의 viscosity는 감소하는 의사탄성(pseudoplastic) 거동을 나타내고 슬러리의 pH 값이 산성(pH ≈ 4) 쪽으로 갈수록 viscosity는 증가하는 반면 알칼리(pH ≈ 10) 쪽으로 갈수록 viscosity가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 따라서 침전높이와 viscosity 측정 결과에 의해 슬러리의 pH가 7.5~9.5 정도 일 때 슬러리가 안정화되었음을 알 수 있다. 슬러리의 안정화 정도가 애자의 물리적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 본 연구에서는 암모니아를 이용하여 슬러리의 pH 값을 7.8, 8.3 및 9.3으로 변화시켜 슬러리를 제조하였다. pH 값을 변화시킨 슬러리를 이용하여 애자를 제조한 후 애자의 기계적, 전기적 성질을 측정함으로써 가장 우수한 물리적 성질을 나타내는 슬러리의 pH를 선택할 수 있다.

**3.3 애자의 기계적 특성**

슬러리의 pH를 7.8, 8.3 및 9.3으로 적정한 후 압출법(extrusion)으로 성형체를 제조하였다. Mercury porosimetry로 측정한 각 성형체의 밀도는 이론밀도의 약 60~65%이었다. 이 성형체는 냉간정수압(cold isostatic pressing, CIP)법으로 성형한 성형체의 밀도보다 더 높은 밀도를 나타내었다. 즉, 건식방법으로 성형체를 제조할 때 발생할 수 있는 입자들의 응집(agglomerate)을 습식방법에서는 슬러리를 안정화시킴으로서 분말의 응집을 제거할 뿐 아니라 분말이 잘 분산되어 성형체의 밀도를 높일 수 있었다. 온도에 따른 밀도 변화를

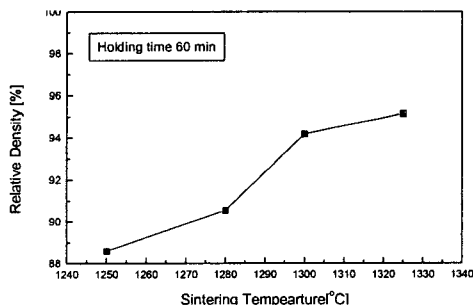


그림 5. 슬러리 pH 7.8로 제작한 시편의 소성 온도가 밀도에 미치는 영향.

Fig. 5. Effect of sintering temperature on relative density for specimen of pH 7.8.

관찰하기 위해 pH를 7.8로 적정하여 제조한 성형체를 1250~1325°C, 60분동안 전기로에서 소성하였으며, 소결 시편의 상대밀도는 gas pycnometer를 이용하여 측정한 이론밀도로 계산하였다.

그림 5는 소성온도에 따른 소결밀도를 나타낸 것이다. 소성온도가 높을수록 소결밀도는 증가하였으며, 1325°C에서 소결한 시편의 소결밀도가 이론밀도의 약 96%에 도달하였다.

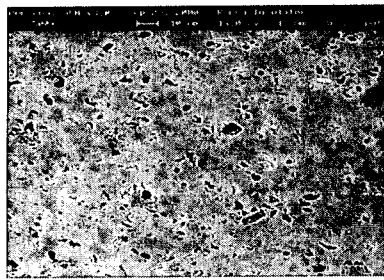
1300°C, 60분동안 전기로에서 소결한 시편의 소결밀도가 95%TD 이상으로 가장 치밀한 미세조직을 나타내었으므로 애자 제품을 직접 생산하는 터널가마에서 슬러리의 pH를 7.8, 8.3 및 9.3으로 적정하여 제조한 성형체를 1300°C에서 60분 동안 소결하였다. Archimedes방법으로 계산한 소결체의 상대밀도는 표 1에 나타낸 것처럼 슬러리의 pH에 관계없이 거의 일정한 값을 보여주었다.

표 1. 슬러리 pH가 상대밀도에 미치는 영향.  
Table 1. Effect of relative density on the slurry pH.

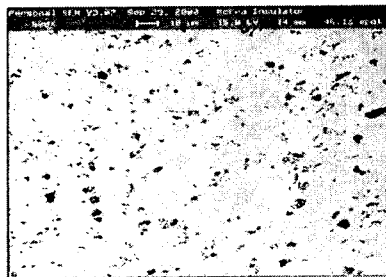
Slurry pH	Sintering Temperature [°C]	Absolute Density [g/cm³]	Relative Density [%]
7.8	1300	2.51	95.0
8.3	1300	2.53	95.9
9.3	1300	2.55	96.5

그림 6은 1300°C, 60분 동안 터널가마에서 소결한 각 시편의 표면을 미세연마 후 주사전자현미경(SEM)으로 기공의 분포를 관찰한 것이고, 그림 7은 10% HF 용액으로 5분 에칭한 후 미세조직을 조사한 것이다. 슬러리의 pH를 7.8로 적정하여 제조한 시편의 평균 기공크기가 pH를 9.3으로 적정하여 제조한 시편의 평균 기공크기보다 크다는 것을 그림 6에서 볼 수 있다. 소결밀도는 거의 동일하더라도 슬러리의 안정화 정도에 따라 기공의 크기가 달라지는 것을 알 수 있다.

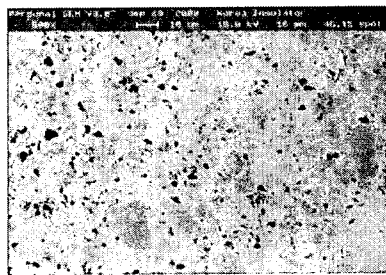
X-선 회절 분석 실험 결과에서 나타난 것처럼 침상구조인 mullite, 다각형인 quartz와 알루미늄 결정상 및 매트릭스인 비정질 유리상을 그림 7에서 볼 수 있다. 슬러리의 pH를 7.8, 8.3 및 9.3으로 적정하여 제조한 시편의 기계적 성질을 표 2에 요약하였다. 슬러리의 pH가 7.8에서 9.3으로 높아질수록 꺾임강도, 경도 및 파괴인성 값은 증가하는 경향을 보여주었으며 pH 9.3일 때 무유한 시편의



(a)



(b)



(c)

그림 6. 터널가마에서 1300°C, 60분 소성한 자기의 SEM사진.

[(a) 슬러리 pH 7.8, (b) 슬러리 pH 8.3, (c) 슬러리 pH 9.3].

Fig. 6. SEM photographs of porcelain sintered at 1300°C for 60min in tunnel kiln.

[(a) Slurry pH 7.8, (b) Slurry pH 8.3, (c) Slurry pH 9.3].

취임강도 1716kg/cm<sup>2</sup>, 경도 27.6 GPa, 파괴인성 3.0 MPa · m<sup>1/2</sup> 로 가장 우수한 기계적 성질을 나타내었다.

즉 알루미나를 17wt% 첨가한 후 슬러리를 안정화시켜 제조한 시편의 기계적 성질은 알루미나를 약 40wt% 첨가한 시편의 기계적 성질 (1700kg/cm<sup>2</sup>)과 거의 동일한 우수한 기계적 성질을 나타내었다.

표 2. 슬러리 pH가 기계적특성에 미치는 영향.

Table 2. Effect of mechanical property on the slurry pH.

Slurry pH	Flexural Strength [kg/cm <sup>2</sup> ]	Vickers Hardness [GPa]	Fracture Toughness [MPa · m <sup>1/2</sup> ]
7.8	1650 ± 46	27.5	2.2
8.3	1648 ± 48	39.4	2.7
9.3	1716 ± 76	27.6	3.0

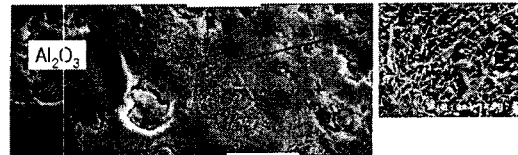


그림 7. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 17wt% 포함한 시편을 1300°C, 60분동안 소결한 자기의 미세조직.

Fig. 7. SEM photograph of 17wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contained porcelain sintered at 1300°C for 60 min in tunnel kiln.

### 3.4 전기적 특성

전기적 성질을 조사하기 위하여 슬러리의 pH를 7.8로 적정하여 제조한 시편의 주파수에 따른 유전 특성을 측정된 값을 그림 8에 나타내었다. 80°C이하의 온도에서는 약 4 정도의 안정적인 유전상수 값을 나타내고 있으나 80°C이상의 고온에서는 열 에너지가 증가함에 따라 이온의 이동과 결정결함에 의한 기여로 인하여 유전상수가 증가하는 것을 알 수 있었다[15]. 그림 9는 슬러리의 pH를 7.8로 적정하여 제조한 시편의 주파수에 따른 tan δ의 온도의존성을 나타낸 것이다. 온도가 증가할수록 유전상수나 손실인자가 증가하면서 전도손실과 이온점프에 의한 손실이 증가하여 유전손실이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. DIN, ASTM[16]에서

는 100°C까지의 변화에 대해 유전손실의 값이  $120 \times 10^{-3}$  정도의 범위일 때 안정된 특성으로 제시하고 있으며, 본 실험결과에서는 100°C에서 약  $17 \times 10^{-3} \sim 61 \times 10^{-3}$  범위로 양호한 값을 나타내고 있다.

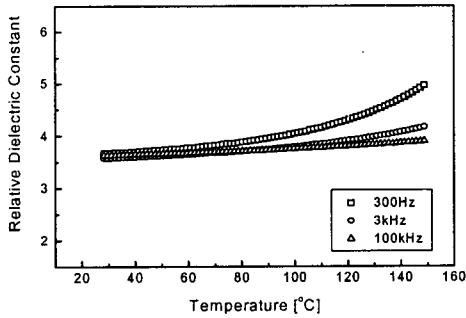


그림 8. 슬러리의 pH 7.8인 시편의 온도에 따른 유전상수.

Fig. 8. Relative dielectric constant of slurry pH 7.8 on the temperature.

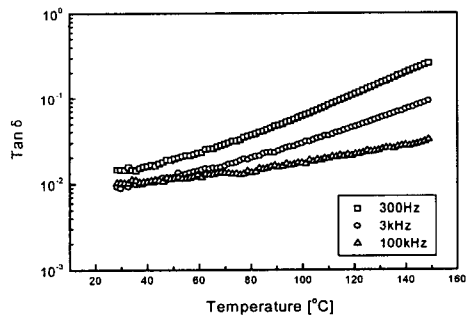


그림 9. 슬러리의 pH 7.8인 시편의 온도에 따른  $\tan \delta$ .

Fig. 9.  $\tan \delta$  of slurry pH 7.8 on the temperature.

유전상수와 유전손실의 변화는 슬러리의 pH에 관계없이 거의 동일한 결과를 나타내었다. 그림 10은 슬러리의 pH에 따른 절연파괴전압을 측정하는 것이다. 소결밀도는 슬러리의 pH에 관계없이 거의

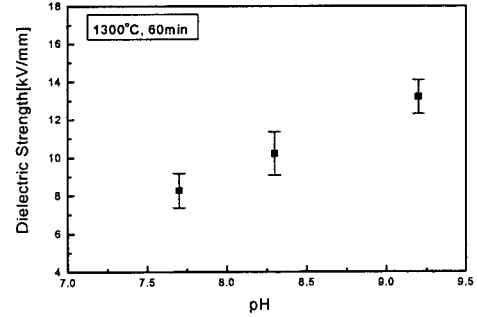


그림 10. 슬러리의 pH에 따른 절연파괴 특성.

Fig. 10. Effect of dielectric strength on the slurry pH.

동일하지만 슬러리의 pH에 따른 절연파괴전압은 pH가 7.8에서 9.3으로 높아질수록 절연파괴전압은 8.3kV에서 13.2kV로 증가하는 경향을 보여준다.

즉, 동일한 소결밀도를 가지고 있더라도 그림 6에서 보는 것처럼 미세조직 상에서 평균기공의 크기가 pH 9.3일 때 가장 적기 때문에 절연파괴전압이 증가하였다.

#### 4. 결론

장석, 도석, 점토에 17wt%  $Al_2O_3$ 을 첨가하여 슬러리를 제조한 후 슬러리의 pH에 따른 애자의 기계적, 전기적 성질을 조사하였다. 소결밀도는 이론밀도의 약 96%에 도달하였고, 슬러리의 pH가 7.8일 때 꺾임강도는  $1650 \text{ kg/cm}^2$ , 파괴인성은  $2.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  이었으나 9.3일 때 꺾임강도는  $1716 \text{ kg/cm}^2$ , 파괴인성은  $3.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 을 나타내었다. 또한, 절연파괴전압은 슬러리의 pH가 7.8일 때 8.3kV를 나타내었으나 9.3일 때는 13.4kV로 높은 절연특성을 보여주었다.

따라서 장석질 애자 소지에 17wt% 알루미늄을 첨가하여 장석질 애자의 기계적 성질(꺾임강도  $600 \sim 1000 \text{ kg/cm}^2$ , 파괴인성  $1.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )보다 우수한 기계적 특성을 나타내는 알루미늄질 애자를 제조하였으며, 슬러리를 안정화시켜 절연파괴전압을 8.3kV(pH 7.8)에서 13.4kV(pH 9.3)로 향상시켰다.

참고 문헌

- [1] W. M. Carty and U. Senapati, "Porcelain -raw Materials, Processing, Phase Evolution and Mechanical Behavior," *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**(1), pp. 3-20, 1990.
- [2] K. Hamano, Z. Nakagawa and M. Hasegawa, "Improvement of Mechanical Strength of Porcelain Bodies by Grinding of Raw Materials," *J. Ceram. Soc Jpn.(in Jpn)*, **100**(8), pp. 1066-1069, 1992.
- [3] J. E. Schroeder, "Inexpensive High Strength Electrical Porcelain," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **57**(10), pp. 526, 1978.
- [4] L. Mattyasovszky-Zsolnay, "Mechanical Strength of Porcelain," *J. Am. Ceram. Soc.*, **40**(9), pp. 299-306, 1957.
- [5] B. Zivanovic, S. Isakovski, M. Aleksic, N. Hajdukovic, J. Cinkler and J. Ranogajec, "Electroporzellan Mit Sehr Guten Mechanischen Eigenschaften," *Keram. Zeitschrift*, **32**(7), pp. 367-369, 1980.
- [6] S. K. Khandelwal and R. L. Cook, "Effect of Alumina Additions on Crystalline Constituents and Fired Properties of Electrical Porcelains," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **49**(5), pp. 522-526, 1970.
- [7] W. E. Blodgett, "High Strength Alumina Porcelains," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **40**(2), pp.74-77, 1961.
- [8] 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.*, **17**(11), pp 88-98, 1996.
- [9] 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.*, **1**, pp 13-16, 1982.
- [10] J. F. Duncan and K. J. D. Mackenzie, "Kinetics and Mechanism of High-temperature Reaction of Kaolinite Minerals," *J. Am. Ceram. Soc.*, **52**(2), pp 74-77, 1969.
- [11] A. K. Chakraborty and D. K. Ghosh, "Reexamination of the Kaolinite-to-mullite Reaction Series," *J. Am. Ceram. Soc.*, **61** (3-4), pp. 170-173, 1978.
- [12] R. G. Horn, "Surface Forces and Their Action in Ceramic Materials," *J. Am. Ceram. Soc.* **73**[5] pp. 1117-1135, 1990.
- [13] C. J. Brinker and G. W. Scherer, "Sol-Gel Science," Academic Press, pp. 235-250, 1990.
- [14] C. H. Schilling, I. A. Aksay "Sedimentation in Flocculating Colloidal Suspensions," *J. Mater. Res.* Vol.9 [2], pp. 451-461, 1994.
- [15] 김병훈 외 9명 공역, "세라믹스 총론," 반도체출판사, pp. 371 - 429, 1991.
- [16] 김형식, "고신뢰성 자기제 배전용 현수예자 개발(중간보고서)," 전력연구원, 1995.