

자기제 현수애자의 미세구조분석과 유전특성에 관한 연구

論 文
48C-9-7

A Study on the Microstructure Analysis and Dielectric Properties of Porcelain Suspension Insulators

金 燦 泳* · 金 周 勇** · 宋 一 根*** · 李 丙 成§
(Chan Young Kim · Ju Yong Kim · Il Keun Song · Byung Sung Lee)

Abstract - The paper provides the results of microstructure analysis and dielectric properties of porcelain suspension insulators. The evaluation of characteristics was also made as a function of the manufacturers and fabricated years for the experimental specimens which had been used in real distribution lines. Even though the series A contained higher alumina contents than the series B, the densification of series A was lower than that of series B, resulting from much porosity. The microstructure investigation confirmed that series A had much porosity than series B. The series A contained quartz (SiO_2), mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), corundum (Al_2O_3), and cristobalite (SiO_2) phases. However, the series B had no cristobalite phase which had very high thermal expansion coefficient. Also, the $\tan \delta$ of series A was more abruptly increased than that of series B as increasing temperature. The elevated temperature may make much expansion of cristobalite crystal than other crystals, resulting in crack and puncture inside cap during the summer days.

Key Words: Suspension insulator, Porcelain, Glaze, Crystalline phase, Microstructure, Porosity

1. 서 론

자기제 현수애자는 1909년경에 최초로 설계된 이후로 배전선로에 널리 보급되었다. 자기제 애자의 신뢰성은 자기의 전기 및 기계적 특성에 크게 영향을 받는다. 자기제 애자에 사용되는 자기는 크게 장석질 자기와 비장석질 자기로 나눌 수 있다 [1, 2, 3]. 장석질 자기는 비용이 싸고 제작하기가 쉬운 장점이 있으나, 일반적으로 유전손실이 높다. 이처럼 유전손실이 큰 이유는 장석에 알카리 금속이온이 많이 포함되어 있기 때문이다 [4].

최근에는 장석질 자기의 성능을 개선시키기 위하여 기존의 장석질 자기에 알루미늄을 첨가한 알루미늄 함유자기 개발되어 사용되고 있다. 비장석질 자기는 불순물이 적어서 유전손실이 적다. 하지만, 소성 범위가 좁기 때문에 제작하기가 어렵다. 비장석질 자기는 steatite ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$), forsterite ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$), cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$), zircon based ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$), alumina (Al_2O_3), beryllia (BeO) 등 종류가 매우 다양하다. 현재 배전선로에 사용되고 있는 현수애자는 장석질 자기와 장석질 자기에 알루미늄을 넣은 알루미늄 함유자기 두 종류로 구성되어 있

다. 본 연구에서 사용된 자기는 모두 알루미늄 함유 자기이다.

자기제 현수애자는 자기부, 금구부 그리고 자기와 금구를 결합하는 집합부(시멘트)로 구성되어 있다. 열화는 시멘트의 팽창과 금구의 부식 등에 의하여 주로 일어나고, 사용조건(지역별, 오손별)에 따라 경년열화의 속도가 다르며, 청정지역의 경우는 열화가 느리게 진행된다. 자기부는 자기와 유약으로 나눌 수 있고, 이들은 경년열화가 거의 일어나지 않지만, 염해 또는 진해 등의 외부 환경에 의하여 표면이 오손되어 고장을 유발하기도 한다.

자기는 제조과정 중에 생성된 크고 많은 기공 때문에 전기, 기계적인 신뢰성이 저하된다. 예를 들면 기공이 많이 내포된 자기는 기계적 충격에 의한 파손과 전기적으로 절연과 파괴되어 고장이 발생하기 쉽다.

자기의 외부에 도포된 유약은 자기를 압축응력으로 감싸고 있어, 애자의 기계적 특성을 향상시킨다 [5]. 이와 같이 유약에 압축응력이 걸리게 하기 위해서는 유약의 열팽창계수를 자기의 열팽창계수보다 약간 작게 한다. 그러나 만일 유약과 자기의 열팽창 차이가 너무 크면, 섬락에 의한 온도 상승 등 급격한 온도변화가 일어날 때, 유약이 자기로부터 박리될 수도 있다.

이와 같이 자기제 현수애자의 전기·기계적 특성은 자기, 시멘트, 유약에 의존하고 있다. 따라서 국내 배전선로에 사용되고 있는 애자의 신뢰성을 평가하고, 성능을 향상시키기 위해 재료분석은 필수적이라 할 수 있다. 국내 배전선로에서 사용되는 현수애자 고장의 대부분이 자기와 유약에서 주로 발생되기 때문에 본 논문에서는 자기와 유약에 대하여 집중적으로 특성분석을 하였다.

*正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員 · 工 博

**正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員

***正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員 · 工 博

§正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 研 究 員

接 受 日 字 : 1999 年 4 月 6 日

最 終 完 了 : 1999 年 8 月 11 日

2. 시료 및 실험방법

2.1 시료

국내 배전선로에서 실제로 사용되었던 현수애자를 제작회사에 따라 A사와 B사로 구분하였고, A사 시료는 1988년 이후에, B사 시료는 1970년대 중반 이후에 각각 제작되어 실선로에 사용 중이던 것들을 임의로 수거하였으며, 신품애자는 한국전력공사 검수시험에 합격된 시료를 사용하였다.

2.2 실험방법

자기를 이루고 있는 산화물들의 함량을 유도결합 플라즈마 발광 분광기 (ICP-AES)로 분석하여 정량화 하였다. ASTM C169-92, C1301-95 방법에 따라, 유약이 없는 자기부분만을 분쇄하여 분말로 만들고, LiBO₂와 함께 1000 [°C]에서 30분 동안 완전히 용융한 다음 각각 묶은 질산으로 용해하여 일정량을 만들어 분석하였다. 자기의 밀도를 Archimedes 방법으로 측정하였으며, 자기를 분말로 만들어 Rigaku사의 x-ray diffractometer (XRD)로 x-선 회절 패턴을 측정하여 결정상을 분석하였다.

자기와 유약의 미세구조는 시료를 3 [μm] 크기의 다이아몬드가 혼합된 현탁액으로 연마하고, 이온 증착기 (ion sputter coater, JEOL, JFC-1100E)로 금 (Au)을 증착시켜, JEOL사의 전자현미경 (SEM ; JSM-5410)으로 관찰하였다.

유전특성은 두 가지 방법으로 측정하였다. 첫째는 애자에 상용주파수로 10 [kV]까지의 교류전압을 인가하면서 상온에서 측정하였다. 둘째는 자기를 두께 1~2 [mm] 시편으로 절단하여, 시료의 상부와 하부에 직경 15 [mm] 크기로 금전극을 증착시켜, Novocontrol사에서 제작한 유전열분석기 (Dielectric Thermal Analyzer)로 온도를 -40 ~ 60 [°C]까지 변화시키면서 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시료의 산화물 분석

시료에 사용된 산화물의 종류 및 사용량을 유도결합 플라즈마 발광 분광기로 분석하여, 각 시료의 밀도, 미세구조, 유전특성 등과 연관지어 해석하였다. 표 1에 A사 및 B사 시료의 정량분석 결과를 나타냈다. 분석 결과에 따르면, A사 시료는 B사 시료보다 알루미늄이 많은 것으로 나타났다.

알루미늄은 점토 (clay) 및 장석 (feldspar) 등의 원료에 함유되어 있기도 하지만, 자기의 내아크성, 내충격성 및 내구성 등의 특성을 향상시키기 위하여 인위적으로 첨가한다. B사 시료에 특히 많이 포함되어 있는 실리카 (SiO₂)는 소성과정 중 장석이 액상으로 변하여 점도가 낮아졌을 때 성형체의 형태를 유지하도록 도와주고, 기계적 특성과 유전특성을 향상시킨다.

알루미늄과 실리카를 제외한 성분들은 소량씩 (3 [%] 이내) 포함되어 있으며, 이들 중에서 산화 포테시움 (K₂O)은 B사 시료, 그 밖의 산화물들은 A사 시료에서 각각 많게 포

함되어 있는 것으로 나타났다. 소량씩 포함된 성분 중에서 알칼리 금속이온(Na⁺, K⁺)을 포함한 산화물들은 유전성질에 큰 영향을 주기 때문에 적게 함유하는 것이 바람직하다 [3].

표 1 A사 및 B사 시료의 정량적 분석

Table 1 Quantitative analysis of series A and B

(wt. %)

산화물	A사 시료		B사 시료
	'96년	'97년	'97년
SiO ₂	59.4	57.5	63.1
Al ₂ O ₃	36.3	37.8	31.6
CaO	0.7	0.7	0.3
MgO	0.2	0.3	0.1
Fe ₂ O ₃	0.8	1.1	0.7
TiO ₂	0.5	0.6	0.3
Na ₂ O	1.1	1.0	0.9
K ₂ O	0.9	1.1	2.9

3.2 밀도 분석

시료의 소결상태, 개기공의 체적률, 그리고 폐기공에 대하여 고찰할 목적으로 Archimedes 방법으로 밀도를 측정하였다. 밀도는 각 시료를 3개씩 측정하여 평균값을 취하였다. 시편은 다이아몬드 커터로 자기를 약 5 × 10 × 10 [mm³] 정도의 크기로 절단하여 사용하였다. 시편의 건조상태 무게와 개기공이 액체로 채워진 상태의 무게가 비슷한 점으로 미루어, A사 및 B사 시료 모두 개기공의 체적률이 매우 적고, 기공은 폐기공을 형성하고 있던 것으로 판단된다. 일반적으로 장식질 자기의 기공이 폐기공을 형성하고 있으면 이론적 밀도(theoretical density)의 약 94 [%] 이상의 밀도를 갖게되므로, 자기의 소결상태는 양호하였던 것으로 생각된다.

A사 시료의 밀도는 제작년도에 따라 점점 증가하는 추세이고, B사 시료는 '95년과 '96년 모두 2.5 [g/cm³]으로 A사 시료보다 높다. 단순히 밀도만 생각하면 '97년 기준으로 A사 시료는 B사 시료에 비하여 98.4 [%] 정도 치밀한 구조를 가지고 있다. 밀도의 치밀함을 알기 위하여 이론적 밀도의 계산이 필요하나, 자기체 애자에 포함되어 있는 유리상 및 모든 결정의 종류와 양을 알아야 하기 때문에 이론적인 밀도를 계산하기는 매우 어렵다.

표 1의 정량분석 결과, A사 시료는 B사 시료보다 알루미늄 함량이 많다. 알루미늄의 밀도는 3.99 [g/cm³]으로 다른 산화물에 비하여 크기 때문에, 함량이 많으면 밀도가 증가하므로, A사 시료의 밀도가 높아야 하지만 오히려 B사 시료의 밀도가 높다. 결과적으로 A사 시료는 B사 시료보다 구조가 덜 치밀하다는 것을 의미한다. 다시 말하면, A사 시료에 존재하는 기공이 B사 시료 보다 크거나 많다는 것을 나타낸다.

그림 1에 A사와 B사 시료의 밀도를 제작년도에 따라 나타냈다. A사 시료는 제작년도에 따라 밀도가 증가하였다. 제작년도에 따라 밀도가 증가한 이유는 두 가지 측면으로

추정할 수 있다. 첫째는 성형조건이 제작년도에 따라 달라 결정상과 유리상의 생성비율이 달랐을 가능성이 있다. 둘째는 제작년도에 따라 각각의 원료 조성비율이 달라 결정상과 유리상의 생성비율이 틀려졌기 때문으로 추정된다. 다시 말하면 제작년도에 따라 산화물의 함량이 다른 원료로 교체 사용하였거나, 원료 조성비를 바꾸었기 때문에 밀도가 달라진 것으로 판단할 수 있다.

정량분석 결과에 따르면 최근에 제작된 제품일수록 알루미늄의 함량이 많은 것으로 미루어, A사 제품의 원료 조성비가 변해 밀도가 향상되었던 것으로 판단되며, 밀도가 꾸준히 증가된 것은 바람직하다고 할 수 있다.

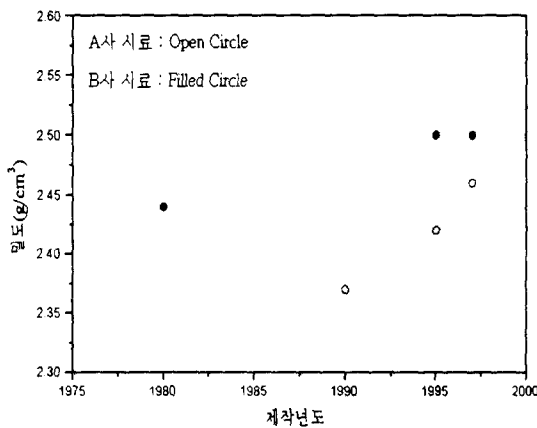


그림 1 제작년도에 따른 시료의 밀도

Fig. 1 Densities of specimens as a function of fabricated year

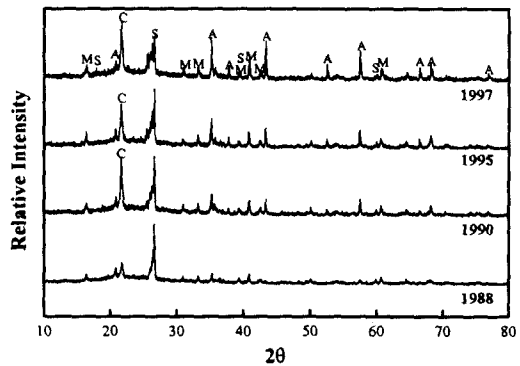
3.3 시료의 결정 분석

시료에 포함되어 있는 결정들은 자기의 기계적, 전기적 특성에 큰 영향을 미치므로, A사의 '88, '90, '95, '97년 및 B사의 '75, '80, '95, '97년 시료의 자기에 포함되어 있는 결정을 x-선 회절 분석기(XRD)로 측정하여 분석하였고, 그 회절 패턴을 그림 2에 나타냈다. 그림에서와 같이 2θ가 약 23° 부근에서 아몰퍼스피크가 나타난 것으로 미루어 A사 및 B사 시료 모두 유리상(amorphous phase)을 포함하고 있다. A사 시료는 최근 ('97년)에 제작된 애자에서 결정을 많이 포함하고 있는 것으로 나타났다. cristobalite (SiO₂) 결정은 원료로 사용되는 점토 및 장석에 함유된 실리카에서 성장하였고, quartz (SiO₂) 결정은 quartz 결정을 이루고 있는 도석을 원료로 사용함으로써 나타났다. corundum (Al₂O₃) 결정은 내아크성, 내충격성 및 내구성 등을 향상시키기 위하여 다른 원료와 함께 첨가되었으며, mullite (Al₆Si₂O₁₃) 결정은 점토 및 장석에서 성장하였다.

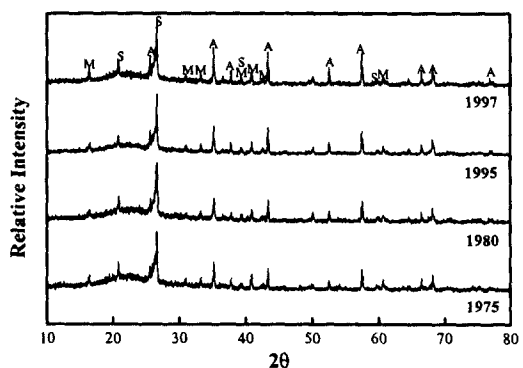
1988년 제조된 A사 시료를 보면 cristobalite 결정은 없으나 quartz 결정을 많이 포함하고 있다. mullite와 corundum 결정량은 아주 소량 포함하고 있어, 전체적으로 생각할 때 유리상의 비율이 상대적으로 높음을 알 수 있다. 또한 자기의 내부에 층이 관찰되었는데 이것은 소성조건이 적합하지 않아서 생성된 것으로 판단된다. 1990년 이후에 제작된 시

료들은 mullite, quartz, corundum과 cristobalite 결정을 포함하고 있는데, 이들 중에서 cristobalite 결정은 열팽창계수가 크기 때문에 온도상승시 응력이 집중되어 자기균열의 원인이 될 수 있다. 그리고 quartz와 cristobalite 결정의 회절강도 크기가 제작년도에 따라 다른데 이것은 두 가지 측면으로 생각할 수 있다. 첫째는 소성온도가 제작년도에 따라 달라 생성된 결정량이 다르기 때문이다. 둘째는 사용하는 원료의 조성비가 제작년도에 따라 달라서 생성되는 결정량이 다를 수 있다. 이것은 3.2 절에서 설명하였던 것과 같이 제작년도에 따라 밀도 차이가 있었던 것과 같은 이유이다.

B사 시료는 1975년 이후 제작된 시료 모두 mullite, quartz, corundum 결정을 포함하고 있으며, A사 시료에 포함되어 있는 열적으로 취약한 cristobalite 결정은 생성되지 않았다. '95년과 '97년 시료의 밀도 및 x-선 회절 패턴을 비교하여 볼 때, 두 시료는 동일한 원료로 제작된 것으로 생각된다.



(a) A사 시료 (series A)



(b) B사 시료 (series A)

그림 2 제작년도에 따른 x-선 회절 패턴 [A:corundum, C:cristobalite, M:mullite, S:quartz]

Fig. 2 X-ray diffraction patterns as a function of fabricated year [A:corundum, C:cristobalite, M:mullite, S:quartz]

3.4 미세구조 분석

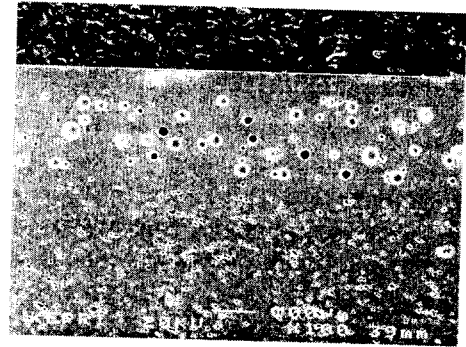
3.4.1 유약의 미세구조

자기의 외부에 도포되어 있는 유약은 애자의 기계적 특성을 향상시키고, 우천시 빗물의 흐름을 원활하게 하며, 오손이 덜 되도록 하며 또 오손된 표면이 빗물에 잘 씻겨나가도록 매끄럽게 제작되어야 한다. A사 및 B사 시료의 유약 단면과 표면을 관찰한 결과는 다음과 같다.

A사 시료의 유약 두께는 제작 년도에 따라 220 ~ 300 [μm]으로 다양하였다. 유약 두께가 다르다는 것은 제조공정시 유약의 점도가 달라 단위 면적당 부착되는 유약의 양이 다르다는 것을 의미한다. 또한 유약에 포함되어 있는 원형의 secondary phase의 크기가 그림 3(a)와 같이 불균일하고 커서 외부의 충격에 의하여 쉽게 균열이 발생되고 진전될 수 있다. 그림 4는 secondary phase가 커서 경계면에 균열이 형성된 것을 보여주고 있고, 이것은 유약과 secondary phase의 열팽창 차이에 의하여 균열이 형성된 것으로 추정된다. 또한 자기와 유약의 열팽창계수 차이가 크면 섬락 등의 이유에 의하여 온도상승시 자기로부터 유약이 박리되어 그림 5와 같이 될 수 있다.

B사 시료의 유약 구조는 제작년도에 따라 300 [μm] 정도를 유지하고 있으며, 그림 3(b)와 같이 기공의 크기가 작고 균일하다.

유약표면의 미세구조를 SEM으로 관찰한 결과에 따르면, 그림 6(a),(b)와 같이 A사의 일부 시료에서는 미세결정이 표면전체에 걸쳐 성장하였지만, 대부분의 시료에서는 전혀 성장하지 않았다. B사 시료의 표면에도 미세결정이 성장하였지만, 그림 6(c)와 같이 매우 적게 성장한 것으로 나타났다. 그림 6(b)에 선으로 표시된 미세결정의 에너지 분산 스펙트럼(EDS)을 그림 7(a), 선 분석(Line Analysis) 결과를 그림 7(b)에 각각 나타냈다. 미세결정의 주요 성분은 산화철이고, 크롬과 망간이 포함되어 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 약 4 [μm] 이하의 미세결정이 애자 표면에 넓게 성장하여 있다면 표면에 광택이 없어지고 굴곡이 생겨, 오손물이 부착되기 쉽고, 우천시 물의 흐름을 방해하여, 오손물과 함께 전도대를 형성함으로써 섬락을 쉽게 일으킬 우려가 있으므로 미세결정이 성장하지 않도록 주의를 하여야 한다.



(b) B사 시료 (series B)

그림 3 유약의 미세구조 ('97)
Fig. 3 Microstructure of glaze ('97)

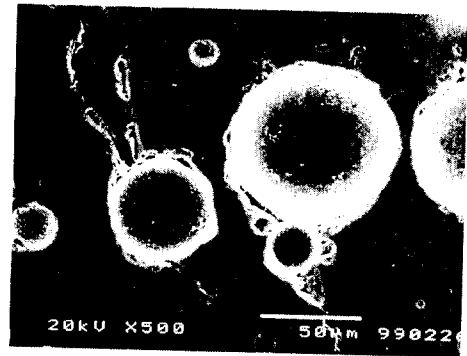
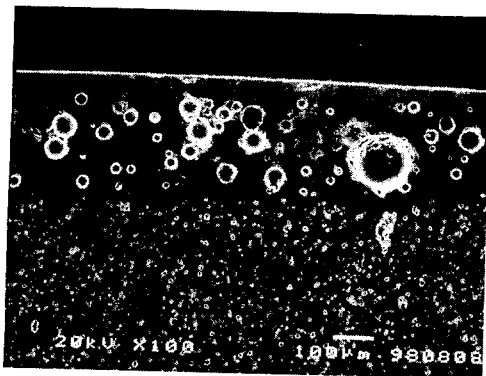


그림 4 유약에 존재하는 secondary phase와 균열의 진행 (A사 시료)

Fig. 4 Secondary phase and propagation of cracks on the glaze(series A)



(a) A사 시료 (series A)

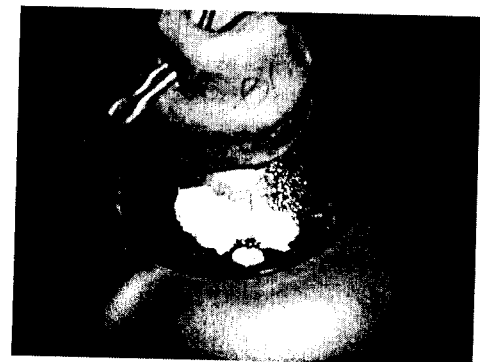
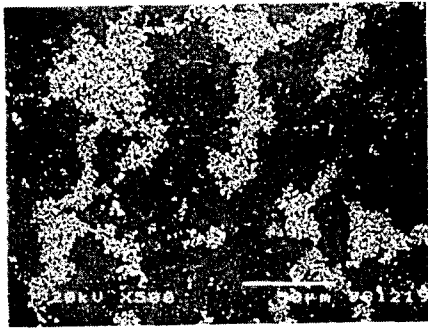
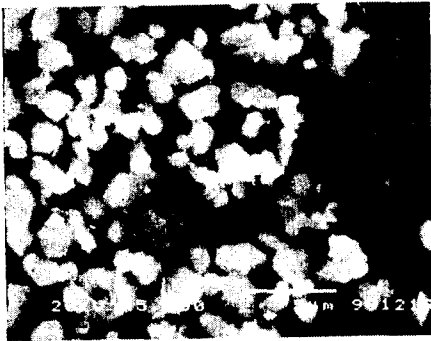


그림 5 유약의 박리

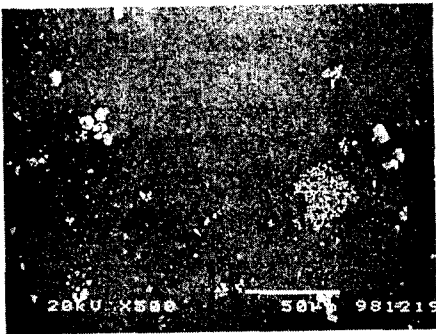
Fig. 5 Separation of glaze



(a) A사 시료 (× 500배)

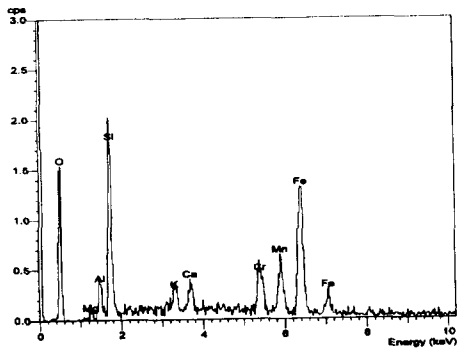


(b) A사 시료 (× 5000배)

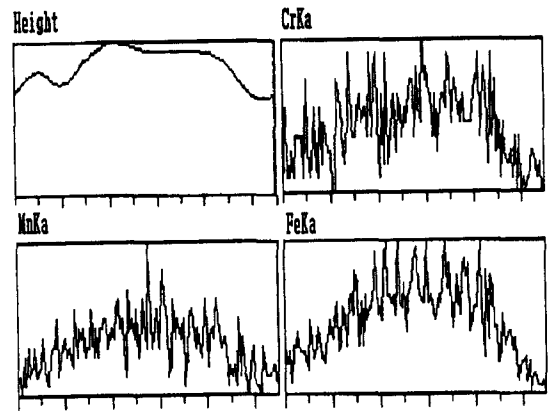


(c) B사 시료 (× 500배)

그림 6 유약 표면에 존재하는 미세결정
Fig. 6 Micro-crystal on the surface of glaze



(a)



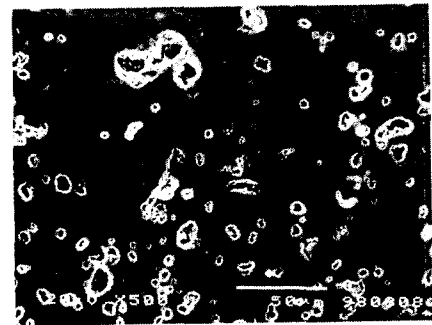
(b)

그림 7 미세결정 : (a) EDS 분석, (b) 선 분석 (표면높이와 성분)

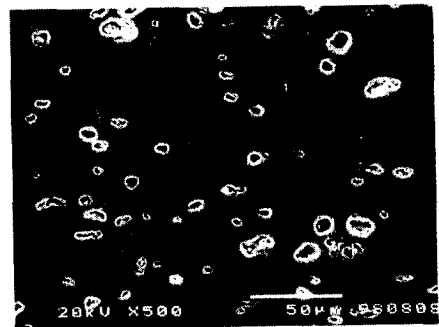
Fig. 7 Micro-crystal : (a) EDS Analysis, (b) Line Analysis (surface height and component)

3.4.2 자기의 미세구조

자기에 포함된 기공은 자기의 기계적 특성에 많은 영향을 미치므로, 기공의 크기와 분포를 SEM으로 관찰하였고, 그림 8(a),(b)에 A사 및 B사 시료의 미세구조를 각각 나타냈다.



(a) A사 시료 (series A)



(b) B사 시료 (series B)

그림 8 자기의 미세구조 ('97)

Fig. 8 Microstructure of ceramics ('97)

A사 시료의 기공 크기와 분포는 제작 년도에 관계없이 B사 시료보다 크고 불균일하였다. 앞 절에서 언급했던 것과 같이 A사 시료는 B사 시료에 비하여 밀도가 98.4 [%] 정도로 나타났고 ('97년 시료), 이것은 A사 시료의 미세구조에 나타난 것과 같이 기공이 크고 많기 때문이다.

3.5 유전 특성

그림 9에 경년에 따른 A사 및 B사 시료의 $\tan \delta$ 변화를 나타냈다. $\tan \delta$ 는 완품의 시료에 상용주파수로 10 [kV]의 교류전압을 인가하고 측정하였다. 그림에 보여진 것처럼 A사 시료의 $\tan \delta$ 는 약 0.059로써 1 ~ 2년간 사용된 것과 7년 정도 사용된 것에는 큰 차이가 없었다. 다만 같은 제작 년도에 만들어진 것일지라도 $\tan \delta$ 값의 변동폭이 컸다. B사 시료의 $\tan \delta$ 는 약 20년 전에 만들어진 시료가 약 0.054 그리고 최근에 만들어진 시료는 약 0.048로 나타났으며, $\tan \delta$ 의 변동폭이 A사 시료에 비하여 작았다. $\tan \delta$ 의 변동폭이 작은 것은 시료의 재질이 균일하기 때문인 것으로 판단된다. 20년 전에 만들어진 B사 시료의 $\tan \delta$ 가 최근에 만들어진 것보다 큰 것이 자기의 열화에 의한 것인지는 좀 더 연구가 필요하다.

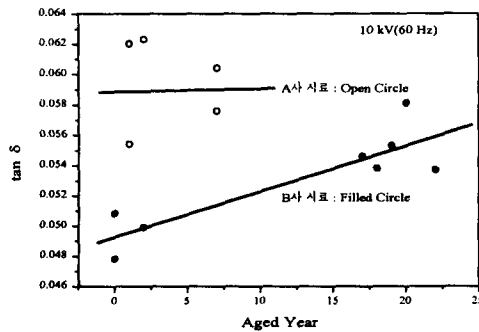


그림 9 경년에 따른 $\tan \delta$ 의 변화

Fig. 9 Variation of $\tan \delta$ as a function of aged years

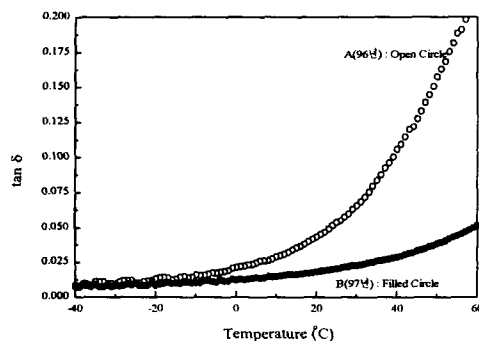


그림 10 온도에 따른 $\tan \delta$ 의 변화

Fig. 10 Variation of $\tan \delta$ as a function of temperatures

그림 10에 시편의 $\tan \delta$ 변화를 온도의 증가에 따라 나타냈다. A사와 B사의 $\tan \delta$ 는 저온에서는 비슷하지만 온도가 올라갈수록 A사 시료의 $\tan \delta$ 는 급격히 증가하였다. 여름철 대기의 온도가 약 30 [°C]일 경우 전압을 인가하지 않은 상태에서 애자 표면의 온도는 약 40 [°C]로 실측되었다[6]. 따라서 애자에 전압이 인가되면 온도가 이 보다 높을 것으로 생각되며, 만일 애자의 온도가 60 [°C]일 경우 A사 시료의 $\tan \delta$ 는 약 0.2 그리고 B사 시료의 $\tan \delta$ 는 약 0.05로 4배 이상 큰 것으로 나타났다.

$\tan \delta$ 는 유전손실을 나타내는 파라미터이므로 온도가 증가하면 A사 시료의 $\tan \delta$ 가 더 빨리 증가하게 되고 B사 시료보다 많은 열이 발생되어, 온도상승을 가속시키는 것으로 판단된다. 결국 같은 대기온도에서 A사 애자의 온도는 B사 애자의 온도보다 높으며, A사 애자에만 포함되어 있는 열팽창계수가 큰 cristobalite 결정이 더 팽창을 하여 응력이 집중되고, 결국 자기가 파손되는 것으로 판단된다. 이것이 여름철 A사 애자에 두부 균열 및 관통고장이 일어나는 주요 원인으로 추정된다.

4. 결론

국내 배전선로에서 사용되는 현수애자의 자기와 유약을 제작년도 및 제작회사별로 구분하여 재료물성 측면에서 분석하였다. 분석한 결과에 따르면, A사 시료에 비하여 B사 시료의 특성이 우수한 것으로 나타났다. A사 시료는 최근에 제작된 것일수록 성능이 향상되었으며, B사 시료는 제작년도에 따라 특성 변화가 적었다. 본 연구에서 수행한 특성분석 결과는 다음과 같다.

- [1] A사 시료는 밀도가 높은 알루미늄을 많이 포함하고 있음에도 불구하고 B사 시료 보다 밀도가 낮다. 하지만 A사 시료의 밀도는 최근에 제작된 애자일수록 크다. 이것은 알루미늄의 함량이 증가되었기 때문으로 판단된다.
- [2] B사 시료는 유리상에 mullite, quartz, corundum 결정이 포함되어 있고, A사 시료는 위의 결정과 함께 열팽창계수가 큰 cristobalite 결정도 포함하고 있다. 따라서 B사 시료는 A사 시료에 비하여 열적으로 안정하다.
- [3] 자기의 미세구조 관찰 결과에 따르면 A사 시료보다 B사 시료에서 기공이 작고 균일하게 분포되어 있다.
- [4] A사 시료의 일부 유약 표면에 미세결정이 넓게 성장하였다. 미세결정이 성장하면, 애자 표면에 굴곡이지어 오손을 가중시킬 것으로 판단된다.
- [5] A사 시료는 B사 시료보다 $\tan \delta$ 가 크고 동일 년도의 제품일지라도 변동폭이 컸다. 최근에 제작된 B사 시료의 $\tan \delta$ 는 20년 전에 제작된 제품에 비하여 $\tan \delta$ 가 매우 낮다.

참 고 문 헌

- [1] 송일근 외, 배전기자재의 수명예측 기준제정, 전력연구원, 중간보고서, 1998, pp. 139-166.
- [2] 김형식 외, 고신뢰성 자기재 배전용 현수애자 개발, 한국전기연구소, 최종보고서, 1996, pp. 13-71.

- [3] W. D. Kingery, *Introduction to Ceramics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960, pp. 417-457.
 - [4] P.W.McMillan, *Glass-Ceramics*, Academic Press, 1979, pp. 200-222.
 - [5] 河村達雄 外, *がいし*, 日本電氣學會, 1983, pp. 117 and pp. 144.
 - [6] 김상준 외, 배전용 애자류 품질확보를 위한 경년 시험방법에 관한 연구, 전력연구원, 최종보고서, 1996, pp. 74-75.
-

저 자 소 개



김 찬 영 (金 燦 泳)

1962년 9월 6일생. 1989년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 미국 콜로라도 스톨 어브 마인즈 재료공학 졸업(석사). 1997년 동 대학원 재료공학 졸업(공학). 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구

Te : (042) 865-5922

E-mail : kimcy@kepri.re.kr

김 주 용 (金 周 勇)

전기학회논문지 제47권 제8호 참조

Tel : (042) 865-5923

E-mail : kimjy@kepri.re.kr

송 일 근 (宋 一 根)

전기학회논문지 제47권 제4호 참조

Tel : (042) 865-5920

E-mail : iksong@kepri.re.kr



이 병 성 (李 丙 成)

1968년 8월 17일생. 1993년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 연구원

Tel : (042) 865-5924

E-mail : leebs@kepri.re.kr