

400kN 송전용 현수애자의 특성연구

최인혁*, 신태우**, 최연규***, 민병욱**, 이동일*
 *한전 전력연구원, **한국전력공사, ***고려애자(주)

A Study on Characteristics of Suspension Insulator for 400kN Transmission Lines

I.H. Choi*, T.W. Shin**, Y.G. Choi***, B.W. Min**, D.I. Lee*
 *KEPRI, **KEPCO, ***KRI

Abstract - The 400kN suspended insulator was fabricated with feldspar, quartz, clay and Al₂O₃ wt% for extra high voltage. These materials were grinded with ball milling for 25 hours after mixing them. The grinded materials were sintered at 1300°C for 50 minutes in the tunnel kiln after mading with jiggering method. The sintered density of specimen was reached at 97% in comparison with that of theory. The specimen had the characteristic of temperature rise with the increase of electrical losses. Also, the flexural strength and the fracture toughness of sintered parts respectively were 1658 kg/cm² and 2.3 MPa · m^{1/2}.

1. 서 론

오늘 날 산업의 발전과 문화생활의 발달에 따라 전기에 너지의 수요가 급격하게 증가하고 있어 원격지에 위치한 발전소로부터 도시 및 산업현장까지 대용량 에너지의 장거리 송전이 필요하게 되었다. 따라서 국내에서는 154kV 및 345kV인 송전전압을 765kV로의 송압송전이 계획 중에 있다. 이와 같은 송전전압의 상승은 전력선의 도체수(2, 4도체 → 6도체)를 증가시켰고, 이로 인해 전선의 무게가 증가하였으므로 보다 더 높은 기계적 및 전기적 성질을 가진 초고압용 애자의 개발을 요구하고 있다.

본 연구에서는 기존의 장식질 애자 또는 cristobalite질 애자[1-7] 보다 더 우수한 알루미늄질 애자 즉, 장식질 애자소지에 17wt% 알루미늄을 첨가하여 애자의 물리적 특성을 향상시켜 초고압용 애자인 400kN 애자를 개발하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 출발원료 및 애자제조

도석, 장식, 점토(Kyoritsu Ceramic, Japan), 알루미늄 (Nippon Light metal, Japan)로 구성된 원료로부터 자기 애자 소지를 제조하였다. 본 연구에서는 도석 22wt%, 장식 21wt%, 점토 40wt% 및 Al₂O₃ 17wt%을 혼합한 소지를 사용하였다. 애자 소지는 배합비에 의해 따라 원료를 칭량한 후 25시간 ball milling 하였다. Ball milling한 슬러리는 탈철과 탈수 공정을 거친 후 진공도련기를 이용하여 cake를 만들었다. 이 cake로 jiggering법을 이용하여 애자를 제조하였다. 애자를 최적의 조건에서 약 48시간 건조한 후 1300°C에서 50분 동안 터널가마에서 소결하였다.

2.2 분석 및 측정

2.2.1 입자크기 분석

분쇄한 분말의 입자크기는 레이저를 이용한 입도분석기 mastersizer (Malvern, England)로 측정하였다. 입자크기를 측정하기 위해 슬러리를 정전기적으로 안정화 (electrostatic stable suspension)시켰으며 2~3wt%의 슬러리를 사용하였다.

2.2.2 X-선 회절분석

1300°C에서 50분 동안 소성한 자기의 결정상 변화를 관찰하기 위해 X-선 회절분석기(X'Pert, Philips, Netherlands)로 CuKα, 40kV- 30mA, Scan speed 3°/min 조건하에서 회절각(2θ) 10~70°범위에서 분석하였다.

2.2.3 기계적 특성 측정

소결밀도는 ASTM C20에 따라 Archimedes 원리를 이용하여 측정하였다. 3점 꺾임강도를 측정하기 위해 직경 15mm, 길이 150mm MOR-bar 시편을 제작하였고 꺾임강도 시험기 AFG-250N (Mecmesin, England)를 이용하여 꺾임강도를 측정하였다. 이 때의 크로스헤드의 속도는 0.1mm/min 이고 사용한 시편은 15개였다. 경도 및 파괴인성을 측정하기 위해 시편을 15, 9, 6, 3, 1μm 다이아몬드 페이스트에서 차례로 경면 연마하였다. 경도(H_v)는 vickers 경도계 (Mitutoyo, Japan)를 이용하여 하중 10kg, 유지시간 10sec에서 생긴 압흔으로 측정하였고, 파괴인성(K_{IC})은 압자압입법(ICL, Indentation Crack Length : 136° Vickers indenter, Mitutoyo, Japan)으로 측정하였다[8]. 이 때 하중은 10kg, 유지 시간은 10sec로 하였으며 다음의 식을 이용하여 경도와 파괴인성을 계산하였다.

$$H = \frac{F}{2a^2} \tag{1}$$

$$K_{IC} = 0.032H\sqrt{a} \left(\frac{E}{H}\right)^{(1/2)} \left(\frac{c}{a}\right)^{(-2/3)} \tag{2}$$

F: load

a: length in diagonal of vickers indent

c: crack length

E: Young's Modulus

H: Hardness

K_{IC} : 파괴인성

2.2.4 전기적 특성 측정

절연파괴시험을 측정하기 위하여 자기를 두께 2mm, 지름 3.5cm로 절단하였다. 최대 측정전압은 60kV(60Hz)이고, 상승전압은 3kV/sec인 유중절연파괴 시험기 AMT-106 (SOUKOU, Japan)를 이용하여 절연파괴전압을 측정하였다. 유전정점은 DEA 2970(TA Instruments, U.S.A)을 이용하여 유전특성을 측정하였으며 이 때 측정주파수는 30Hz~ 3kHz 이고, 측정온도는 25-150°C 까지 변화시켜 시험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 출발분말의 특성

애자를 jiggering법으로 성형하기 위해서는 성형조건에 맞는 입도분포 즉 sub μm-수십 μm 범위내의 입도를

가져야 한다. 따라서 성형 가능한 입도분포를 갖도록 소지를 25시간 ball milling하였다. 그림 1에 25시간 분쇄한 소지의 입도분포를 나타내었으며, 10 μm 이하의 입자를 약 82% 함유하고 있어 습식 성형법인 jiggering법으로 애자 성형이 가능하였다.

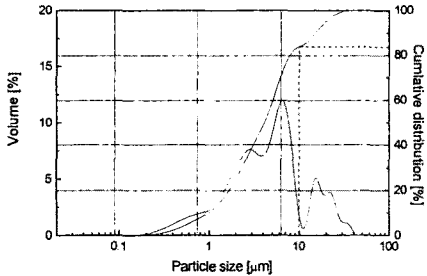


그림 1. 25시간동안 분쇄한 시료의 입도분포

1300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 50분 동안 소결한 자기를 분쇄한 후, 그 분말을 이용하여 X-선 회절 분석기로 자기의 결정상을 조사하였다. 그림 2에 측정된 자기의 결정상을 나타내었다.

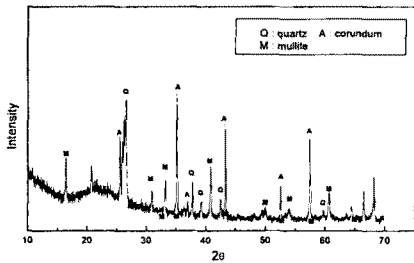


그림 2. 1300 $^{\circ}\text{C}$, 50분 동안 소결한 시편의XRD 패턴

자기는 대부분 비정질인 amorphous와 결정상인 quartz(SiO_2) 및 mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)와 corundum(Al_2O_3)으로 구성되어 있다. 이 결정상들이 애자의 전기적 및 기계적 특성을 향상시키고 특히 Corundum 결정은 내아크성, 내충격성 및 내구성등을 향상시키는 역할을 하고 있다. 따라서 알루미늄의 분말 첨가량이 높을수록 애자의 물리적 특성은 비례적으로 향상된다[6].

3.2 애자의 기계적 특성

본 연구에서는 jiggering법으로 자기를 성형하였다. 온도에 따른 밀도 변화를 관찰하기 위해 자기의 시편을 1250-1325 $^{\circ}\text{C}$, 60분 동안 전기로에서 예비 소성하였으며, 소결한 시편의 상대밀도는 gas pycnometer를 이용하여 측정된 이론밀도로 계산하였다. 그림 3은 소성온도에 따른 소결밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 소성온도가 높을수록 소결밀도는 증가하였으며, 1325 $^{\circ}\text{C}$ 에서 소결밀도가 이론밀도의 약 96%에 도달하였다.

1300 $^{\circ}\text{C}$, 60분동안 전기로에서 예비 소결한 시편의 소결밀도가 95%TD 이상으로 가장 치밀한 미세조직을 나타내었으므로 애자 제품을 직접 생산하는 터널가마에서 자기를 1300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 50분 동안 소결하였다. Archimedes방법으로 계산한 자기의 상대밀도는 97%TD 이상의 높은 밀도를 나타내었다.

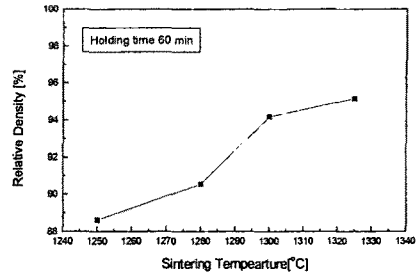


그림 3. 소결온도에 따른 밀도 변화

그림 4는 1300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 50분 동안 터널가마에서 소결한 자기의 표면을 미세연마 후 주사전자현미경으로 기공의 분포를 관찰한 것이다. 기공은 시편 전체에 일정하게 분포되어 있으며 평균기공의 크기는 약 2-3 μm 이다.

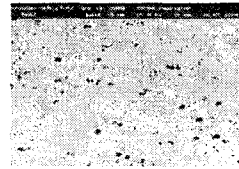


그림 4. 1300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 50분 동안 터널가마에서 소결한 자기의 미세구조사진

표 2에 400kN 현수애자의 기계적 특성을 나타내었다. 알루미늄을 17wt% 포함한 400kN 자기의 3점 꺾임강도는 1658kg/cm 2 , 경도는 27.5GPa, 파괴인성은 2.3MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$ 로 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 이 결과는 알루미늄을 40wt% 첨가한 자기의 기계적 특성과 거의 동일한 우수한 기계적 특성을 나타내었다[6].

표 1. 1300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 50분 동안 소결한 애자의 기계적 특성

Absolute Density [g/cm 3]	Relative Density [%]	Flexural Strength [kg/cm 2]	Young's Modulus [GPa]	Vickers Hardness [GPa]	Fracture Toughness [MPa m $^{1/2}$]
2.58	97.7	1658	102	27.5	2.3

3.3 애자의 전기적 특성

전기적 성질을 조사하기 위하여 400kN 자기를 일정한 크기로 절단한 후 시편의 주파수에 따른 $\tan\delta$ 의 온도의존성을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 온도가 증가할수록 유전상수나 손실인자가 증가하면서 전도손실과 이온 점프에 의한 손실이 증가하여 유전손실이 증가하는 것을 확인할 수 있다. DIN, ASTM[9]에서는 100 $^{\circ}\text{C}$ 까지의 변화에 대해 유전손실의 값이 120×10^{-3} 정도의 범위일 때 안정된 특성으로 제시하고 있으며 본 실험결과에서는 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 17×10^{-3} - 61×10^{-3} 범위로 양호한 값을 나타내었다.

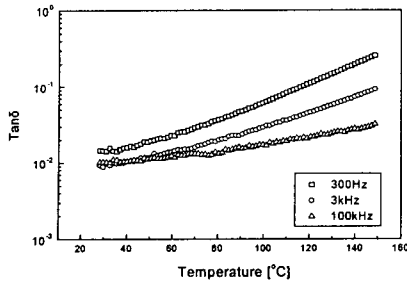


그림 5. Tanδ의 온도 의존성

유중절연파괴시험기로 측정된 400kN 자기의 유중절연 파괴전압은 19.9±1.4kV/mm이었다. 이 결과는 외국 N사의 유중절연파괴전압 16.9± 1.4kV/mm 보다 더 우수한 절연성을 나타내었다.

3.4 400kN 애자의 전기적 성능시험

현수애자의 여러 가지 전기적 성능시험 중 본 연구에서는 핀의 형상이 과전파괴하중에 미치는 영향을 조사하였다. 핀의 형상에 따라 과전파괴하중을 약 10%정도 향상시킬 수 있다고 보고 되었다[10]. 즉 다단 핀의 형상을 변화시킴으로써 두부에 집중되는 응력을 분산시켜 과전파괴하중을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 6에 나타난 것처럼 핀의 직경을 49-53mm 까지 변형시킴과 동시에 다단 핀 하부의 형태를 round와 straight로 변형시켜 400kN 애자에 핀을 조립한 후 과전파괴하중 시험을 실시하였다.

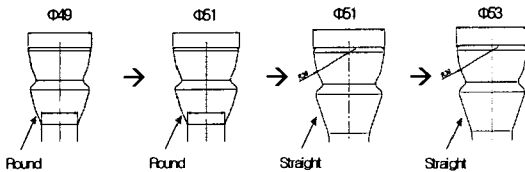


그림 6. 400kN 애자에 사용하였던 핀의 형상

400kN 자기에 그림 6에 도시하였던 핀을 각각 조립한 후 과전파괴하중 시험을 실시한 결과를 그림 7에 나타내었다.

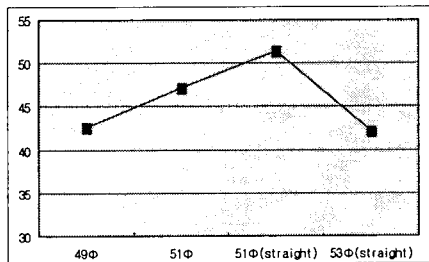


그림 7. 핀의 형상에 따른 과전파괴하중

그림 7에서 알 수 있듯이 핀의 직경이 51mm이며 다단 핀의 하부의 형태를 straight로 하였을 때 가장 우수한 과전파괴하중 52 ton을 나타내었다. 다단 핀의 하부를 straight로 함으로써 과전파괴시 두부 내부에 집중되는 응력을 다단 핀의 하부를 round한 것 보다 효과적으로 분산시킬 수 있었다. 따라서 두부 직경이 같은 51mm이며

다단 핀의 하부가 round일 때의 과피하중보다 약 15% 향상된 과전파괴하중을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

장석질 애자의 소지에 17wt%의 알루미늄을 첨가하여 애자의 물리적 특성을 향상시켰다. 소결밀도는 이론밀도의 97%에 도달하였고, 3점 꺾임강도는 1658kg/cm², 경도는 27.5GPa, 파괴인성은 2.3MPa·m^{1/2}로 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 이 결과는 장석질 자기 소지에 알루미늄을 40wt% 첨가한 자기의 기계적 특성과 거의 동일한 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 유중절연파괴전압은 19.9±1.4kV/mm로 우수한 절연성을 보여주었다. 핀의 직경이 51mm이며 다단 핀 하부의 형태가 straight인 핀으로 조립하였을 때 400kN 애자의 과전파괴하중이 가장 높은 52ton을 나타내었다.

(참 고 문 헌)

- [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] 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
- [6] W. E. Blodgett, "High Strength Alumina Porcelains," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 40(2), pp.74-77, 1961
- [7] R. Harada, N. Sugiyama and H. Ishida, "Al₂O₃-strengthened Feldspathic Porcelain Bodies: Effect of the Amount and Particle Size of Alumina," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 17(11), pp.88-98, 1996
- [8] K. Niihara, R. Morena and D. P. H. Hasselman, "Evaluation of K_{IC} of Brittle Solids by the Indentation Method with Low Cracks-to-indent Ratio," *J. Mater. Sci. Lett.*, 1, pp.13-16, 1982
- [9] H.S. Kim "Development of Porcelain Suspension Insulator with High Reliability for the Distribution Line" Report, Kepco, 1995
- [10] H. Nozaki, H. Inoue "High Tensile Strength Suspension Insulators with Multi-Step Embedded Pins" U. S. Patent No.4, pp.396-398, 1983