

Development of Extra High Voltage(400kN) Porcelain Insulator for Transmission Lines

崔仁赫* · 崔長絃** · 李東一*** · 崔演圭§
 (In-Hyuk Choi · Jang-Hyun Choi · Dong-Il Lee · Yeon-Gye Choi)

Abstract - This paper was the research of high voltage suspension insulator (400 [kN]) including pottery stone, feldspar, clay and alumina of 17 [wt%]. The slurry was fabricated after ball milling mixed raw materials. Green compacts were made by the extrusion of jiggering method and were sintered at 1300[°C] for 50 [min.] in the tunnel kiln. The sintered density was reached to 97% of theoretical density, and the bending strength was 1658 [kgf/cm²] and hardness and fracture toughness which was measured by ICL(indentation crack length) method were 1658 [kgf/cm²] and 27.5 [Gpa], respectively. In measurement of tan δ and insulation break voltage of 400 [kN] porcelain, tan δ took some numerical value between 17×10^{-3} and 61×10^{-3} and insulation break voltage value was 19.9 ± 1.4 [kV/mm]. The test was performed to research whether the shape of pin affect a overvoltage break load or not . As a consequence, when a pin was designed a pin diameter 51 [mm] with the bottom form of two-step constructed with straight in the suspension insulator, Insulator showed overvoltage break load 52 [ton] of the highest value and reflected a fine characteristic in aged deterioration test which is one of the accelerated aging test. Also it could be confirmed a fine characteristic through performing the test that electrical property of insulator was established correctly in accordance with IEC 60383-1 standards.

Key Words : 400kN suspension insulator, Alumina porcelain, Puncture test, Electro-mechanical failing load, thermal-mechanical load cycle test

1. 서 론

오늘 날 산업의 발전과 문화생활의 발달에 따라 전기에너지의 수요가 지속적으로 증가하고 있어 원격지에 위치한 발전소로부터 도시 및 산업현장까지 대용량 에너지의 장거리 송전이 필요하게 되었다. 따라서 국내에서는 154 [kV] 및 345 [kV]인 송전전압을 765 [kV]로의 승압송전이 진행 중이며 일부 구간에서는 시험운영 중에 있다. 이와 같은 송전전압의 상승은 전선의 무게와 전력선의 도체수(2, 4도체 → 6도체)를 증가시켰고, 또한 첩탑간 거리의 증가와 높은 고도에서의 바람의 영향도 커지게 되어 전선을 지지하는 애자에 큰 영향을 주고 또한 송전전압 승압으로 인한 첩탑과 전선간의 절연설계에도 영향을 주고 있다. 따라서 전선의 하중 증가와 전압상승 등을 고려하여 설계되어진 400 [kN](과전과파하중치 : 40,800 [kgf], 누설거리 : 525 [mm] 이상)애자가 필요하게 되었으나, 제조 기술의 부족으로 현재 전량 수입에 의존하

고 있는 현실이다.

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

2. 본 론

2.1 출발원료 및 애자 제조

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

* 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 委囑研究員
 *** 正 會 員 : 韓電 電力研究院 責任研究員
 § 正 會 員 : 고려애자(주) 責任研究員
 接受日字 : 2003年 5月 20日
 最終完了 : 2003年 6月 30日

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 2-3 [wt%]의 슬러리를 사용하였다.

2.2.2 X-선 회절분석

1300℃에서 50분 동안 소성한 자기의 결정상 변화를 관찰하기 위해 X-선 회절분석기(X'Pert, Philips, Netherlands)로 CuKα, 40[kV]/30[mA], Scan speed 3[°/min] 조건하에서 회절 각(2θ) 10-70°범위에서 측정하였다.

2.2.3 시편의 기계적 특성 측정

소결밀도는 ASTM C20에 따라 Archimedes 원리를 이용하여 측정하였다. 3점 꺾임강도를 측정하기 위해 직경 15 [mm], 길이 150 [mm]인 MOR-bar 시편을 제작하였고 꺾임강도 시험기 AFG-250 [N] (Mecmesin, England)를 이용하여 꺾임강도를 측정하였다. 이 때의 크로스헤드의 속도는 0.1 [mm/min] 이고 사용한 시편은 15개였다. 경도 및 파괴인성을 측정하기 위해 시편을 15, 9, 6, 3, 1 [μm] 다이아몬드 페이스트에서 차례로 경면 연마하였다. 경도(HV)는 vickers 경도계 (Mitutoyo, Japan)를 이용하여 하중 10 [kg], 유지시간 10 [sec.]에서 생긴 압흔으로 측정하였고, 파괴인성(KIC)은 압자 압입법(ICL, Indentation Crack Length : 136° Vickers indenter, Mitutoyo, Japan)으로 측정하였다[8]. 이 때 하중은 10 [kg], 유지 시간은 10 [sec.]로 하였으며 식 (1), (2)을 이용하여 경도와 파괴인성을 계산하였다.

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

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

여기서 : F: load
a: length in diagonal of vickers indent
c: crack length
E: Young's Modulus
H: Hardness
KIC : 파괴인성

2.3 400 [kN] 애자의 기계적 성능확인 시험

2.3.1 과전파괴하중시험

애자의 파괴하중치를 확인하는 시험으로 시험애자의 섬락치에 75%의 전압을 내하중치까지 인가하고 이후 인가전압을 차단한 후 자기나 금구가 파괴될 때까지 하중을 계속 인가하

는 시험이다. 시험방법은 ES 131(한전구매시방서)의 애자시험방법에 따라 시험하였고 품질관리지수 Qs 값은 식(3)으로 계산하였다.

$$Q_s = \frac{R_{ave} - R_s}{S} \geq K \tag{3}$$

여기서 : Rave. : 측정치의 평균
K : 허용정수(시료 10개일 때 3.0이상)
RS : 규정의 과전파괴하중치(40,800 [kg])
S : 표준편차

2.3.2 경년변화시험

애자의 경년열화를 모의한 시험으로 24시간을 1주기로 하여 4회를 연속 실시하며 온도변화는 -30 [℃]에서 +45 [℃]까지 12시간을 기준으로 변화를 주었고 1주기가 끝나는 부분에서 하중을 완전히 제거했다가 다시 하중을 인가한다. 실온상태에서 시험이 끝난 후 하중을 제거하고 ES 131에 따라 과전파괴하중시험을 실시하여 애자의 이상유무를 확인한다. 그림 1은 시험에서 사용된 장치의 온도와 하중 프로그램이다.

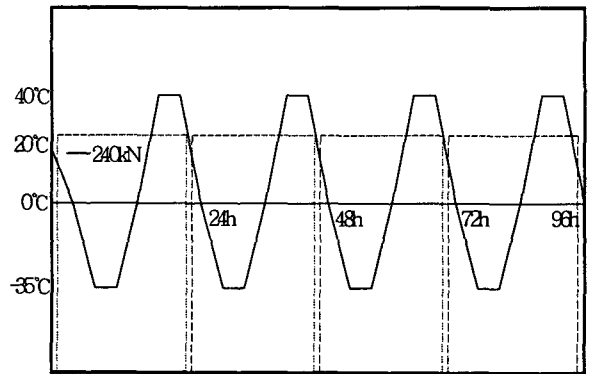


그림 1 경년변화시험 온도 및 하중 프로그램
Fig. 1 Aged deterioration test temperature and load program.

2.4 400 [kN] 애자의 전기적 성능확인 시험

제작된 애자의 전기적 성능을 확인하기 위하여 IEC 60383-1에 따라 상용주파주수섬락시험 및 뇌충격섬락전압시험을 실시하여 애자 단품에 대한 성능확인 시험을 실시하였다.

2.5 원료 및 시편의 물리적 특성

2.5.1 출발분말의 특성

애자를 jiggering법으로 성형하기 위해서는 성형조건에 맞는 입도분포 즉 sub [μm] - 수십 [μm] 범위내의 입도를 가져야 한다.

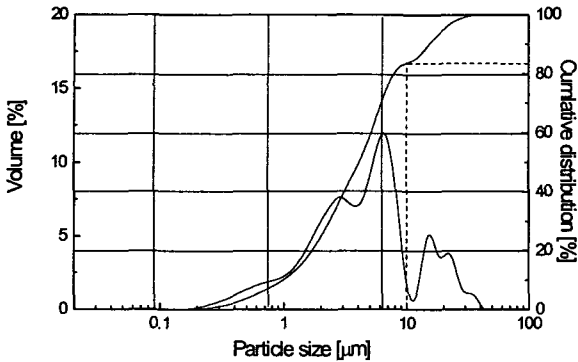


그림 2 25시간동안 분쇄한 시료의 입도분포
 Fig. 2 Particle size distribution of specimens after ball milling for 25 h.

따라서 성형 가능한 입도분포를 갖도록 소지를 25시간 ball milling하였다. 그림 2에 25시간 분쇄한 소지의 입도분포를 나타내었으며, 10 [μm] 이하의 입자를 약 82% 함유하고 있어 습식 성형법인 jiggering법으로 애자 성형이 가능하였다. 1300[°C]에서 50분 동안 소결한 자기를 분쇄한 후, 그 분말을 이용하여 X-선 회절 분석기로 자기의 결정상을 조사하였다. 그림 3에 측정된 자기의 결정상을 나타내었다.

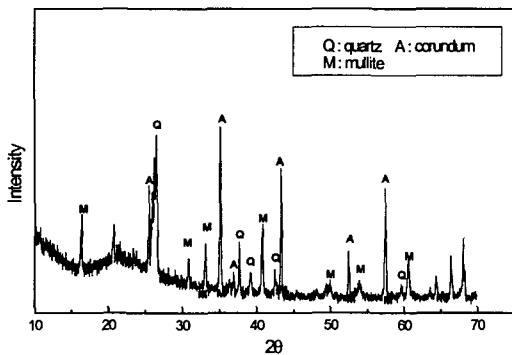


그림 3 1300°C, 50분 동안 소결한 시편의 XRD 패턴
 Fig. 3 X-ray diffraction patterns of K-1 specimens sintered at 1300°C for 50 minutes.

자기는 대부분 비정질인 amorphous와 결정상인 quartz (SiO₂) 및 mullite (3Al₂O₃ · 2SiO₂)와 corundum (Al₂O₃)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].

2.5.2 시편의 기계적 특성

본 연구에서는 jiggering법으로 자기를 성형하였다. 온도에 따른 밀도 변화를 관찰하기 위해 자기의 시편을 1250-1325

[°C], 60분 동안 전기로에서 예비 소성하였으며, 소결한 시편의 상대밀도는 gas pycnometer를 이용하여 측정된 이론밀도로 계산하였다. 그림 4는 소성온도에 따른 소결밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 소성온도가 높을수록 소결밀도는 증가하였으며, 1325 [°C]에서 소결밀도가 이론밀도의 약 96%에 도달하였다.

1300 [°C], 60분동안 전기로에서 예비 소결한 시편의 소결 밀도가 95% TD 이상으로 가장 치밀한 미세조직을 나타내었으므로 애자 제품을 직접 생산하는 터널가마에서 자기를 1300 [°C]에서 50분 동안 소결하였다. Archimedes방법으로 계산한 자기의 상대밀도는 97% TD 이상의 높은 밀도를 나타내었다.

그림 5는 1300 [°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.

표 1에 400 [kN] 현수애자의 기계적 특성을 나타내었다. 알루미늄을 17 [wt%] 포함한 400 [kN] 자기의 3점 꺾임강도는 1658 [kg/cm²], 경도는 27.5 [GPa], 파괴인성은 2.3 [MPa · m^{1/2}]로 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 이 결과는 알루미늄을 40 [wt%] 첨가한 자기의 기계적 특성과 거의 동일한 우수한 기계적 특성을 나타내었다[6].

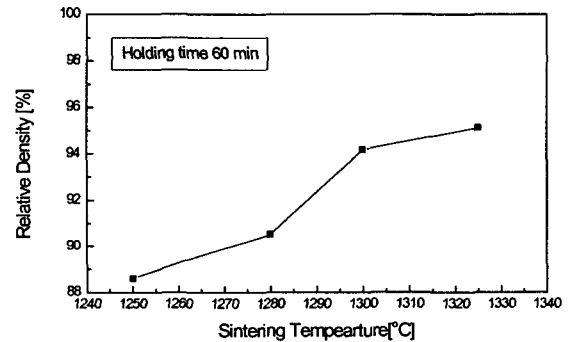


그림 4 소결온도에 따른 밀도 변화
 Fig. 4 Change of density according to sintering temperature.

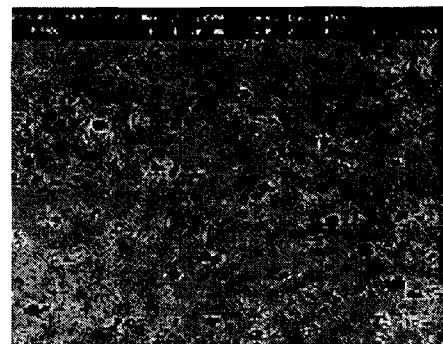


그림 5 1300 [°C]에서 50분 동안 터널가마에서 소결한 자기의 미세구조사진
 Fig. 5 SEM photographs of porcelain sintered at 1300 [°C] for 50 min in the tunnel kiln.

표 1 1300[°C]에서 50분 동안 소결한 애자의 기계적 특성
 Table 1 Physical properties of insulator sintered at 1300 [°C] for 50 minutes

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

2.5.3 시편의 전기적 특성

전기적 성질을 조사하기 위하여 400 [kN] 자기를 일정한 크기로 절단한 후 시편의 주파수에 따른 tanδ의 온도의존성을 측정하여 그림 6에 나타내었다. 온도가 증가할수록 유전상수나 손실인자가 증가하면서 유전손실이 증가하는 것을 확인할 수 있다. DIN, ASTM[9]에서는 100 [°C]까지의 변화에 대해 유전손실의 값이 120×10⁻³ 정도의 범위일 때 안정된 특성으로 제시하고 있으며 본 실험결과에서는 100 [°C]에서 약 17×10⁻³ - 61×10⁻³ 범위로 양호한 값을 나타내었다. 유중절연 파괴시험기로 측정한 400 [kN] 자기의 유중절연파괴전압은 19.9±1.4 [kV/mm]이었다.

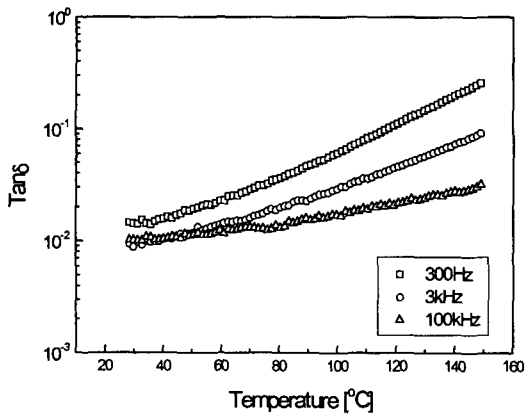


그림 6 Tanδ의 온도 의존성
 Fig. 6 Dependence upon temperature of Tanδ.

2.6 400 [kN] 애자의 기계적 성능확인 시험결과

2.6.1 과전파괴하중시험

현수애자의 여러 가지 기계적 성능시험 중 본 연구에서는 핀의 형상이 과전파괴하중에 미치는 영향을 조사하였다. 핀

의 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 나타낸 것처럼 핀의 직경을 49-53 [mm] 까지 변형시킴과 동시에 다단 핀 하부의 형태를 round한 MPR식과 straight형태로 한 MPS식으로 변형시켜 400 [kN] 애자에 핀을 조립한 후 과전파괴하중 시험을 실시하였다.

시료	핀머리부분의 직경	핀의 형상
MPR-49	Φ49 [mm]	2단, 하단부 ROUND
MPR-51	Φ51 [mm]	2단, 하단부 ROUND
MPS-51	Φ51 [mm]	2단, 하단부 STRAIGHT
MPS-53	Φ53 [mm]	2단, 하단부 STRAIGHT

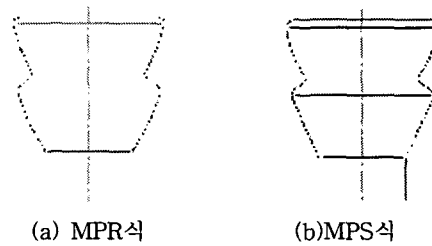


그림 7 400 [kN] 애자에 사용한 다단 핀의 형상
 Fig. 7 Form of two-step pin used in a 400 [kN] insulator

400 [kN] 자기에 그림 7에 도시하였던 핀을 각각 조립한 후 과전파괴하중 시험을 실시한 결과를 그림 8에 나타내었다.

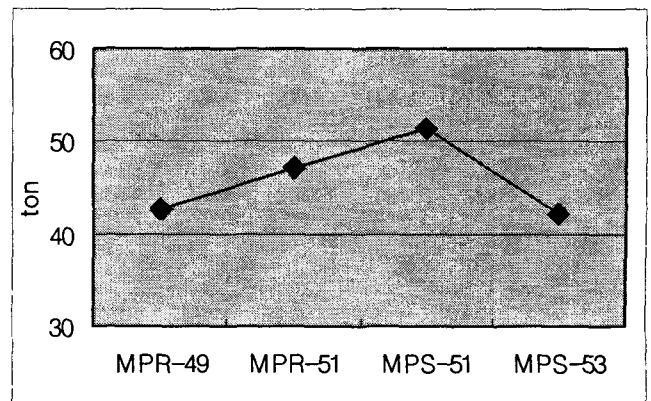


그림 8 핀의 형상에 따른 과전파괴하중
 Fig. 8 Electromechanical failing load according to form of pin.

그림 8에서 알 수 있듯이 MPS-51로 하였을 때 가장 우수

한 과전파괴하중 52 [ton]을 나타내었다. 이 결과는 MPS 계열이 과전파괴시 두부 내부에 집중되는 응력을 MPR 계열보다 더 효과적으로 분산시키는 것이라 생각된다. 따라서 MPS-51핀이 기존에 사용하였던 MPR-49일 때의 과전파괴하중치보다 약 15% 향상된 과전파괴하중을 나타내었다. 그러나 MPS-53의 경우 오히려 과전파괴하중치가 낮아졌으며, 이는 응력이 자기부에 직접 영향을 미쳐 오히려 하중치가 감소한 것이라 생각된다.

2.6.2 경년변화시험

위의 과전파괴하중시험의 결과에서 나타난 결과를 토대로 MPS-51 핀을 사용하여 400 [kN]애자의 실사용 하중상태와 대기온도변화조건을 모의 시험하기 위해 IEC 규격에 따라 경년변화시험을 실시하였다. 경년변화시험 후 애자의 이상 유무를 확인하기 위하여 과전파괴하중시험을 실시한 결과를 표 2에 나타내었으며 그 결과 품질관리지수 Qs가 3.0이상임을 확인할 수 있었다.

표 2. 경년변화시험 후의과전파괴하중시험결과
Table 2. Overvoltage break load test results after aged deterioration test.

시료번호	규정치	시험결과
#1	40,800 [kg] (Qs=3.0)	42,500 [kg]
#2		42,800 [kg]
#3		43,200 [kg]
#4		43,000 [kg]
#5		42,900 [kg]
#6		42,600 [kg]
#7		43,500 [kg]
#8		43,300 [kg]
#9		42,800 [kg]
#10		43,700 [kg]
	평균	43,030 [kg]
	Qs	7.79

2.7.3 400 [kN] 애자의 전기적 성능확인 시험결과

제작된 400 [kN] 현수애자의 전기적 성능을 확인하기 위하여 상용주파주수섬락시험 및 뇌충격섬락시험을 실시하였다. 그 결과 주수섬락전압은 평균49.2 [kV]로 나타났으며 뇌충격전압의 경우 정·부 각각 148.4 [kV], 158.5 [kV]로 모두 규정치를 만족하는 결과치 표 3에 나타내었다.

표 3 IEC 규격에 따른 400 [kN] 애자의 전기적 특성 시험 결과

Table 3 Electrical characteristics of 400 [kN] insulators as IEC standard.

시험항목	시료수	규정치	시험결과
상용주파 주수섬락시험	#1	정격주수섬락치 (53 [kV])의 90%(47.7 [kV])이상	49.5
	#2		49.1
	#3		49.1
	#4		49.4
	#5		49.0
			평균
뇌충격전조 섬락시험	#1	평균섬락전압이 정격섬락전압(정:140 [kV], 부:150[kV])의 92%(정:128.8 [kV], 부:138[kV])이상	정:149.8 [kV] 부:162.9 [kV]
	#2		정:149.6 [kV] 부:159.3 [kV]
	#3		정:149.4 [kV] 부:164.9 [kV]
	#4		정:149.4 [kV] 부:153.4 [kV]
	#5		정:143.8 [kV] 부:151.7 [kV]
			평균

3. 결 론

장석질 애자의 소지에 17 [wt%]의 알루미늄을 첨가하여 애자의 물리적 특성을 향상시켰다. 소결밀도는 이론밀도의 97%에 도달하였고, 3점 꺾임강도는 1658 [kg/cm²], 경도는 27.5 [GPa], 파괴인성은 2.3 [MPa·m^{1/2}]로 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 이 결과는 장석질 자기 소지에 알루미늄을 40 [wt%] 첨가한 자기의 기계적 특성과 거의 동일한 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 유충절연파괴전압은 19.9±1.4 [kV/mm]로 우수한 절연성을 보여주었다. 핀의 직경이 51 mm이며 MPS-51로 조립하였을 때 400 [kN] 애자의 과전파괴하중이 가장 높은 52 ton을 나타내었으며 경년변화시험에서도 Qs가 3.0이상으로 규격치를 만족하는 결과를 나타내었다. 또한 애자의 전기적 특성을 시험한 결과 모두 IEC 규격에서 정하는 허용기준치 이상임을 확인할 수 있었다.

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), 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), 1066-1069 (1992).
 [3] J. E. Schroeder, "Inexpensive High Strength Electrical Porcelain", Am. Ceram. Soc. Bull., 57(10), 526 (1978).

- [4] L. Mattyasovszky-Zsolnay, "Mechanical Strength of Porcelain", J. Am. Ceram. Soc., 40(9), 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), 522-526 (1970).
- [6] W. E. Blodgett, "High Strength Alumina Porcelains", Am. Ceram. Soc. Bull., 40(2), 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), 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, 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. 4,396,798(1983).

저 자 소 개



최 인 혁(崔仁赫)

1963년 4월 13일 생. 1986년 성균관대학교 전기공학과 학사 졸업. 1989년 동 대학원 동학과 석사 졸업. 2002년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 박사 졸업. 현재 한전 전력연구원 선임연구원.



최 장 현(崔長紘)

1975년 11월 10일 생. 2001년 서남대 전기전자공학과 학사 졸업. 2003년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 석사 졸업. 현재 전력연구원 위촉 연구원.



이 동 일(李東一)

1958년 3월 15일 생. 1979년 단국대 전기공학과 학사 졸업. 1983년 인하대 전기공학 재료분야 석사 졸업. 1996년 한양대 전기공학 고전압분야 박사 졸업. 현재 한전 전력연구원 책임연구원.



최 연 규(崔演圭)

1960년 1월 7일생. 1984년 전북대 금속공학과 졸업. 1992년 독일 슈투트가르트대학 금속공학 졸업(석사). 1997년 독일 자아르랜드대학 재료공학 졸업(박사). 1999년 한국과학기술원 재료공학과 Post-Do. 수료. 현재 고려애자공업(주) 기술연구소 책임연구원.