2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

알루미나 첨가량에 따른 초고압 송전용 자기애자 특성 연구

최인혁[1], 최장현[1], 박준호[1], 이동일[1], 신태우[2], 민병욱[2]
전력연구원[1], 한국전력공사[2]

A study on the Characteristics of EHV Porcelain Insulators by Contained Alumina

I. N. Choi[1], J. H. Choi[1], J. H. Park[1], D. L. Lee[1], T. W. Sin[2], B. W. Min[2]
KEPRI[1], KEPCO[2]

Abstract - 2004년도 36,000lbs 볼소켓형 국산 애자에 대하여 알루미나(alumina) 첨가량의 변화에 따른 국산 2001년산 및 외국산 2000년산 자기애자의 특성 분석을 실시하였다. 그 결과 2001년도 자기애자의 알루미나 첨가량을 17%로 하고 2004년도 알루미나 첨가량이 20%로 하였을 경우 자기 애자의 기계적 특성은 10% 정도 향상 되었다. 그리고 2001년도에 제조한 애자의 자기 상대밀도는 이론밀도의 96%에 도달하였으나 2004년도에 제조한 애자의 상대 밀도는 이론밀도의 98%에 도달하였으며, 애자의 균일성을 나타내는 Qs 값은 5.01로 높게 나타났다.

1. 서 론

최근에는 전력 수요가 폭발적으로 증가하고 또한 전기의 안정적인 공급을 원하는 산업구조 및 사회구조로 인하여 전력 기자재의 신뢰성이 대두되고 있으며, 전력 기자재의 신뢰성 평가에 대한 많은 연구도 진행되고 있다. 특히, 애자는 전기 공급에 필요한 기자재중 중요한 역할을 차지하고 있으며, 그 소재의 종류에 따라 분류하면 자기애자, 폴리머 애자, 유리애자가 있다. 우리나라의 송전용 자기애자 사용 점유율은 99.4%이고 거의 대부분의 송전용 현수애자로 자기애자를 사용하고 있는 실정이며, 자기 애자를 제조하는데 사용되는 원료는 일반적으로 점토, 장석, 도석 및 고강도의 특성을 나타내는 알루미나로 구성되어 있다. 한편, 알루미나질 자기애자는 장석질 애자의 기계적 강도인 탄성율과 고유 강도를 높이기 위해 기본 소지에 알루미나 량을 40%까지 첨가하고 있으며, 국내의 경우에는 알루미나의 함유량을 8 wt%(1988) ⇒ 12 wt%(1995) ⇒ 17 wt%(1997)로 양이 증가함에 따라 애자의 전기적, 기계적 성능이 향상 되었다는 것을 한국전력공사의 사고 통계에서 볼 수 있다. 특히, 17%의 알루미나를 첨가된 자기애자의 소결밀도는 이론밀도인 97%까지 도달했으며, 3점 꺾임강도는 1658 [kg/cm2], 경도는 27.5[Gpa], 파괴인성은 2.3 [Mpa·M1/2]로 향상된 것을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 알루미나 참가 양에 따라 국산 및 외국산 애자의 전기적, 기계적 특성을 분석하기 위해 볼소켓형 현수애자를 실 선로 및 신품 애자를 대상으로 알루미나 첨가량에 따른 특성을 비교 분석하고, 알루미나를 20% 첨가 했을 경우의 자기 애자의 전기적, 기계적 특성에 관하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 시험 방법

시험 시료는 국내 A사의 2001(17% 알루미나 첨가)년, 2004(20% 알루미나 첨가)년 자기 애자와 외국 B사의 2000년 자기 애자를 샘플로 취득하였다. 소성된 애자의 원료의 화학 성분 구성을 조사하고자 x-선 형광분석기(XRF)를 이용하였고, 자기를 소성한 후에 자기에 존재하는 결정 및 결정량을 x-선회절분석기(XRD)로 분석하였으며, 자기의 기공 상태를 조사하기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. 그리고 기계적 특성인 경도 및 파괴인성을 측정하기 위해 시편을 다이아몬드 페이스트에서 연마하였으며, vickers 경도계(Mitutoyo, Japan)를 이용하여 하중 10 [kg], 유지시간 10 [sec.]에서 생긴 압흔으로 경도를 측정하였고, 피과인성은(K_{IC}) 입자압입법(ICL, Indentation Crack Length : 136° Vickers Indenter)로 측정하였다. 이 때의 하중과 유지 시간은 경도 조건과 동일하다.

2.2 시험결과 및 고찰

2004년도 제조한 애자를 한전 구매시방서에 명시된 여러 가지 시험 방법에 따라 시험하였다. 시험 항목은 흡습, 유중파괴전압, 타격내하중, 과전파괴하중, 상용주파건조섬락, 상용주파주수섬락, 뇌충격섬락전압 및 경년변화 시험을 실시하였다.

표 1. 전기적 성능 시험 결과

시험 항목	한전 기순치	No. 1 / No. 6	No. 2 / No. 7	No. 3 / No. 8	No. 4 / No. 9	No. 5 / No. 10
흡습	153㎏/㎠, 12hR	양호	양호	양호	-	-
유중파괴전압	110kV	150	154	164	158	162
타격내하중	104㎏-㎝	양호	양호	양호	-	-
과전파괴하중	16,500kg	18,950	19,890	19,890	21,180	20,470
		19,420	19,700	19,490	19,630	20,850
상용수피건소	80kV	83	84	83	-	-
상용수파수수	50kV	57	55	55	-	-
뇌충격섬락전압	성극성	140	19	139	-	-
	부극성	145	143	144	-	-
경년변화	16,500kg	19,420	20,430	19,970	19,220	21,420
		20,450	19,900	20,320	20,570	19,330

표 1에서 볼 수 있듯이 애자의 전기적 성능은 한전 구

매 시방서에 명시된 기준치를 만족하였다. 과전파괴하중 및 경년변화시험의 기준치는 모든 시료에서 16,500 [kg] 하중을 견딜 뿐 아니라 Qs 값이 3.0 이상이어야 한다. 현재 생산하고 있는 애자의 과전파괴하중의 평균값은 19,947 [kg]이고 Qs = 5.01이다. 경년변화 후 과전파괴하중을 시험한 결과 평균값은 20,104 [kg]이고 Qs = 5.30 이였다. 따라서 제품의 균일화가 과거 제품에 비해 많이 향상되었다. 그 이유는 앞에서도 언급하였듯이 알루미나의 양을 증가시켰으며 또한 터널가마에서 사용되는 열원을 경유에서 천연가스로 대체함으로써 가마 내부의 분위기가 훨씬 안정화되었기 때문이라고 사료된다.

또한 2004년도 신품 애자와 비교 분석을 위해 2001년 애자와 2000년 외국산 애자에 대하여 화학성분을 분석한 결과를 표 2에 나타내었다. 국내 A사의 2004년산 애자의 소지 화학성분을 x-선 형광분석기로 조사한 결과 큰 차이점은 과거 2001년도 A사가 배합한 원료에 포함되어 있는 알루미나 양보다 약 2% 정도 더 증가한 것을 알 수 있었다. 반면에 외국 B사 애자의 원료에 포함되어 있는 알루미나의 양은 31.74 wt%로 국내 A사가 제조한 애자의 알루미나의 양보다는 적었다.

표 1. 애자의 화학성분

원료	국내 A사 (2001)(wt%)	국내 A사 (2004)(wt%)	외국 B사 (2000)(wt%)
SiO_2	58.77	59.12	61.03
Al_2O_3	35.22	37.12	31.74
CaO	0.25	0.27	0.19
MgO	1.01	-	1.09
Fe_2O_3	0.33	0.36	0.27
TiO_2	0.17	0.54	0.16
Na_2O	1.87	0.42	2.02
K_2O	1.96	2.11	3.15

소성한 2004년도 자기의 결정 상태 및 결정 양을 조사하기 위하여 x-선 회절 분석기를 이용하였고 결과를 그림 1에 나타내었으며, quartz, cristobalite, mullite 및 corundum 등이 존재한다는 것을 알 수 있다. 또한 x-선 회절 분석기로 조사한 결정 양은 표 3과 같으며, 2004년도에 제조한 애자의 결정을 과거 2001년도에 제조한 애자의 결정 상태와 비교하여 보면 mullite와 cristobalite의 양은 거의 동일하지만 corundum 양은 16.5wt%에서 22.35wt%로 증가한 것을 볼 수 있다. 외국 B사 애자의 corundum양은 국내 A사가 2001년도 제조한 애자의 corundum 양과 동일하다. 원료 배합할 때 투입한 알루미나의 양은 20wt% 였는데, 소성한 후의 결정양은 22.35wt% 으로 증가하였다. 그 이유는 배합한 원료 중 도석, 장석 및 점토에 포함된 Al_2O_3중 일부는 SiO_2와 결합하여 mullite($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)를 형성하였고 나머지 일부는 corundum 결정을 형성하였기 때문에 최초에 투입한 순수한 알루미나 양보다는 많기 때문이다.

표 3. XRD로 정량 분석한 결정 양

제 품 / 결 정	국내 A사 (2001)	국내 A사 (2004)	외국 B사 (2000)
Mullite (wt%)	16.5	16.2	10.65
Quartz (wt%)	3.5	2.26	3.43
Cristobalite(wt%)	0.5	0.55	-
Corundum(wt%)	16.5	22.35	16.06

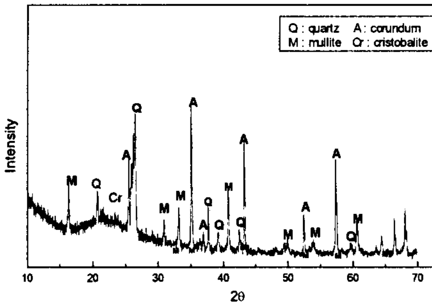
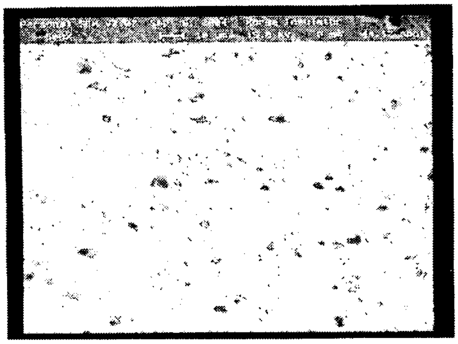
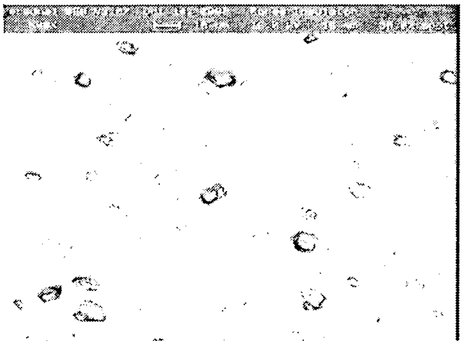


그림 1. 측정한 애자 x-선 회절 분석

자기에 존재하고 있는 기공의 형태를 조사하고자 자기를 절단하여 시편을 만든 후 표면을 연마하였다. 연마한 시편을 주사전자현미경으로 관찰하여 기공의 상태를 조사한 결과를 그림 2에 나타내었다.



(a) 국내 A사(2004)



(b) 외국 B사

그림 2. 주사전자현미경으로 관찰한 기공의 형태

국내 A사의 2004년도 애자와 외국 B사 애자에서 제조한 애자의 기공형태는 완만한 타원형을 보여주고 있고 기공의 수는 외국 B사 애자가 적은 반면 국내 A사가 제조한 애자의 기공의 수가 약간 많았다. 그러나 기공의 크기를 비교하여 보면 외국 B사 애자의 기공의 크기보다는 국내 A사가 제조한 자기의 기공의 크기가 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 기공의 형태가 자기의 기본적인 물성에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하기 위하여 자기의 상대밀도, 경도 및 파괴인성 등을 조사하였으며, 그 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4. 측정한 경도, 탄성율, 파괴인성

제조년도	절대 밀도 [g/㎤]	상대 밀도 [%]	탄성율 [GPa]	표면 경도 (Hv) [GPa]	파괴 인성 (K_{IC}) [MPa·$m^{1/2}$]
2001 (국내 A사)	2.54	96	96.2	6.9	1.7
2004 (국내 A사)	2.61	98	97.5	7.1	1.9
2000 (외국 B사)	2.48	93.9	88.2	6.9	1.6

표 4에서 볼 수 있듯이 2004년산 자기 애자가 기계적 특성에서 약 10% 정도 향상되었다. 2004년에 제조한 애자의 절대밀도가 높은 것은 다른 원료에 비해 상대적으로 높은 비중을 갖는 알루미나의 분말이 더 첨가되었기 때문이다. 절대밀도를 가지고 자기의 기공 상태를 알 수 없기 때문에 상대밀도를 측정한 결과 자기의 이론밀도에 거의 비슷한 98%에 도달하였다. 반면에 외국 B사 자기의 상대밀도는 약 94%에 이른다. 이렇게 상대 밀도가 향상된 이유는 터널가마에서 열원으로 사용하는 경유를 천연가스(LNG)로 대체하여 사용 제조하였기 때문에 애자의 상대밀도가 향상된 것으로 사료된다. 이는, 경유를 사용하면 가마 내부의 온도 조절이 컴퓨터로 자동 제어하는 천연가스 보다는 쉽지 않아 제품의 편차가 존재하였으나, 열원을 천연가스로 대체함으로써 제품의 편차를 줄일 수 있을 뿐 아니라 전체적으로 제품의 상대밀도 증가가 가능하다. 자기의 상대밀도 증가로 인하여 기공 상태에 영향을 받는 탄성율, 표면경도 및 파괴인성 값이 증가하였다. 전체적으로 기계적인 특성이 약 10% 정도 향상 되었음을 알 수 있다. 자기의 기계적인 특성이 상향 조정되었다고 해서 애자의 전기적 성능이 우수하다고는 할 수 없다. 애자는 자기, 금구 및 자기와 금구를 연결하여주는 시멘트로 구성되어 있기 때문에 자기의 기계적인 특성만을 가지고 애자의 성능을 거론할 수 없다. 2001년도 국내 A사가 제조한 자기의 기계적인 특성이 2000년도에 제조한 외국 B사 자기의 기계적인 특성보다 더 우수하지만 애자의 성능시험에서는 오히려 약간 부족한 현상을 보이는 것은 복합적인 애자의 구조에 관한 설계가 부족하기 때문이고, 생산 공정이 외국 B사 보다는 자동화 되지 못했기 때문이다.

전기적 특성을 조사하고자 자기의 절연파괴시험을 실시하였다. 비교 검토하기 위하여 2001년 및 2004년 국내 A사와 2000년도 외국 B사 자기의 절연파괴전압 및 상대밀도를 측정하여 그림 3에 나타내었다. 일반적으로, 세라믹 재료의 이론에 따르면 상대밀도가 높을수록 절연파괴전압도 높다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 상대밀도가 높을수록 자기에 포함되어 있는 기공율이 적기 때문에 절연파괴전압이 높다. 2004년도에 제작한 국내 A사애자의 상대밀도가 가장 높은 98%의 이론밀도를 나타내기 때문에 절연파괴전압도 가장 높은 19.1 kV/mm를 나타내고 있다. 자기의 물성 자료를 분석하여 보면 외국 B사에서 제조한 자기의 물성보다는 국내 A사가 제조하고 있는 자기의 물성이 약 10%정도 우수하다. 그러나 앞에서도 언급하였듯이 자기의 물리적 특성이 우수하다고 하여 애자의 성능 평가에서도 우수하다고 할 수는 없다. 따라서 애자의 종합적인 평가는 전기적 성능 시험을 실시한 결과를 가지고 논하여야 한다.

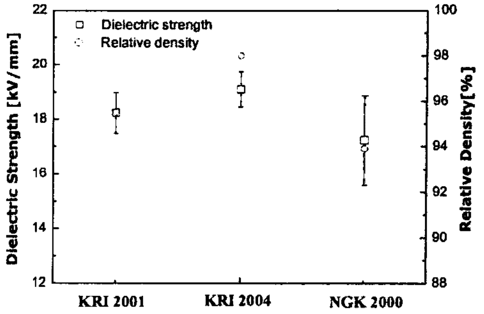


그림 3. 절연파괴전압과 상대밀도

3. 결 론

알루미나 참가 양에 따라 국산 및 외국산 애자의 전기적, 기계적 특성을 분석하기 위해 볼소켓형 현수애자를 실 선로 및 신품 애자를 대상으로, 알루미나 첨가량에 따른 특성을 비교 분석하고, 알루미나를 20% 첨가 했을 경우의 자기 애자의 전기적, 기계적 특성을 분석하였다.

(1) 2001년도에 제작한 애자의 자기 상대밀도는 이론밀도의 96%에 도달하였으나 2004년도에 제조한 애자의 상대 밀도는 이론밀도의 98%에 도달하였으며, 애자의 균일성을 나타내는 Qs 값은 5.01로 높게 나타났다.

(2) 2001년도 자기애자의 알루미나 첨가량은 17%이고 2004년도 알루미나 첨가량이 20%였으며, 이에 따라 자기애자의 성능은 10% 정도 상향되었다.

이와 같이 2004년도 애자의 성능이 향상된 이유는 알루미나의 양의 증가와 터널가마에서 사용되는 열원을 경유에서 천연가스로 대체함으로써 가마 내부가 안정화되었기 때문이라고 사료된다.

[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]. B. Zivanovic, S. Isakovski, M. Aleksic, N. Hajdukovic, J. Cinkler and J. Ranogajec, "Electroporzellan Mit Sehr Guten Mechanischen Eigenschaften," Keram. Zeitschrift, 32(7), 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), 522-526 (1-970).