

특고압 부싱의 특성분석 및 성능향상을 위한 새로운 설계

Characteristics of EHV Bushing and a New Design for the Improved Performance

김찬영*, 송일근**, 김주용**, 이병성**, 박근형***

(Chan Young Kim*, Il Keun Song**, Ju Yong Kim**, Byung Sung Lee**, Keun Hyung Park***)

Abstract

This paper describes the characteristic analyses and a new design of the bushing for the pole transformers. The mechanical breakdown of the upper part of the bushing was frequently occurred. This caused the leakage of mineral oil, resulted in the interruption of electric power. Therefore, the bushings were investigated by the material analytical method and Finite Element Method. The analyses were performed by the Induced Coupled Plasma(ICP), X-ray diffraction(XRD), Scanning Electron Microscopy(SEM), and Dielectric Thermal Analyzer(DETA). Also, the Von-Mises stress of the top part of bushing was determined by using ANSYS program. The Von-Mises stress of the newly designed bushing was reduced about 50%. Therefore, if we apply the newly designed bushing, the number of mechanical breakdown may be decreased.

Key Words : Pole transformer, Bushing, Dielectric constant, Microstructure, Von-Mises stress

1. 서 론¹⁾

이 논문은 주상변압기 1차 특고압 부싱의 고장을 감소시키기 위한 방안으로 고장이 발생하는 원인을 규명하고 이에 대한 대책에 관한 것이다.

최근에 특고압 주상변압기 1차 부싱 파손에 의한 고장이 발생하여, 전력공급이 중단되는 사례가 빈번하게 나타나고 있다. 그러나, 자기계 부싱은 전통적인 세라믹 제품이라는 인식으로 인하여 학계에서는 거의 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 결국 주상변압기 고장에 의한 피해는 수용가에게 돌아가 국가 경쟁력이 약화되는 결과가 초래되고 있다. 따라서 이 논문에서는 현재 사용되고 있는 전통적인 기법에 의하여 제작된 부싱에 대한

각종 분석을 수행하고, 고장이 발생하는 원인을 규명하여 고장발생률이 낮은 부싱 제작에 활용하고자 한다.

이 논문에서는 변압기 부싱에 대한 성분을 분석하여 불순물 함량에 대한 평가를 하였고, X-선 회절분석을 통한 결정상 성장, 미세구조 관찰에 의한 기공의 크기 및 성장정도, 온도에 따른 유전특성 측정에 의한 유전손실 증대에 관한 분석을 하였다. 또한 현재 사용중인 부싱에 대한 유한요소 해석법을 통하여 개선된 형태의 부싱 설계에 활용하였다.

2. 실험

2.1 실험방법

변압기용 1차 부싱에 대한 성분원소 함량을 유도결합 플라즈마 발광분광기로 분석하여 검정곡선법에 의하여 각 성분원소를 정량화 하였다. 시험방법은 ASTM C169-92, C1301-95방법에 따랐으며,

우석대학교 반도체전자자동차공학부
(전북완주군 삼례읍 후정리 490)
Fax: 063-291-9312
E-mail : kimcy@woosuk.ac.kr

시료는 완전히 갈아서 100 메쉬의 체로 거른 다음 110℃에서 건조하고 용제로서 LiBO₂를 사용하여 1000℃에서 30분 동안 완전히 용융한 다음 각각을 묽은 질산으로 용해하여 일정량으로 만들어 분석하였다. 유전특성을 평가하기 위하여 변압기 부싱을 두께 0.5~1.5 [mm], 크기 20 x 20 [mm]의 시편으로 제작한 다음 온도를 -30~100[℃]까지 변화시키고, 주파수 범위를 10 ~ 10⁶ [Hz]까지 변화시키면서 비유전율과 tan δ를 측정하였다.

변압기 부싱의 기계적 강도해석은 기존의 부싱 및 클램프 볼트를 넣는 부분의 자기의 길이를 10 mm 증가시킨 부싱에 대하여 분석하였다. 기계적 강도를 해석하기 위하여 Solid 45로 변압기 부싱 상부를 모델링하였고, 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 정적하중을 고려하여 Von-Mises 응력을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자기 특성 분석

3.1.1 성분분석(ICP)

표 1에 제조회사별 국산 부싱의 성분함량을 나타냈고, 부싱과 현수애자의 성분을 비교하기 위하여 현수애자의 성분도 함께 나타냈다.

표 1. 변압기 부싱의 성분 함량

시료명 분석원소	부싱 (wt. %)		현수애자(wt. %)	
	A사 (‘00.2)	B사 (‘01.3)	국산 (‘00)	외산 (‘97)
Al ₂ O ₃	25.32	21.84	34.9	31.6
CaO	0	0.74	0.3	0.3
Fe ₂ O ₃	0.68	0.89	1.0	0.7
K ₂ O	2.51	1.40	1.8	2.9
SiO ₂	69.39	68.44	60.6	63.1
TiO ₂	0.17	0.21	0.3	0.3
기타(Na ₂ O, MgO 등)	1.93	6.48	1.1	1.1
합 계	100	100	100	100

A사 및 B사에서 제작된 부싱의 성분을 조사한 결과 A사의 알루미늄(Al₂O₃) 함량이 더 많은 것으로 나타났다. 그렇지만 3.1.2절의 X-선 회절분석에서 결과에서 알 수 있듯이 알루미늄 결정인 코런덤이 생성된 것이 아니고 단지 점토 등의 원료에

알루미늄의 함량이 많았기 때문인 것으로 나타났다. 산화철의 함량에서는 B사가 A사 보다는 많지만, 모두 1 wt.% 미만이었다. 또한 표에서 주어진 기타 산화물 함량을 살펴보면 A사 보다는 B사가 훨씬 큰 것으로 나타났는데 이 성분들에 의하여 B사의 유전특성이 온도에 따라 크게 변한 것으로 판단된다.

3.1.2 X-선 회절분석

그림 1은 A사 및 B사 부싱의 결정상을 보여주는 X-선 회절 패턴이다. A사 및 B사 부싱 모두에서 quartz(SiO₂), cristoballite(SiO₂), mullite(Al₆Si₂O₁₃)의 결정상이 관찰되었다. 그렇지만 기계적 강도를 향상시키기 위해서 현수애자를 제작할 때 넣는 알루미늄 결정상인 corundum (Al₂O₃)은 관찰되지 않은 점으로 미루어 부싱을 제작할 때는 알루미늄을 넣지 않았다는 것을 알 수 있다.

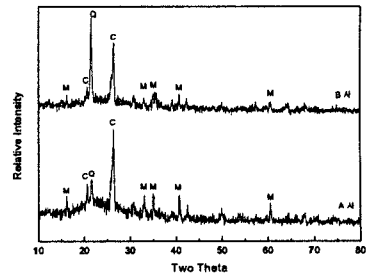
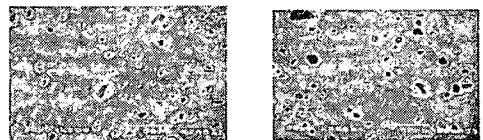


그림 1. 부싱의 X-선 회절 패턴(M : mullite, C : cristoballite, Q : quartz)

3.1.3 미세구조 분석

그림 2는 부싱의 단면을 연마한 표면의 미세구조이다. 현수애자와 비교하여, 기공의 크기가 크고 및 수가 많다는 것을 알 수 있다. 이것은 부싱의 제작과정이 현수애자와 다르게 성형법이 아니라 압출된 케이크를 깎아서 제작하기 때문으로 판단된다. 이와 같이 존재하는 기공은 부싱의 기계적 강도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.



(a) A사 자기 (b) B사 자기

그림 2. 부싱의 미세구조

3.1.4 변압기 부상의 유전특성

상온에서 부상의 비유전율은 일반적인 전통적인 세라믹 제품이 가지고 있는 범위(5~8)에 포함되어 있으나 온도가 상승함으로써 비유전율이 상승하였다. 특히 낮은 주파수(10 ~ 100 Hz)에서 비유전율과 $\tan \delta$ 가 급격하게 상승되었다. 상용주파수가 60[Hz]임을 감안하고, 변압기의 사용온도가 90[°C]라고 하였을 경우에는 부상의 유전특성이 크게 변한다는 것을 알 수 있다.

그림 3은 일반 세라믹 제품의 평가 주파수인 1 [kHz]에서 측정된 A사 및 B사 부상의 비유전율과 $\tan \delta$ 를 나타냈다. 그림에 나타난 것과 같이 A사 보다는 B사의 비유전율과 $\tan \delta$ 가 큰 것으로 나타났다. 이것은 부상의 원료에 포함되어 있는 불순물(알카리 금속이온, 알카리 토금속 이온 등)에 의한 것으로 판단된다. 이것은 부상을 유도결합 플라즈마 분석기로 분석한 결과와 같이 미량 포함된 기타 성분(Na₂O, MgO 등)의 함량이 B사의 부상에서 많이 검출된 것과 상관성이 있을 것으로 판단된다.

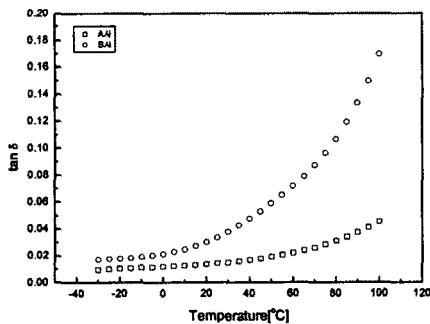
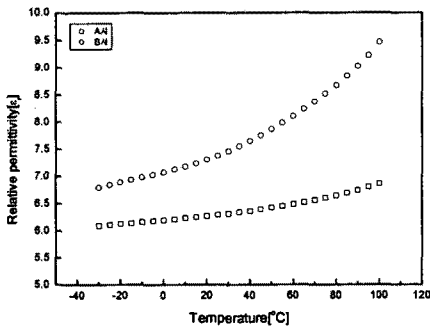


그림 3. A사 및 B사 부상의 유전특성 비교

3.2 변압기 부상 기계적 강도

변압기 부상의 파손은 주로 클램프 단자와 애관이 접촉되어 있는 부상의 상부에서 발생하는 경우와 외함과 부상을 조립하기 위한 고정 환에서 파손되는 두 가지 경우로 나타나고 있다. 이 연구에서는 애관의 상부에서 파손되는 경우에 대하여 집중적으로 분석하였다.

3.2.1 부상 상부의 단면도 및 실물

그림 4는 부상 상부를 절단한 단면을 보여주고 있다. 그림에 부상의 균열이 발생하는 위치를 표시하였다. 파손되는 위치는 클램프 보울트를 넣는 부분 중에 나비모양을 하고 있는 자기의 두께가 가장 얇은 부분에서 주로 균열이 성장하였고 이 부분이 가장 취약하다는 것을 알 수 있다.

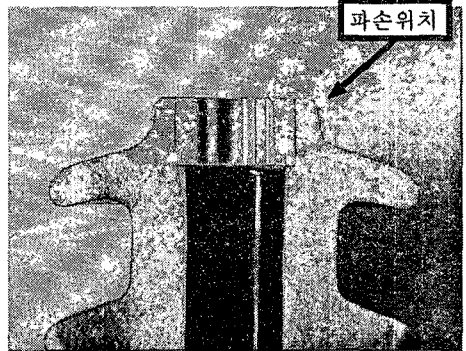
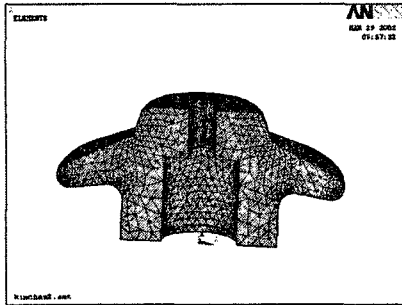


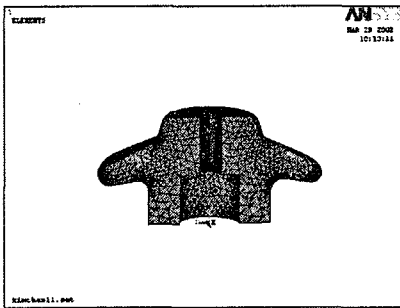
그림 4. 부상 상부를 절단한 단면

3.2.2 기계적 강도 해석

그림 5는 형상변경 전후의 단면을 유한요소법에 의해 분할한 mesh를 나타내고, 그림 6은 형상변경 전후의 Von-Mises 응력을 나타내고 있다. 표 2에는 Young's modulus를 10020kgf, Poisson's ratio를 0.2, 그리고 부상의 항복응력을 고려하여 최대 하중 Torque 12,000kgf를 적용하고 계산한 Von-Mises 응력을 나타냈다. 부상의 형상을 변경한 후에 계산한 Von-Mises 응력이 50%정도 감소되고 있음을 알 수 있다. 따라서 변압기 부상의 상부를 본 연구에서 제안한 것과 같이 변경하였을 경우에는 부상 상부의 파손에 의한 고장이 크게 감소될 것으로 판단된다.

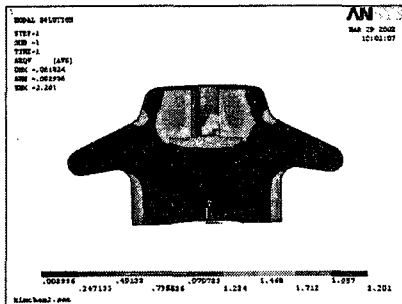


(a) 형상변형 전 단면 mesh

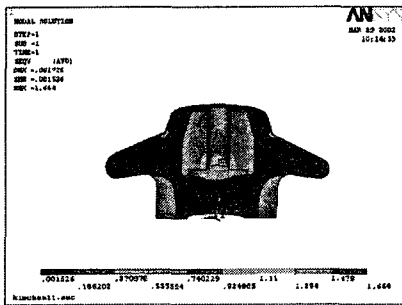


(b) 형상변형 후 단면 mesh

그림 5. 형상 변경 전과 후의 단면 mesh



(a) 형상변형 전 단면 Von-Mises



(b) 형상변형 후 단면 Von-Mises

그림 6. 형상 변경 전후의 단면의 Von-Mises 응력

표 2. Von-Mises 응력값(단위 : kgf / mm²)

자유도 형상변경	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ	Von-Mises
전	0.63	0.17	1.18	0.19	0.48	0.43	2.48
후	0.44	0.14	1.00	0.18	0.68	0.29	1.66

4. 결론

국내에서 제작된 부싱에 대하여 특성을 분석하였고, 현수애자와의 성능을 비교하였다. 또한 부싱의 기계적 강도해석은 기존의 부싱과 클램프 볼트를 넣는 부분의 자기의 길이를 10 mm 증가시킨 형상변경 전후의 부싱에 대하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- 가. A사 부싱이 B사 부싱에 비하여 불순물 함량이 적다.
- 나. B사 부싱의 유전특성(비유전율, $\tan \delta$)은 A사 부싱보다 온도가 증가함에 따라 유전특성이 급격히 증가한다.
- 다. 부싱에는 기계적 강도를 향상시키는 corundum 결정상이 전혀 성장되지 않았다.
- 마. 부싱의 형상을 변경한 후에 계산한 Von-Mises 응력이 50%정도 감소되었다.

변압기 부싱의 상부를 본 연구에서 제안한 것과 같이 형상을 변경하였을 경우에는 부싱 상부의 파손에 의한 고장이 크게 감소될 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] W. D. Kingery, Introduction to ceramics, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 402-458, 1960.
- [2] 김찬영외, 자기제 현수애자의 미세구조분석과 유전특성에 관한 연구, 대한전기학회 논문지, 제 48권, 9호, C, pp. 641-647, 1999.
- [3] 송일근외, 배전기자재 수명예측 기준제정, 전력연구원 최종보고서, pp. 26-37, 2000.
- [4] 김찬영, 김주용, 송일근, 이병성, "배전용 현수애자의 특성분석", 한국 전기전자재료학회 논문지, Vol. 13. No. 3. pp. 259-264, March 2000.
- [5] "がいし", 日本電氣學會, pp. 27 - 56, 1983.