

22.9 kV 수전설비 시스템에 설치된 계기용변성기의 소손원인 판정에 관한 연구

A Study on the Analysis of Damage Cause for MOF Installed in 22.9 kV Power Receiving System

김향곤[†] · 송길목 · 김동욱 · 최충석

Hyang-Kon Kim[†] · Kil-Mok Shong · Dong-Ook Kim · Chung-Seog Choi

전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)
(2005. 2. 4. 접수/2005. 3. 24. 채택)

요 약

본 논문은 22.9kV 수전설비에 설치된 계기용변성기의 소손원인을 판정하는 데 있다. 복원된 MOF의 입체적 분석에서 사고는 내부에서 외부로 진행되었으며, 상부는 소손이 없었다. 탄화 중심부의 저항은 약 100 kΩ이며, 금속조직 분석결과 내부의 발열 온도는 300~800°C 정도로 추정된다. 금속표면의 2차 전자 이미지 분석에서 구조 및 조성비는 유사했다. 적외선 흡광스펙트럼(FT-IR) 분석에서 1500 cm⁻¹과 1730 cm⁻¹에서 흡광피크가 작아진 것을 알 수 있다. 열분석(DTA)에서 권선의 중심부에서 열적 피로가 큰 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to judge the damage cause of instrument transformer(MOF; Metering Out Fit) installed in 22.9 kV power receiving system. In the three-dimensional analysis of the restored MOF, the damage pattern progressed from inside to outside, there was no damaged part in the upside. The resistance of the carbonized middle part is roughly 100 kΩ, and the exothermic temperature at inside is presumed as about 300~800°C in the result of metallurgical structure analysis. The structure and the composition rate on metal surface by SEM is similar. In the result of FT-IR analysis, we can observe the absorbtion peak at 1500 cm⁻¹ and 1730 cm⁻¹ is small. The high exothermic peak showed at the center part of the coil in the result of DTA.

Keywords : MOF, Power receiving system, Columnar structure, SEM, FT-IR, DTA

1. 서 론

전기는 인간 활동의 삶의 질 향상에 많은 기여를 하는 반면, 부주의한 사용과 제작상의 결함, 설계의 문제점 등 다양한 원인에 의해 전기재해를 유발하게 된다. 전기재해는 크게 인체에 직접적인 영향을 주는 감전사고, 화재사고, 설비사고 등으로 구분될 수 있다. 전기화재의 출화형태는 전기배선 또는 전기기기로부터의 출화, 누전에 의한 출화, 정전기 불꽃에 의한 출화 등으로 나눈다. 일반적으로 전기설비에서 수전설비라 하면 수전점에서 변압기 1차 측까지의 설비를 말하는 것으로 우리가 전기를 안정적으로 사용하기 위한 완충설

비이다. 수전설비에는 변압기(Tr), 차단기(CB), 계전기(Ry), 계기용변성기(MOF) 등이 설치되어 있다. MOF는 계기용변압기(PT)와 계기용변류기(CT)를 조합한 것으로 2차측 부하는 계기나 계전기이다.¹⁻⁷⁾

본 연구에서는 실제 수전설비에 설치되어 사용 중 소손된 MOF를 대상으로 실제 및 금속현미경, EDX, SEM, FT-IR, DTA 등을 이용한 다양한 방법을 통하여 MOF의 소손 원인을 규명하고자 하며 향후 MOF의 소손 원인 분석에 도움을 주고자 한다.

2. 이 론

2.1 계기용변성기의 구조

계기용변성기는 고전압을 사용하는 설비에 큰 변압

[†] E-mail: kon0704@kesco.or.kr

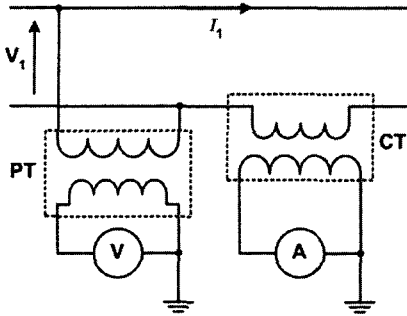


Fig. 1. Circuit of Metering Out Fit (MOF).

비와 변류비를 이용하여 전압과 전류를 계측하는 것으로 일반적으로 사용되는 구조는 건식, 몰드형(mold type), 유입식 등이 있다. 최근 유기질 절연재료의 발달에 따라 몰드형이 육내 고전압설비에 많이 이용되는 경향이 있다. 고전압 회로의 전압, 전류 또는 저압회로의 큰 전류를 측정하는 경우와 계전기(relay) 종류 등을 사용하는 경우에는 취급에 대한 안전을 고려하여 설치된다. 계기용변성기(metering out fit; MOF)는 계기용변압기(potential transformer; PT)와 계기용변류기(current transformer; CT)가 조합되어 있다. 계기용변압기는 1차 전압이 정격전압의 경우에 2차 전압이 110V가 되도록 설계하고, 변류기는 1차 측에 정격전류가 흐를 때 2차 전류는 5A이다. MOF의 일반적인 회로구성을 보면 Fig. 1과 같이 계기용변압기와 변류기로 구성되어 있으며, 1차 측을 피측정 회로로 하고 2차 측을 전압계 또는 전류계 등에 접속한다. 일반적인 전력용 변압기의 원리, 구조와 비교하여 큰 차이는 없으나, 변압비를 정확하게 하기 위해 1차 권선과 2차 권선의 임피던스 강하 및 여자전류를 작게 설계 한다.

연구에 적용된 몰드형 계기용변압기는 권철심형의 외철형으로 권철심 사이에 1차 및 2차 권선이 있는 것을 알 수 있다. 모델은 YHM-20 BD로서 절연계급이 20·A호이며 변압비는 13200/110V이고, 변류비는 150/5A로 되어 있다. 정격부담은 25VA, 정격주파수는 60Hz이다.

2.2 계기용변성기의 소손원인

교류 고전압이나 대전류를 측정하는 경우 계기를 직접 회로에 접속하면 위험할 뿐만 아니라 전력설비를 효율적으로 제어하기 어렵다. 따라서 주 회로와 절연하여 전압, 전류를 계기로 측정할 수 있는 적당한 값으로 변환하여 계측이 가능하도록 구성된 계기용변성기(MOF)는 측정 보조 장치로 이용되는 것으로 투자율이 크고 철손이 작은 철심을 이용해서 여자전류를 극

히 작게 하고 또한 누설자속과 권선저항을 작게 하여 1차 및 2차 권선에 임피던스 전압강하를 될 수 있는 한 작게 하여 변환할 때 오차를 일으키지 않도록 하여야 한다. 그런데 시스템을 부적절하게 운용하면 다음과 같은 유형의 사고가 발생하게 된다.

첫째, 제작 결함에 의한 사고로 층간단락, 권선간 단락, 절연 불량에 의한 단락 등이 있으며 이는 원래의 설비 목적을 무시하고 사용된 경우에도 발생한다. 과도한 부담에 의해 발생하는 것으로 계측 외에 조명이나 기타 업무에 이용될 경우 사고로 이어질 수 있다.

둘째, 전력설비에 설치시 취급 불량에 따른 균열로 절연재료에 발생한 틈으로 이물질이 침투되어 절연능이 저하되면서 절연파괴로 이어진다.

셋째, 관리 및 회로 구성 방식 등의 착오로 인해 철공진(ferro-resonance)에 의한 사고가 발생할 수 있다. 이것은 철심이 사용된 리액터와 콘덴서와의 직렬 또는 병렬회로에서 일어나는 공진으로 리액터의 비직진성에 기인하는 것으로 주파수를 바꾸지 않아도 전압을 변화시킴으로써 일어난다. 직렬 철공진에서는 전류의 도약, 히스테리시스 등이 일어나는 경우가 있고, 병렬 철공진은 철공진 전압 안정기에 응용된다.

넷째, 계기용변압기는 사용 중에 절대로 2차 측을 단락해서는 안된다. 이것은 전력용 변압기와 마찬가지로 커다란 단락전류가 흘러서 코일을 소손시키기 때문이다.

다섯째, 변류기의 경우 사용 중에 2차 측을 개방하면 1차 전류가 모두 여자전류가 되어 철심의 자속밀도가 대단히 커져 철손이 증가하고, 2차 측에 고전압이 유도되어 절연파괴를 일으킬 위험이 있다.⁸⁻¹⁰⁾

3. 실험결과 및 분석

3.1 소손된 MOF의 복원 및 분석

Fig. 2는 소손된 MOF의 실체사진을 나타낸 것이다.

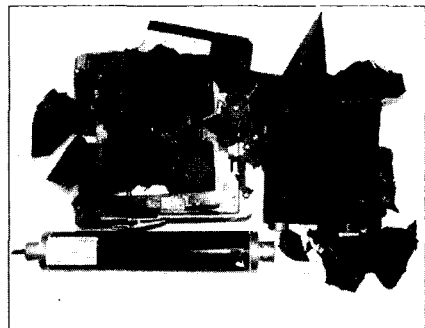


Fig. 2. Stereograph of the damaged MOF.

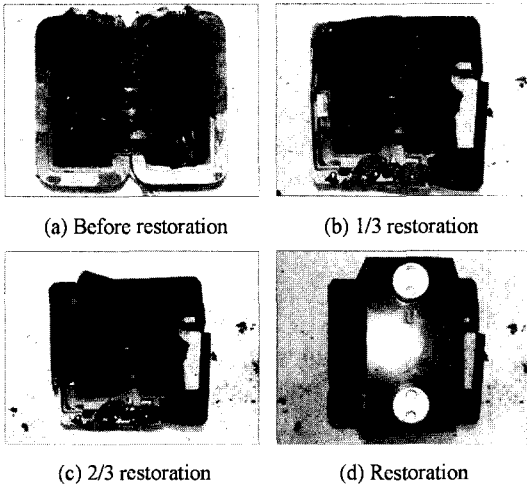


Fig. 3. Restoration progress of the upside.

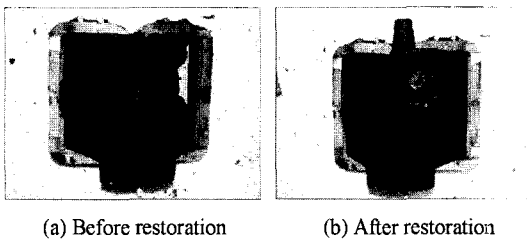


Fig. 4. Restoration progress of the lower part.

절연물로는 에폭시 수지가 사용되었으며 심하게 파손된 것을 알 수 있다. 소손된 내부가 검정색으로 탄화되었으며, 외부는 고유의 암갈색을 띠고 있다.

Fig. 3은 소손된 MOF 상부의 복원과정을 나타낸 것이다. 이러한 복원과정을 통하여 절연재료의 소손이 어떤 패턴으로 확산되었는지 그 확대범위 등을 알 수 있다. Fig. 3(a)는 복원 전으로 심하게 탄화되고 권선(코일)의 일부가 용단된 것을 알 수 있다. 복원이 완료된 Fig. 3(d)의 사진을 보면 정상적인 형태를 보이고 있다. 즉 외부적인 요인에 의해 소손은 없었던 것으로 판단된다.

Fig. 4는 소손된 MOF 하부의 복원과정을 나타낸 것으로 여러 개의 조각으로 심하게 파손되었으며 Fig. 4(b)에서와 같이 검은 그을음(soot)이 많이 탄화된 절연물에 부착되어 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 정상상태의 MOF와 Fig. 2의 소손된 MOF를 복원한 것을 비교한 것으로 MOF의 소손된 원인은 외부적인 요인보다는 내부에서 발생한 이상요인에 의해 외부로 발산된 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 2와 같이 소손된 MOF의 하부측 권선

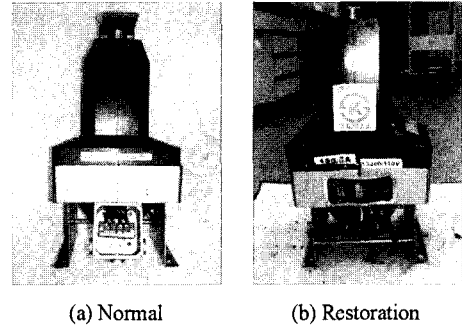
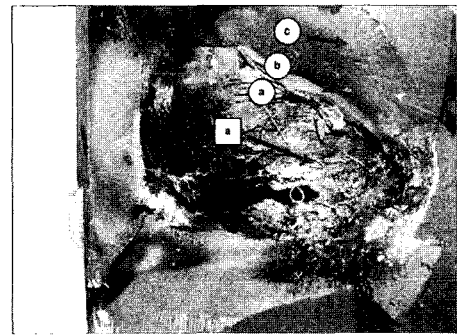
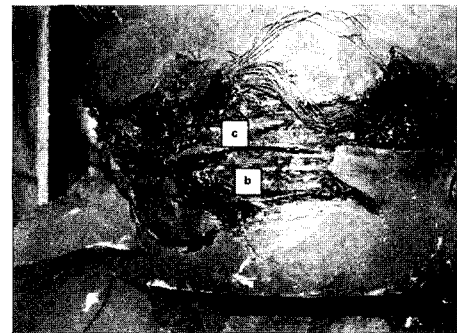


Fig. 5. Comparison normal with restored MOF.



(a) The coil of the lower part



(b) The coil of the upside

Fig. 6. The pattern analysis of carbonization depth for MOF.

(코일)과 상부측 권선(코일)의 외형을 확대한 것이다. Fig. 6(a)는 하부측 코일의 소손 형태로 권선이 전체적으로 심하게 탄화된 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)는 상부측 권선의 외형으로 Fig. 6(a)과 유사한 탄화패턴을 보이며 권선 전체가 균일하게 열화(劣化)되어 소손된 것을 알 수 있다.

3.2 탄화물의 저항 특성

Fig. 7은 탄화가 가장 심하게 발생한 부분의 저항 특

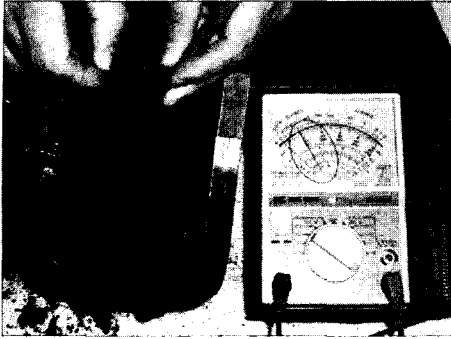


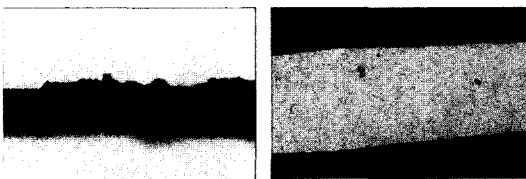
Fig. 7. The resistance measurement of carbonized MOF.

성을 멀티테스터(HC-260TR, Hung Chang, Korea)로 측정한 것이다. 일반적으로 절연재료는 특성상 1 MΩ 이상의 저항을 나타내나 소손품은 약 100 kΩ을 나타냈다. 이 수치는 내부에서 트래킹이 왕성하게 진행됐다고 단언하기에는 무리가 있는 것으로 판단되나 100 kΩ 정도의 저항이 측정되었다는 것은 균열, 오염, 트래킹, 권선 소손(층간단락) 등 어떤 형태이든 절연물이 열화(劣化)되어 사고로 이어졌음을 의미한다.

3.3 금속조직 분석

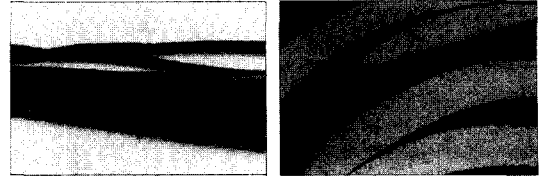
Fig. 8은 Fig. 6(a)의 [a]부분을 나타낸 실체현미경 사진으로 절연물이 심하게 탄화되어 권선(코일)에 부착되어 있다. (b)는 (a)의 금속단면 조직을 나타낸 것이다. 단면은 열에 의해 입자가 일부 성장된 형태를 보이나 1,000°C 이상의 높은 고열 혹은 순간 열에 의한 주상조직 등은 확인할 수 없었다. 따라서 내부에서 발생한 열의 범위는 절연재료를 연화 및 탄화 시킬 수 있는 온도인 300~800°C 정도의 열이 발생한 것으로 판단된다. 즉 탄화의 특징은 내부에서 발열이 생겨 외부로 확산된 유형을 의미한다.

Fig. 9는 Fig. 6(b)의 [b]부분을 나타낸 실체현미경 사진이다. 코일 표면에 절연재료가 탄화되어 달라붙어 있는 것을 확인할 수 있다. 코일 외형의 변화는 거의 이루어지지 않은 상태로 금속단면을 분석하기 위해 성형



(a) Stereograph (b) Metallograph

Fig. 8. [a] part of Fig. 6(a).



(a) Stereograph (b) Metallograph

Fig. 9. [b] part of Fig. 6(b).

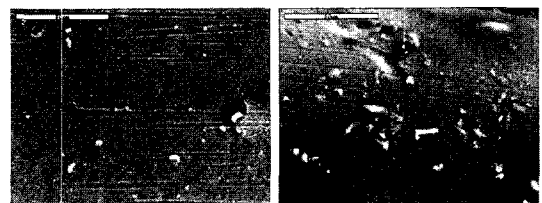
(molding)과 연마(grinding and polishing)를 하여 단면을 에칭(etching)한 다음 현미경으로 촬영하였다. Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)의 금속단면 조직을 나타낸 것이다. 단면은 열에 의해 입자가 일부 성장된 형태를 보이나 1,000°C 이상의 높은 고열에서 혹은 순간 열에 의한 주상 혹은 수지상 조직이나 결정립계 균열(inter-crystalline crack)과 같은 형태는 확인할 수 없었다. 따라서 내부에서 발생한 열의 범위는 절연재료를 연화 및 탄화 시킬 수 있는 온도인 300~800°C 사이에서 열이 발생한 것으로 판단된다.

3.4 금속 표면의 2차전자 이미지 분석

Fig. 10은 Fig. 6의 권선(코일) 일부를 채취하여 주사전자현미경(SEM)과 에너지분산분석기(EDX)를 이용해 나타난 2차 전자 이미지이다. 사진에서 알 수 있듯이 표면은 소손이 거의 없고 비교적 양호한 상태를 보이며, Fig. 6(a)의 [a]부분 조성을 분석한 결과 탄소(C) 32.8%, 산소(O) 13.2%, 구리(Cu) 54.0%의 함량비를 나타내었다. Fig. 10(b)는 Fig. 6(b)의 [b]부분을 분석한 결과 조성은 탄소(C) 40.1%, 산소(O) 21.4%, 구리(Cu) 38.5%의 함량비를 나타냈다. 이는 거의 비슷한 비율이며 [b]부분의 코일에서 탄소나 산소의 비가 높은 것은 코일의 직경이 [a]부분 코일보다 가늘어 용융과 재결합이 왕성했기 때문으로 판단된다.

3.5 절연물의 화학적 특성 분석

Fig. 11은 MOF에 사용된 절연재료의 적외선 흡광스



(a) [a] part of Fig. 6(a) (b) [b] part of Fig. 6(b)

Fig. 10. SEM images of the coil surface.

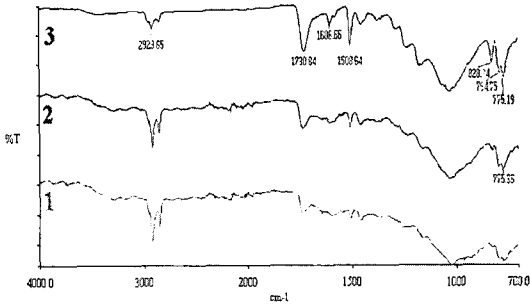


Fig. 11. IR spectrum analysis of insulation material.

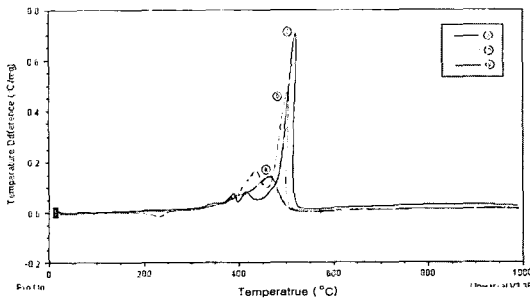


Fig. 12. DTA curves of insulation material.

펙트럼(FT-IR)을 분석한 것으로 약 1500 cm^{-1} 과 1730 cm^{-1} 에서 나타나는 흡광피크가 권선(코일)에 가까울수록 작아지는 것을 알 수 있었다. 즉 “3”의 곡선이 유기질 절연재료를 구성하는 기본 형태이며, “2”, “1” 곡선으로 갈수록 기본형태가 변형되는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 6(a)의 ㉠, ㉡, ㉢ 부분을 열 분석기(DTA)에 의해 시차 열분석한 것을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 ㉢는 가장 큰 발열반응을 나타내며 약 520°C 부근에서 큰 발열피크가 나타나고 있다. ㉡는 ㉢ 부분에 비해 낮은 온도에서 발열피크가 발생한 것을 알 수 있다. ㉠는 권선(코일) 부분과 가장 가까운 부분으로 열적으로 가장 많이 탄화된 부분이다. 시차 열분석에서도 발열피크는 정상과 중간부분의 탄화된 정도보다 낮은 온도에서 나타났다. 즉 열적으로 변형된 절연재료는 권선(코일) 부분에서 가장 많은 열적 피로를 받은 것으로 판단된다.^{11,12)}

4. 결 언

22.9 kV 수전설비에 설치되는 계기용변성기의 소손원인을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 소손된 계기용변성기(MOF)의 상부 및 하부를 각각 복원한 결과 소손은 내부에서 발생하여 외부로 확

산되는 탄화패턴을 보였다.

2) 탄화물의 저항 특성을 측정된 결과 $100\text{ k}\Omega$ 정도로 나타나 내부에서 트래킹이 진행됐다고 단언하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다. 그러나 $100\text{ k}\Omega$ 정도의 저항이 측정되었다는 것은 어떤 형태이든 내부에서 열화가 진행되었음을 의미한다.

3) 소손된 권선(코일)의 실체 및 금속 현미경 분석에서 금속의 구조변화는 거의 이루어지지 않았으나, 내부 절연파괴(층간단락 또는 트래킹)에 의해 $300\sim 800^{\circ}\text{C}$ 정도의 열이 발생한 것으로 판단된다.

4) 주사전자현미경(SEM)과 에너지분산분석기(EDX)를 이용한 분석에서 MOF 내부의 탄화된 권선들은 탄소(C), 산소(O), 구리(Cu) 등 유사한 성분비를 나타냈다.

5) 소손된 절연재료의 적외선 흡광스펙트럼(FT-IR) 분석에서 약 1500 cm^{-1} 과 1730 cm^{-1} 에서 나타나는 흡광피크가 권선(코일)에서 가까울수록 작아진 것을 알 수 있다. 즉, 권선(코일)에서 멀어질수록 유기질 절연재료를 구성하는 기본 형태를 유지하며 권선(코일)에서 가까울수록 많이 변화됨을 확인하였다.

6) 열 분석기(DTA)에 의한 분석에서 권선(코일)을 중심으로 열적 피로가 가장 심하였고 외부로 갈수록 열적인 영향을 받지 않고 단지 기계적으로 균열된 것이 확인되었다.

이상과 같이 MOF의 소손원인에 대하여 다양한 각도에서 분석하였으며 원인분석 결과에서 알 수 있듯이 MOF의 내부적인 원인에 의해 사고가 발생했음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반 기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 최충석 외 5, “전기화재공학”, 도서출판 동화기술, pp.189-198(2004).
2. 한국전기안전공사, “전기재해 통계분석”, pp.10-50 (2003).
3. C.S. Choi *et al.*, “The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current”, 2003 J-K Joint Symp. on ED&HVE, pp.145-148 (2003).
4. 길형준 외 3, “건설현장의 수전설비 및 배·분전반의 현장실태 분석”, 한국조명·전기설비학회 춘계학술대회 논문집, pp.335-340(2004).

5. C.S. Choi *et al.*, "The Statistical Analysis and Investigation of Field Condition About Electrical Shock Accidents and Risk Factors in Temporary Power Installations", *International Journal of Safety*, Vol. 2, No. 2, pp.22-28(2003).
6. V. Babrauskas, "Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing", *Fire and Materials*, pp.189-201(2003).
7. Sheera Knecht *et al.*, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", 1996 InterSociety Conference on Thermal Phenomena, pp.329-333(1996).
8. L.D. Chua, "Introduction to Nonlinear Network Theory", McGraw Hill(1969).
9. P.D. Peterson, "Computer Aided Design of Ferroresonant Voltage Regulators", *IEEE Magazine*, Vol. MAG-11, pp.71-79(1975).
10. Kerstin Kunde *et al.*, "Damping Ferroresonance in Transmission Networks", *Electron*, Vol. 13, Iss. 11, pp.37-40(1997).
11. 송길목 외 3, "트래킹에 의해 열화된 페놀수지의 탄화 특성", *대한전기학회*, Vol. 53C, No. 1, pp.1-7 (2003).
12. 최충석 외 2, "누전차단기 외함 전원측 단자사이의 트래킹에 의한 탄화특성 분석", *한국화재소방학회논문지*, Vol. 17, No. 4, pp.13-19(2003).