

변압기 열화 상태 감지를 위한 CNT 센서 제작

김용국^{1,2}, 신경¹, 주병권²

¹(주)에스앤에스레볼루션,

²디스플레이 및 나노시스템 연구실, 고려대학교

Fabrication of CNT sensor to measure degradation of transformer

Yong-Kook Kim^{1,2}, Kyoung Shin¹, Byeong-Kwon Ju²

¹SNS Revolution Co., Ltd.,

²Display and Nanosystem Lab., College of Engineering, Korea University

Abstract - 본 논문에서는 변압기 절연유 상태를 측정하여 변압기 열화 정도를 분석할 수 있는 CNT 센서를 개발하였다. 센서의 감지막 형성을 위해 MWCNT(multi walled carbon nanotube)로 CNT paste를 제작하고 이를 프린팅공정을 이용하여 그 규격을 최적화하였다. 제작된 CNT 센서를 이용하여 절연유 상태를 분석하고 이를 전기·화학적 분석을 통하여 변압기 열화 정도를 확인하였다. 변압기 사용 여부에 따른 센서의 특성과 절연유의 산화, 절연과과전압 등 기타 특성과 비교하여 변압기 절연유의 열화 정도를 확인하였다. 변압기 과부하 및 과전류에 의해 열화가 진행되어 전산가가 높아지면 이를 CNT 감지막의 전기적 특성 변화로 확인할 수 있다. 개발된 CNT 센서를 이용하면 변압기 열화 정도를 실시간으로 확인할 수 있어 변압기 사용에 있어서 안정성 확보 및 유지관리에 경제성을 높일 수 있다.

1. 서 론

국내의 산업 발전과 함께 전기 사용량의 증가로 인해 전력 시설 및 그에 따른 부대시설이 증설되고 있다. 전력 수요의 급증은 전력 배분의 마지막 단계에 위치한 변압기에 과부하 현상을 빈번히 발생시키며 특히 변압기 과부하 과전류 현상으로 인하여 주상 변압기 오일의 열화 현상이 심화된다. 이로 인해 변압기 내의 절연과과 전압이 잦아지고 변압기의 폭발 및 안전사고 등의 위험이 초래되며 전력 손실의 증가로 나타나고 있다.

따라서 변압기 안전사고 예방과 관리 기술에 대한 관심과 요구가 크게 확대되고 있다. 변전용 변압기가 받는 주요한 열화 원인은 과부하, 고온 운전에 따른 열적 열화현상, 외부 단락전류 유입에 의한 단시간의 열적 열화현상, 진동에 의한 기계적 손상현상, 부분방전 열화현상으로 구분할 수 있다. 유입변압기기의 내부에 이상 현상(즉, 절연과과전압, 국부과열 등)이 생기면 반드시 열 발생을 수반함으로써 이 발열원에 접촉한 절연유, 절연지, 프레스 보드 등의 절연재료가 열의 영향을 받아 성분 분해하여 CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₂ 등의 탄화수소계 가스를 발생하며, 그 대부분은 절연유에 용해된다. 이로 인해 절연유의 기능이 저하되면 온도상승을 통해 변압기 수명이 줄어들며 절연과과전압 소손과 같은 중대사고가 발생 할 위험성이 있다.[1]

따라서 절연유의 열화정도를 점검하는 것은 변압기 이상 유무 및 그 정도를 파악하는데 중요한 자료로 사용될 수 있다. 이에 따라 변압기를 운영 관리하는 새로운 기술이 개발되고 유지 정비하는 관리 기법도 많이 도입되고 있다. 그러나 지상이나 건물에 설치된 대용량 변압기에 비해 배전용 주상 변압기에 대한 관리 및 진단 기술은 아직 미미한 실정이다. 유입변압기의 이상 진단법은, tan δ, 절연과과전압, 유전손실률을 이용하는 전기적 특성치 이용 진단법이 있으며, 절연유의 수분량, 전산가 등을 측정하여 이용하는 물리 화학적 특성치 이상 진단법이 있다.[2] 현재 대용량 유입변압기에 대해서는 절연유 측정과 절연유 중의 가스를 추출하여 분석하는 등 예방진단 관련 연구가 활발히 진행 중이고 실용화 하고 있다.

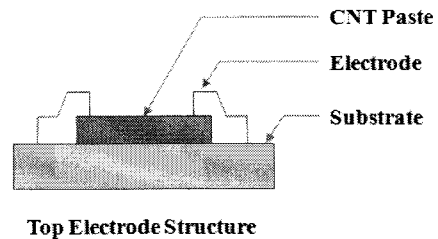
본 논문에서는 변압기 오일의 열화 상태를 진단하기 위해 고감도 센서로 활용되고 있는 CNT로 센서를 제작하였다.[3] 가스센서로 활용되고 있는 감지력이 우수한 CNT로 박막을 형성하여 오일의 전산가를 감지할 수 있는 센서를 개발하였다.[4] 이는 기존 마이크로일센서 보다 우수한 감지능력을 가진다.[5] MWCNT로 CNT Paste를 제작시 센서의 수율향상을 위해 초음파 분산 공정을 사용하였다.[6] 제작된 CNT Paste는 공정이 단순하며 대량생산이 가능한 프린팅 공정을 이용해 감지막으로 형성되었다. 그 후 E-beam evaporator로 전극을 증착하여 센서로 제작하였다. 제작된 센서는 변압기 오일의 종류에 따라 측정하여 테스트 되었고 측정된 Data와 오일의 절연내력 및 산가도 측정 기준(KSC 2301)에 의해 측정된 값과 비교하였다.

2. 본 론

2.1 센서 제작

2.1.1 센서 구조

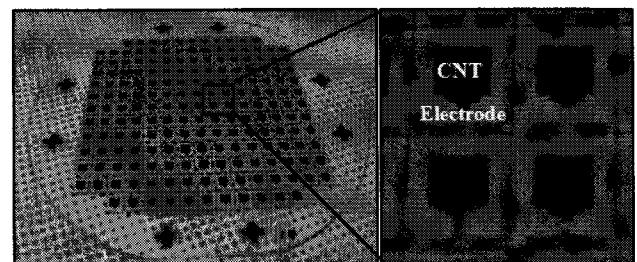
센서 제작시 CNT 막의 전기적 특성 균일성 확보를 위해서는 CNT 분산 및 센서 구조가 중요한 작용을 한다. CNT 감지막의 균일성 확보를 위해 감지막 면적 및 위치에 따른 특성 분석을 하였다. 그림 1과 같은 구조에서 감지막의 면적을 달리하여 테스트하여 규격을 최적화 하였다. 기판은 유리, Si, Al₂O₃으로 사용 될 수 있는데 본 논문에서는 유리 기판을 활용하였다. 전극으로는 Cr, Au가 사용되었다. 기판과의 접착력을 위해 Cr이 사용되고 전극 전도성 향상을 위한 Au가 사용 되었다. 감지막은 MWCNT를 paste로 제작해 프린팅 공정을 통해 형성되었다.



<그림 1> 변압기 오일 CNT 센서 구조

2.1.2 센서 제작 공정

센서 감지막을 프린팅 공정으로 형성하기 위해 CNT paste를 제조하였다. CNT powder는 일진 나노텍에서 CVD 법으로 제조된 multi wall CNT를 사용하였다. CNT와 glass frit를 조성비와 맞게 칭량하여 혼합한 후 에틸셀룰로오스와 일정 비율로 혼합하여 1시간 동안 초음파 분산 공정을 통하여 균일하게 분산시켰다. 그 후 알파 테피놀을 소량 첨가하여 점도를 조절하여 인쇄성이 우수한 CNT 페이스트를 제조하였다. 제작된 CNT Paste를 4 inch 웨이퍼에 400 Mesh 스크린 프린터 마스크를 이용하여 프린팅 하였다. 전극은 Metal shadow Mask를 이용하여 E-beam evaporator로 증착하였다. 전극용 금속으로는 Au(200nm)를 사용하였으며 기판과 전극과의 접착력을 향상시키기 위해 버퍼층 Cr(30nm)이 증착되었다.



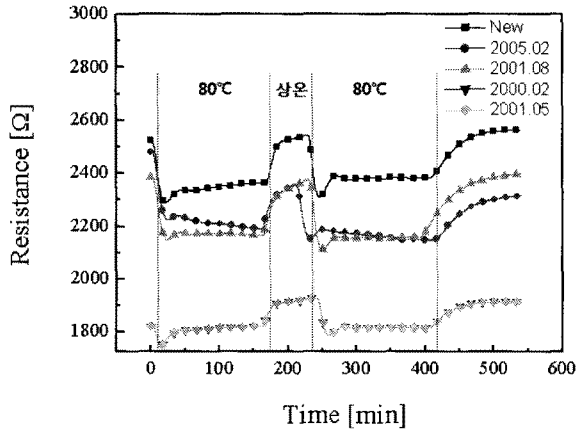
<그림 2> 제작된 변압기 오일 CNT 센서

2.2 CNT 센서를 이용한 변압기 오일 특성 분석 결과

2.2.1 변압기 오일 Lab. Test

변압기 오일의 특성 평가를 위해 샘플 추출이 우선시 되어야 한다. 변압기 오일 추출을 위해 사용된 변압기의 설치시기 및 샘플 수거시기를 기록하여 일정량을 추출하였다. 샘플 추출 후 오일을 Hot Plate 위에서 상온에서 80°C까지 변화시키며 Hydra multimeter로 측정하였다. 변압기 오일의 특성은 오일에 접촉된 CNT 센서를 이용해 확인하였다.

그림 3은 이때 측정값을 나타낸다. 각 샘플은 변압기 설치 시기로 구분되어지며 수거 시기는 동일한 것이다. 이 때 변압기 사용 여부에 따른 관계를 확인하기 위해 변압기 새 오일을 같이 측정하여 비교하였다. 오일의 온도가 상온에서 80°C로 변화시키면 그림과 같이 저항이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 새 오일에 비해 사용된 오일에서 측정된 CNT 센서의 저항이 더 작아지는 것을 확인할 수 있다. 사용된 오일이 산화에 의해 열화 되어 CNT 센서의 전기적 특성을 변화 시킨 것으로 추정되어진다. 설치시기와 저항의 변화는 선형적으로 변화하지 않는 것을 확인할 수 있는데 이는 사용시기와 무관하게 변압기가 열화 된다고 볼 수 있다.



〈그림 3〉 변압기 오일과 접촉한 CNT 센서의 전기적 특성

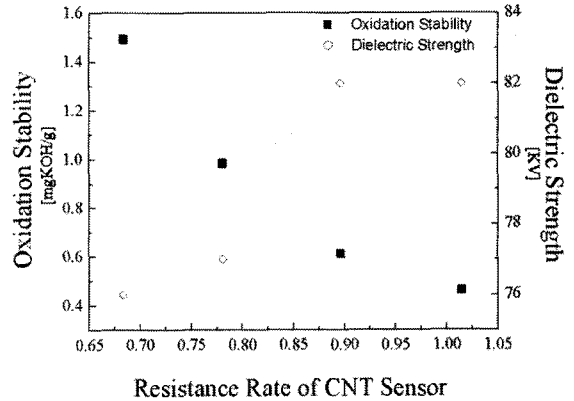
2.2.2 변압기 오일의 전기 화학적 분석

CNT 센서를 이용한 변압기 오일의 전기적 특성 분석 값을 통해 열화 정도를 확인하기 위해서는 변압기 오일의 열화 정도를 분석기관에 의뢰하여 확인해야 한다. 표 1은 분석기관에 의뢰한 오일의 특성 및 CNT 센서를 이용한 전기적 특성 분석 결과를 나타낸다. 이 때 CNT 센서의 저항은 센서 제작 후 초기 저항으로 나누어 저항비로 표기하여 제작된 센서의 특성 불균일에서 발생할 수 있는 문제를 제거하였다. 표 1을 통해 CNT 센서를 이용한 변압기 오일의 산화안정도, 산가, 절연과피전압, 미량 수분 등과 같은 열화 정도를 나타내는 파라미터와 비교가 가능해진다. 표에서 확인할 수 있듯이 오일들의 열화 파라미터와 CNT 센서의 특성 변화와의 경향성이 확인 가능하다.

〈표 1〉 변압기 오일의 전기 화학적 분석

종 명 (Name)	OT 2 (KS C 2301-2)	1	2	3	4	
변압기 제조일자		2000	1996	2002	1994	
샘플 채취 일자		2007.11	2007.11	2007.11	2007.11	
동점도	40°CcSt	13이하	9.788	8.970	8.920	9.929
	100°CcSt	4이하	2.422	2.332	2.398	2.436
Oxidation Stability	전산가 mgKOH/g	0.6이하	0.983	0.464	1.492	0.612
절연과피전압 2.5mm KV		30이상	77	82	76	82
미량수분	ppm		16	9	8	16
CNT 센서 특성 (at 70°C) Resistance Rate = ReaIR/InitiaIR			0.7804	1.0147	0.6834	0.8959

그림 4는 표 1에 경향성 확인이 가능한 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. 산가가 클수록 저항 비가 작은 것을 확인할 수 있는데 이는 저항비가 KOH이온의 증가로 인해 CNT 감지막의 전도도를 변화시켜 나타난 현상으로 추정된다. 그리고 절연과피 전압이 높을수록 저항비가 큰 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 CNT 센서를 이용한 변압기 오일의 전기적 특성 분석은 산가 및 절연과피전압 등과 같은 열화 정도를 나타내는 파라미터 분석을 대체 할 수 있다.



〈그림 4〉 변압기 오일 전기 화학적 특성

3. 결 론

본 논문은 변압기 오일의 열화 정도를 확인할 수 있는 CNT 센서 개발을 나타낸다. CNT 센서는 프린팅 공정을 활용하여 제작되므로 공정이 단순하며 저가 및 대량 생산이 가능하여 그 활용성 높이가 기대된다. 개발된 CNT 센서를 이용해 변압기 과부하 및 과전류에 의한 오일의 열화 정도를 나타내는 산가와 절연과피전압의 변화를 예측할 수 있다. CNT 센서의 저항비가 작아질수록 산가가 높아지며 절연과피전압이 작아지는 것을 확인하였다. 이는 CNT 센서의 저항비가 작아지면 변압기 오일이 과부하 및 과전류에 의해 열화 된 것을 의미한다. 또한 CNT 센서를 이용한 변압기 열화정도 확인은 실시간 측정이 가능하여 기존 방법에서 발생하는 경제적 손실을 줄일 수 있으며 전력시스템 관리를 용이하게 할 수 있다. 이와 같은 CNT 센서의 적용 및 활용을 위해서는 신뢰성 확보가 중요하다. 이를 위해서는 변압기의 과부하 및 과전류에 대한 정보가 필요하며 변압기 가속열화 실험을 통해 데이터 확보가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 고토 카즈미, 시오타 히로무, "변압기의 수명진단", 월간 전기기술 2001. 3, pp. 53-59, 2001.
- [2] 남창현, "절연유중 용존 수소가스 분석에 의한 변압기의 내부이상 진단 기술", 대한전기협회지, 2007(94.3), pp. 18-25, 1994.
- [3] 이은희, "탄소나노튜브의 물성과 응용", 새물리, 51권 2호, pp. 84-144, 2005.
- [4] S. I. Moon, K. K. Paek, Y. H. Lee, J. K. Kim, S. W. Kim and B. K. Ju. Electrochemical and Solid-State Letters, vol. 9, pp. H78_H80, 2006.
- [5] H. W. Ch. Postma, T. Teenpen, Z. Yao, M. Grifoni and C. Dekker, Science, 293, 76, 2001.
- [6] T. H. Kim, S. J. Kwon, H. H. Yoon, C. W. Chung and J. S. Kim, Colloids and Surface A, In Press, Corrected Proof, Available online 2 June, 2007.