

## 탄소나노튜브 센서를 활용한 변압기 유증가스분석 장비 개발

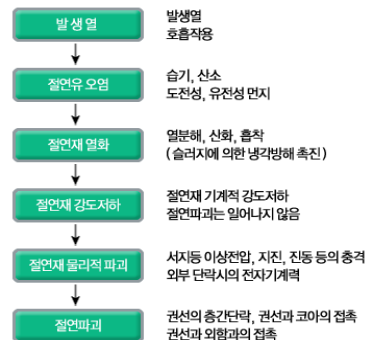
이상호, 윤상천, 김인곤  
KEPCO Academy

### A Development of Dissolved Gas Analyzer using Nanotube sensor

Sang ho Lee, Sang Cheon Youn, In gon Kim  
KEPCO Academy

**Abstract** - 해마다 KEPCO에서는 구매하는 배전기자재 구매비용중 변압기가 차지하는 비중은 1800여억원('10년)으로 최대 구매비중을 차지하고 있으며(32%) 계속 증가하고 있는 추세이다. 따라서 배전용 변압기의 효율적 관리 및 수명연장에 대해서는 다양한 연구 및 관리방안을 운영하고 있으며, 그중 유증 가스분석을 통해 변압기의 열화상태를 진단하는 방법을 현장에서 가장 신뢰성있는 방법으로 운영하고 있다. KEPCO에서는 변전용 대형변압기 및 배전용 지상변압기에 대하여 절연유를 채취하여 가스분석을 하고 자체기준에 의거 열화판정 기준으로 적용하고 있다. 하지만 이러한 방식이 절연유 채취후 운반과정에서의 신뢰성, 분석시간 장기간 소요, 분석비용 등 여러 가지 현안문제를 안고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완할 수 있는 변압기 진단방법을 제시하고, 새로운 방식에 대한 검증을 통해 현장 적용 가능성을 검토해 보고자 한다.

화를 더욱 촉진시켜 절연재의 기계적 강도를 저하시킨다. 위와 같은 이유로 열화된 절연재가 바로 절연과피 되는 것은 아니고 열화된 절연물이 서지, 진동, 외부단락 등의 충격에 기계적으로 파손되면서 권선간에 또는 권선과 코아간에 접촉하여 결국 변압기는 소손되게 된다. 변압기의 절연과피 메커니즘을 살펴보면 <그림5>와 같다.



## 1. 서 론

'10년 현재 KEPCO 배전기자재의 연간 구입비는 약 5,500억원으로 주로 변압기, 전선, 지지물, 금구류등의 구매하고 있으며, 그 내용은 <그림1>과 같다. 이중 변압기의 구매 비중은 약 32%를 차지하여 전체 배전기자재의 최대 구매비중을 보이고 있다. '10년 현재 KEPCO에서 관리하고 있는 배전용 변압기 설치대수는 약 199만대로 매년 평균 5만대씩(2.3%) 증가하고 있는 추세이다. 변압기의 증가와 더불어 변압기로 인한 일시고장전수도 다수 발생하고 있는데, '10년 전체 선로고장건수(일시+순간) 7,937건 중 변압기로 인한 선로고장은 747건으로 약 9%를 차지하고 있다. 또한 변압기 설치사유를 분석해 보면 연간 설치대수 14만대 중 변압기 노후 및 고장으로 교체하는 경우도 약 23,000대를 차지하고 있어, 변압기의 정확한 상태진단이 가능하다면 상당부분 선로고장을 줄일 수 있으며, 노후로 진단되어 교체되는 변압기의 수명연장에도 기여 할 수 있다.

오염된 절연유는 여과 또는 교체에 의해 성능을 회복할 수 있으나 한번 열화된 고체 절연물은 절연유를 교체해도 물리적 성능을 회복할 수 없기 때문에 외부 충격에 의해 변압기는 소손하게 된다. 따라서 유입변압기는 절연유 관리가 중요하고 절연유만 잘 관리한다면 변압기 수명은 연장될 수 있다.

## 2.2 KEPCO의 배전용변압기 절연유관리기준

KEPCO에서는 '09년이후 배전용 지상변압기 절연유에 대해서도 가스분석 기준을 마련하고 시행해 오고 있다. 분석기법은 ASTM D 3612(Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography)에 의거 가스분석을 시행하고 있으며 대상가스는 10종류(O<sub>2</sub>(산소), N<sub>2</sub>(질소), H<sub>2</sub>(수소), CH<sub>4</sub>(메탄), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(에틸렌), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(에탄), C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(아세틸렌), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>(프로판), CO(일산화탄소), CO<sub>2</sub>(이산화탄소)이다. 주요 가스별 이상발생 현상을 살펴보면 <표1>과 같다 분석방법은 <표2>기준에 의거 정기, 추적, 정밀분석을 시행하고 있으며

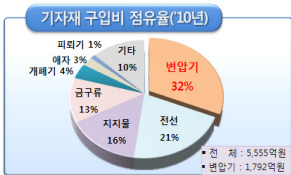
<표 1> 주요 가스별 이상발생 현상

구 분	이상종류	이상현상	이상발생
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	·유증 Arc분해	·Arc 방전	·권선의 층간단락
	·고체 절연물 Arc분해		
CH <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	·절연유의 열분해	·순환전류, 접촉불량	·체결부위 이완
	·고체 절연물 Arc분해	·전류에 의한 과열	·접점 및 절연불량
H <sub>2</sub>	·유증 Corona 분해	·Corona 방전	·권선의 층간단락
	·고체 절연물 Arc분해		
CO	·고체 절연물 열분해, 경년열화	·과 열	·절연지 소손
	·고체 절연물 열분해, 경년열화		
CO <sub>2</sub>	·고체 절연물 열분해, 경년열화	·과 열	·절연내압 불량
	·고체 절연물 열분해, 경년열화		

<표 2> 주요 가스별 이상발생 현상

구 분	대 상	시행시기
정기 분석	하자가간이 경과하여 현장에 설치 되어 운전중인 변압기	13년 경과 변압기, 이후 5년 간격
추적 분석	정기분석 결과 요주의 또는 이상으로 판정된 변압기	요주의 : 1회 / 1년 내 이상 : 1회 / 6개월 내
정밀 분석	·추적분석 결과 이상 판정 변압기 (전력연구원 시행)	이 상 : 1회 / 6개월 내

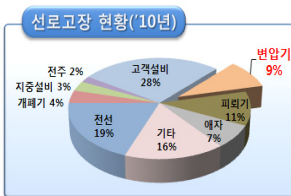
가스발생량에 대한 판정기준 및 조치방법은 <표3>, <표4>와 같다.



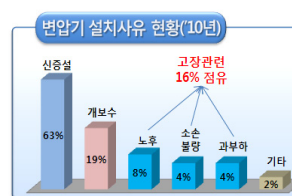
<그림1> 연간 기재구입비용



<그림2> 연도별 변압기 현황



<그림3> 연간 선로고장현황



<그림4> 변압기 설치사유 현황

## 2. 본 론

### 2.1 KEPCO의 변압기 열화 진단현황

#### 2.1 변압기 열화 와 수명

현재 KEPCO에서 운영하고 있는 배전용변압기는 모두 유입변압기로 절연유를 사용하고 있다. 절연유는 변압기의 발생열에 의한 호흡작용으로 인해 공기중의 수분, 산소, 도전성 또는 유전성 입자를 흡착하게 되고 오염된 절연유는 변압기의 발생열과 상승작용을 일으켜 변압기 절연재를 열화시키고 슬러지를 생성하여 냉각작용을 방해함으로써 절연재 열

**<표 3> 주요 가스별 이상발생 현상**

관정 항목	정상 (Normal)	요주의 (Caution)	이상 (Abnormal)	위험 (Danger)
H2	400 이하	401~800	800 초과	-
C2H2	20 이하	21~60	61~120	120 초과
C2H4	200 이하	201~500	500 초과	-
CH4	250 이하	251~750	750 초과	-
C2H6	350 이하	351~750	750 초과	-
C3H8	250 이하	251~750	750 초과	-
가연성가스 (TCG)	1,000 이하	1,001~2,500	2,501~4,000	4,000 초과

**<표 4> 가스분석결과 조치사항**

판정결과	정상	요주의	이상	위험
처리방법	계속 운전	추적분석시행	정밀분석 시행	즉시조치

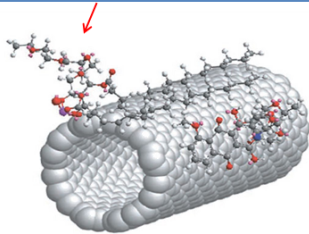
'10년 현재 지상변압기는 약33천대를 운영하고 있으며 이중 13년이 경과한 지상변압기에 대해서만 외부전문기관에 용역을 의뢰하여 가스분석을 통한 열화상태 진단을 시행하고 있으며 이중 정밀분석이 필요한 기기는 전력연구원에 추가분석을 의뢰하고 있다. 하지만 중장기적으로는 배전용 변압기 전체에 대한 절연유 상태분석이 필요한 상황이며 이를 위한 저가용 이상가스 검출장치 및 진단시스템 개발이 필요한 실정이다.

**2.3 센서를 활용한 진단기법 도입 연구**

**2.3.1 탄소나노튜브 센서**

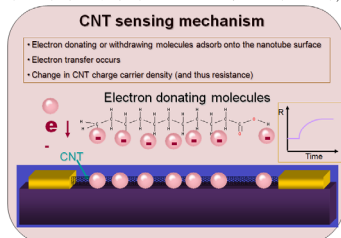
최근 감지대상물의 정보를 전기신호로 변환하는 장치인 센서의 기술 발전에 따라 변압기 열화 및 가스분석정보를 센서에 의해 취득하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 다양한 센서중에서 최근 식용유 및 자동차 엔진오일의 오염도 분석으로 주목받고 있는 탄소나노튜브 센서를 변압기 절연유 분석에 접목하는 방안이 착안하였다. 탄소나노튜브 오일센서(CNT)는 직경이 수십~수백nm의 가느다란 튜브 형태로 길이는 수~수십um를 가진 물질이다. 부피 대 표면적이 매우 큰 특징을 가지고 있을 뿐만 아니라 분자 단위로 흡착 및 탈착이 가능한 구조이다. 탄소나노튜브를 활용하면 전기화학적 측정을 통해 오일의 고유 분석가로 변화가 가능하며 그 값을 출력 함으로써 오일의 상태를 판단할 수 있다. 오일의 주성분인 탄화수소가 열과 빛에 의한 화학적인 변화과정을 통해 발생하는 과산화물이 탄소나노튜브에 물리적 흡착되어 발생하는 전기전도도의 변화를 분석가와 매칭하여 오일의 변화를 측정하게 된다.

**오일의 열화변화로 발생한 과산화물 흡착**



**<그림 5> 탄소나노튜브 구조**

나노튜브센서의 가스측정 메카니즘은 <그림6>과 같다,



**<그림 6> 가스측정 메카니즘**

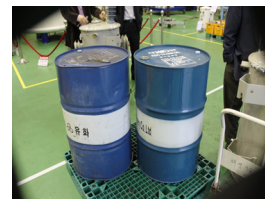
**2.3.2 탄소나노튜브 활용가능여부 검증**

본 연구에서 가장 중요한 부분은 앞서 언급한 탄소나노튜브 센서가 기존 가스분석에 활용하고 있는 가스 크로마토그래피 방식의 대안으로 활용가능한 것이기에 대한 현실적인 검증이 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 진단센서의 성능검증을 위해 시험용 주상변압기에 신유, 사용유

를 각각 넣고 160%의 부하로 가속열화시험을 시행하고 있다. 이 변압기에서 추출된 Data를 기존 가스분석방법과 진단센서에서 취득한 값으로 비교분석하여 센서의 활용가능여부를 검증하고자 한다. 또한 일선현장에서 13년이 경과한 변압기에서 시료 20여개를 추출하여 추가적으로 비교분석을 할 예정이다, 이러한 시험결과가 신뢰성이 있을 경우 센서를 활용한 유증가스 진단장비를 추가적으로 개발할 예정이다.



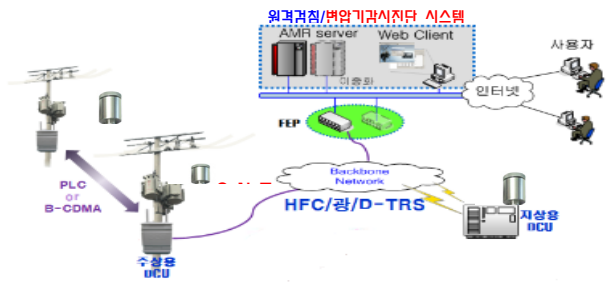
**<그림7> 센서 검증용 변압기 제작**



**<그림8> 검증용 절연유**

**2.4. 진단장비 개발방안**

현대 배전용변압기는 약200만대에 달하고 있으며 주상변압기의 경우 환선상태의 전주위에 부설되어 변압기 내부의 유증가스를 진단하기가 무척 어려운 여건이다. 따라서 본 연구에서는 주상변압기와 지상변압기를 나누어 진단장비를 개발할 예정이다. 지상변압기의 경우에는 절연유 주입 및 채취를 위한 밸브가 설치되어 있는 관계로 경제성 및 즉시 활용성을 위해 휴대용 진단장비를 개발하는 방안을 강구중이며, 주상변압기의 경우에는 휴대용과 변압기내에 진단센서를 장착한 상시 진단형 변압기를 개발하여 활용 할 예정이다. 또한 상시진단형 변압기의 경우에는 센서에서 취득한 data를 통신방식을 활용하여 편리하게 변압기의 열화상태를 감시할 수 있는 방식의 적용을 검토하고 있다.



**3. 결 론**

실제로 대형변압기 유증가스 분석을 위한 시도는 오래전부터 있어왔고 그간 많은 성과를 거두었다. 하지만 200만대에 이르는 배전용 변압기의 경우에는 경제성 확보의 어려움 때문에 그 실효성을 얻지 못하고 있다. 또한 주상변압기의 경우는 환선근접거리의 위험성 또한 큰 걸림돌이 되었다. 본 연구과제는 센서에 대한 정밀한 검증, 진단방법, 경제적 자료취득 방안 등 비록 풀어야 할 숙제가 있지만 최근 발달되는 센서 및 통신기술을 바탕으로 경제성을 확보하고 실용적인 진단장비를 개발하여 배전용변압기로 인한 고장 및 사고를 방지하고, 변압기의 적정교체 시기를 판단하여 변압기 수명연장에도 큰 성과를 거둘 수 있으리라 생각된다.

**[참 고 문 헌]**

[1]에스엔에스레볼루션, "대형변압기 절연유 감시시스템 개발", SNS revolution, p8~48, 2011