

# 전기 절연유 열화진단을 위한 3-단자식 전기용량 센서 개발 및 진단특성 평가

논 문

58P-4-20

## Development and Evaluation of 3-terminal Type Capacitive Sensor for the Diagnosis of Electrical Insulating Oil

김 주 한\* · 한 상 옥†  
(Ju-Han Kim · Sang-Ok Han)

**Abstract** - This paper describes the development of capacitive sensor for the diagnosis of liquid dielectrics, which is widely used as the electrical insulating oil of transformer, circuit breaker, cable and etc. To survey the dielectric properties of the virgin and aged electrical insulating oils, we utilized the highly precise measuring system, using the principle of cross capacitance. The measured properties were used to determine the design factors of the sensor. Then the factors were optimized with the help of computational analysis. To evaluate diagnosis by the sensor, we performed accelerated thermal aging test about electrical insulating oils. The condition of aged specimens were investigated by measurements of relative permittivity i.e. capacitance change by capacitive sensor. And to evaluate the hysteresis characteristics with the change of temperature, we constructed a testing system, which was composed with vacuum drying oven, oil chamber and measuring instruments, such as LCR meter, MUX and so forth. Through the results of this investigation, we confirmed the superior characteristics of the newly developed sensor.

**Key Words** : Insulating Oil, Aging, Relative Permittivity, 3-Terminal Electrodes, Capacitive Sensor

### 1. 서 론

전 세계적으로 산업경제의 고도성장에 따라 전력수요는 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 이로 인해 전력계통을 구성하는 각종 전력설비들은 초고압, 대용량화되고 있는 실정이다. 하지만 전력계통이 확장되면서 대용량화된 전력기기가 부담하는 공급범위가 넓어짐에 따라 변압기 고장사고 시 정전구역이 광범위해지며, 이로 인한 경제적 손실을 비롯한 부수적 파급효과 역시 그 규모가 커질 수밖에 없는 것이 현실이다. 따라서 전력계통을 구성하고 있는 각종 전력기기에 대한 안정성 확보 및 신뢰도 향상이 절실히 요구되고 있으며, 전력설비의 기능 및 성능을 충분히 확보하고 고장사고를 미연에 방지하기 위한 예방진단과 같은 유지보수기법의 필요성이 점차 부각되고 있다[1].

한편 배전용 변압기는 전력계통의 말단에 설치되어 안정적인 전력공급을 담당하는 중요한 설비임에도 불구하고, 전력계통을 이루고 있는 전력설비의 고장 중 상당부분이 변압기 고장사고로부터 기인한다. 변압기의 고장요인을 살펴보면 전체 고장 건수의 약 50% 이상이 절연물 열화로 인한 고장이며[2], 이는 열적 스트레스로 인해 절연재료의 열화가

진전됨에 따라 전기적, 기계적 성능이 저하되어 결국 절연과피로 이어지므로 열화된 변압기를 적기에 교체하거나 보수하기 위해서는 변압기의 절연열화 상태를 조기에 진단할 수 있는 예방진단 시스템 구축이 요구된다.

현재 국내에서 사용되고 있는 변압기의 대부분은 유입식 변압기로, 유입식 기기의 주 절연체는 전기 절연유와 층간 절연지로 구성되어 있다. 특히 전기 절연유는 변압기의 전기적 절연과 냉각에 중요한 역할을 담당하고 있으며, 각종 전기설비에서 중요한 절연재료로서 널리 활용되어왔다. 그러나 고체나 기체 절연재료에 비해 그 전기전도나 절연과피기구가 복잡하여 현재로서도 이에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 변압기 절연유의 절연열화기구를 살펴보면 변압기의 운전환경에 따라 부하율을 비롯한 각종 사용 환경에 노출되며, 특히 온도, 수분, 산화, 부분방전 및 슬러지, 유중 용존가스, 기타 불순물로 인한 오염 등에 의하여 절연 및 냉각성능이 현저하게 저하하게 된다. 이러한 절연유의 열화 상태는 절연과피전압, 전산가, 체적저항, 산화안정도, 점도, 인화점, 비색도, 유전정접, 유중가스 등에 영향을 미치므로 이러한 전기적, 화학적 특성들을 종합적으로 평가함으로써 절연유의 열화 여부를 판별하게 된다[3]. 그러나 위와 같은 진단 기법들은 현재 정전진단을 기반으로 한 채취시험으로 행하는 것이 대부분이며, 고가의 시험장비와 전문 인력의 필요성, 시료 채취 시 필연적으로 발생하는 오차와 더불어 분석에 장시간이 소요되는 등의 한계점을 가지고 있다. 특히, 전술한 기존의 진단 시험 기법들은 사후정비(Breakdown Maintenance), 시간기준정비(Time Based Maintenance) 등과 같은 종래의 유지보수기법을 고수하고 있으므로 변압기의 상태를 상시 진단하여 고장사고가 발생

\* 정 회 원 : 충남대학교 전기공학과 박사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail: sohan@cnu.ac.kr

접수일자 : 2009년 8월 22일

최종완료 : 2009년 9월 3일

<본 논문은 본 학회 2009년도 하계학술대회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회에서 심사 후 본 논문지에 게재 되었음>

하기 이전에 정비할 수 있는 진단기법을 활용한다면 설비의 사용 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 불필요한 교체비용과 정전으로 인한 경제적 손실 등을 줄일 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 근래 그 중요성이 부각되고 있는 예방정비(Preventive Maintenance), 예측정비(Predictive Maintenance), 상태기준정비(Condition Based Maintenance) 등의 개념을 전력설비 유지보수시스템에 도입함으로써 운전 중인 유입식 변압기 절연유의 열화 상태에 따른 유전특성의 변화를 상시적으로 진단 및 감지하여 사고를 미연에 사고를 방지할 수 있는 진단센서 및 절연유 열화와 유전특성간의 상관관계를 활용한 예방진단기법을 개발하고자 하였으며, 이를 위해 절연유의 열화 상태에 따른 유전특성 변화와 절연 파괴전압, 수분함유율과 같은 기존 진단기준 간의 상관관계를 평가하였다.

### 2. 3-단자식 전기용량 측정 이론

유전체가 채워진 두 전극간의 전압을 인가하였을 때, 전기용량은 이론적으로 전극의 기하학적 구조 즉, 전극간의 대향면적, 전극간 거리와 같은 형상 및 배치상태와 더불어 유전체의 유전율에 의해 결정되므로, 전극의 면적, 형상, 배치 등이 일정할 경우 전극간의 전기용량 변화는 전적으로 물질의 유전을 변화에 의해 결정된다고 할 수 있다. 하지만 현실적으로 그림 1(a)와 같이 전기용량 측정을 위한 전극의 모서리 효과로 인해 전극단부에서 누설 전기용량이 발생함에 따라 기하학적 구조에 맞는 이론적인 전기용량값과 일치하지 않는 특성을 보이게 되며, 전극 배면 간에도 전기장이 형성됨에 따라 부유 전기용량이 발생하여 전극 외부 공간에 존재하는 물질에 의해 측정값이 변하게 됨으로써 측정의 재현성을 확보하기가 어렵게 된다. 반면 가드 전극을 가지는 3-단자 전극구조에서는 측정 전극간의 누설 전기용량을 배제할 수 있으므로 상기와 같은 문제점을 보완할 수 있어 국제시험규격에서도 3-단자식 전극구조를 통한 시험을 권장하고 있는 실정이다[4,5].

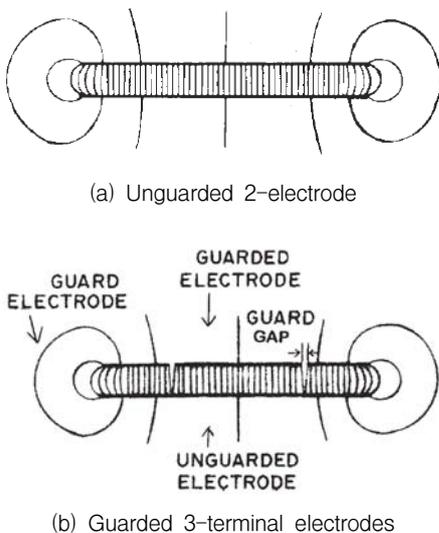


그림 1 평행 평판 전극간의 전기력선  
Fig. 1 Flux lines between parallel plate electrodes

따라서 전기 절연유의 열화 상태를 평가하기 위한 전기용량 센서의 안정하고 재현성 있는 측정을 위해, 그림 1(b), 2와 같은 가드 전극을 가지는 3-단자식 전극구조의 전기용량 센서를 최적 형태로 선정하였다. 그림 2와 같은 가드 전극을 지닌 3-단자식 전극구조에서 전극의 모서리에서 나타나는 전기용량에 따른 edge correction을 첨가하게 되면,  $s \ll d_0 \ll R_i \ll R_0$  일 때 이론적으로 전기용량  $C_0$ 는 식 (1)과 같이 표현된다[6].

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{d_0} (R_1 + \frac{s}{2})^2 = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_i^2}{d} \quad (1)$$

단,

$s$ : the gap size between guarded and guard electrode

$R_0$ : the radius of unguarded electrode

$R_1$ : the radius of guarded electrode

$R_i$ : the half of electrical length,  $R_1 + s/2$

그러나 실제의 경우 가드전극과 측정전극의 면적이 무한할 수 없으므로 식(1)에서 가정한 이상적인 조건에서의 계산치와 실측치 간에는 오차가 발생하게 되며, 하부의 unguarded 전극의 반경  $R_0$ 와 상부의 guarded 전극  $R_1$ 간의 차이가 전극간거리  $d_0$ 의 5배 이상인 경우에는 식(1)에 의해 계산된 전기용량값과 실제 유도되는 전기용량 값은 매우 높은 정확도로 일치하는 것으로 알려져 있다[7].

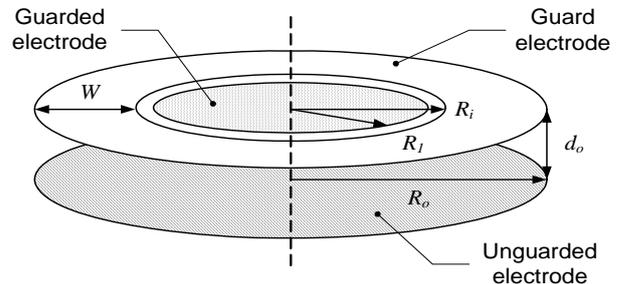


그림 2 원형 3단자 전극의 구조도  
Fig. 2 Construction of circular 3-terminal electrodes

### 3. 실험방법

#### 3.1 3-단자식 전기용량 센서의 최적 설계

저자의 선행연구를 통해 실사용 변압기용 전기 절연유의 비유전율 측정결과를 바탕으로 전산해석기법을 활용하여 전극의 형상 및 배치, 측정용 전극의 대향면적 및 극간 거리가 센서의 전기용량에 미치는 영향을 조사, 분석하였으며[8], 그 결과를 통해 전술한 바와 같이 그림 3, 4와 같은 가드전극을 지닌 3-단자식 전극구조의 센서를 최적 형태로 선정하여 설계 및 제작하였다[9].

상기 3-단자식 전극구조에서 가드전극의 폭이 측정 전극간 거리보다 약 5배 이상 크게 설계되어야 한다는 단점을 지니고 있으므로, 전기용량 센서를 변압기 내부에 설치하는 경우를 고려하여 부피를 최소화하면서도 보다 큰 전기용량을 확보할 수 있도록 그림 3과 같이 두 쌍의 측정전극을 병렬구

조로 배열하였으며, 전극 단부의 주변효과를 최소화하기 위해 Guarded 전극(Low, -) 주변으로 가드 전극을, 변압기 내부의 전자계 영향과 부유전기용량을 최대한 배제하기 위해 Unguarded 전극(High, +)의 배면에 차폐용 쉴드 전극을 배치하였으며, 이를 측정 전극부를 보호하기 위한 외부 하우징과 본딩함으로써 이중 정전차폐 구조를 가지도록 구성하였다. 또한 전극부의 외부 하우징은 절연유의 원활한 순환이 가능한 구조로 설계 및 제작하였다. 그림 4는 상기 연구결과를 바탕으로 제작된 전기용량 센서의 외형을 나타내고 있다.

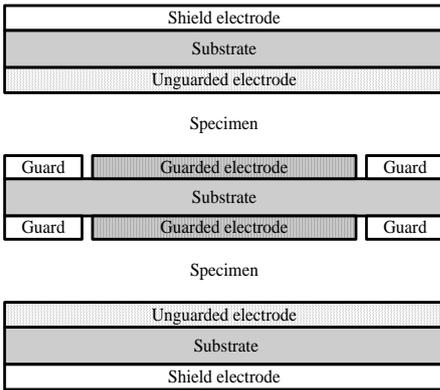


그림 3 병렬 다층식 3-단자 전극의 단면도  
 Fig. 3 Cross-sectional view of multi-parallel type 3-terminal electrodes

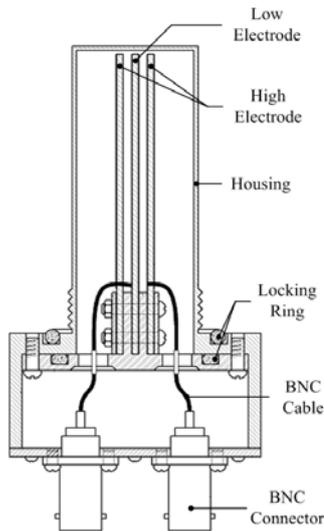


그림 4 3-단자식 전기용량 센서의 단면도  
 Fig. 4 Cross-sectional view of 3-terminal capacitive sensor

**3.2 실험장치 구성**

절연유 열화에 따른 센서의 전기용량 변화와 온도 이력 특성을 평가하기 위해 기밀구조의 시험용 셀을 제작하였다. 시험셀의 구조는 상부덮개에 전기용량 센서와 온도센서(Pt-100Ω)를 체결할 수 있는 구조로 하였으며, 셀 내부에 절연유를 주입 후 실험을 진행하였다. 절연유에 대한 전기용량 센서의 온도이력특성 시험을 위해 진공건조오븐을 이용하여 온도를 제어하여 내부 절연유가 인가한 온도로 수렴

하였을 때 센서의 전기용량을 LCR meter(4284A, Agilent)로 측정하고, 시험셀 내부에 위치한 온도센서는 데이터 수집장치(34970A, Agilent)에 연결하여 온도를 확인하였다. 또한 전기용량 측정 시 정밀도 향상 및 측정 불확도를 최소화하기 위해 일체의 배·결선에는 BNC 케이블과 BNC 커넥터를 적용하였으며, 측정 케이블의 선저항 및 부유전기용량을 최소화하기 위해 4-단자 결선방식과 LCR meter의 케이블 길이 보정을 하였다.

한편 절연유 열화에 따른 전기용량 변화 및 온도이력특성 시험 조건으로 실제 현장에서 운전되는 변압기 내부의 절연유 온도를 감안하여 20~100 °C의 온도 구간에 대해 평가하였다. 또한, 설계된 센서의 전기용량이 절연유 중에서 수십 pF 범위를 가지므로 용량성 임피던스가 매우 커 측정에 사용된 LCR meter의 측정신호전압인 1 V로는 출력신호전류가 대단히 작아지므로 해상도가 저하될 우려가 있다. 따라서 해당 전기용량 측정 범위에서 비교적 안정된 10 kHz의 주파수에서 센서의 전기용량을 측정하였으며, 본 연구를 통해 제작된 전기용량 센서와 LCR meter에서 측정된 값은 정밀도를 비교하기 위해 Cross-capacitance를 이용한 액체 유전체 비유전율 측정용 표준급 시험전극[10]과 전기용량 측정 브릿지를 이용하였다.

**3.3 시험 시료**

본 연구에서는 변압기용 절연유의 주류를 이루고 있는 광유(1종 2호)와 최근 국외에서 환경문제로 인해 점진적으로 사용을 확대하고 있는 식물성 절연유(BioTrans 5000, ERMCO)에 대해 전기용량 센서의 진단특성을 평가하였으며, 절연유 열화에 따른 유전율 변화와 기존 진단시험 기준과의 상관관계를 분석하기 위해 비교시험방법으로 절연유의 절연과피전압과 수분함유량을 측정하였다. 시료의 절연과피전압은 KS C IEC 60156에 준하여 액체 절연과피 시험기(OTS 60AF/2, AVO Megger Foster)를 이용하였으며, 수분함유량은 Karl Fischer 적정기(CA-100 Moisturemeter, Mitsubishi Chemical Cop.)를 통해 측정하였다.

한편 전기 절연유의 열 열화에 따른 유전율 변화를 평가하기 위해 50 KVA 급 변압기에 사용되는 재료와 유사한 비율로 절연지와 절연유 및 규소강판, 권선코일 등을 별도의 가속열화 시험셀에 함침하여 온도 130°C와 140°C에서 각각 960시간 동안 절연유를 가속열화시킨 후 전기용량 측정에 활용하였다. ANSI/IEEE C57.91-1881에 따르면 55°C 절연시스템에서 권선 최고점 온도가 130°C일 때 변압기 평균예측 수명의 약 1/6 정도이며, 140°C의 경우 대략 1/3 정도인 것으로 제시되고 있다[11]. 또한 수분함유량에 따른 비유전율 변화를 확인하기 위해 광유 신문에 수분을 강제로 주입한 시료를 사용하였으며, 경년열화에 따른 비유전율 변화를 확인하기 위해 현장에서 장기간에 걸쳐 사용 후 수거된 배전용 변압기에서 채취한 시료를 활용하였다.

**4. 결과 및 고찰**

**4.1 전기 절연유 비유전율의 경년변화**

전술한 바와 같이 전기 절연유와 같은 액체 유전체는 사용 중 다양한 전기적, 화학적, 환경적 스트레스로 인해 열화

가 진전됨에 따라 유전체의 고유한 특성인 유전율이 변화하게 된다. 특히 교류전압 하에서 유전체에서 발생하는 전력 손실, 즉 유전손실(Dielectric Loss)은 식 (2)와 같이 절연체의 유전정접( $\tan\delta$ )과 유전율, 주파수에 비례하며, 이는 유전체 분극으로 인한 단위 체적당 전력 소모로서 유전체를 구성하는 분자들 간의 충돌로 인해 열에너지로 소실되는 단위 시간당 에너지 손실을 의미한다. 특히 유전율은 전계 하에서 모든 종류의 유전분극 기구에 의하여 거시적으로 나타나는 특성이므로, 절연재료가 양호할 경우 유전율 및 유전손실이 매우 적으나 열화 및 사용환경에 의해 수분, 슬러지와 같은 불순물이 형성되거나 유전체 재료의 열적 스트레스로 인한 산화 등으로 인해 증가하는 것으로 알려져 있다.

$$W_{loss} = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \tan\delta \quad (2)$$

따라서 본 논문에서는 경년열화에 따른 전기 절연유의 비유전율 변화를 분석하기 위하여 크로스 커패시턴스 원리를 이용한 표준급 액체 전기용량 측정시스템을 활용하여 장기간에 걸쳐 사용된 배전용 변압기에서 채취한 전기 절연유(광유, 1종 2호)의 비유전율을 측정하였다. 측정조건은 상온( $23 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ), 10 kHz 주파수에서 측정을 진행하였다. 그림 5는 사용기간에 따른 전기 절연유 비유전율의 경년변화 추이를 제시하고 있으며, 비유전율 측정 결과, 부하조건을 비롯하여 각각의 시료의 사용환경 및 운전조건이 다름에도 불구하고 사용기간이 길어질수록 절연유의 비유전율이 증가하는 추세를 보이고 있음을 알 수 있었다. 사용기간이 긴 시료 중 일부는 비유전율이 낮은 값을 나타내었는데 육안관측 상 혼탁도가 양호한 것으로 보아 변압기의 운전조건이 비교적 양호하였기 때문이라 추정된다.

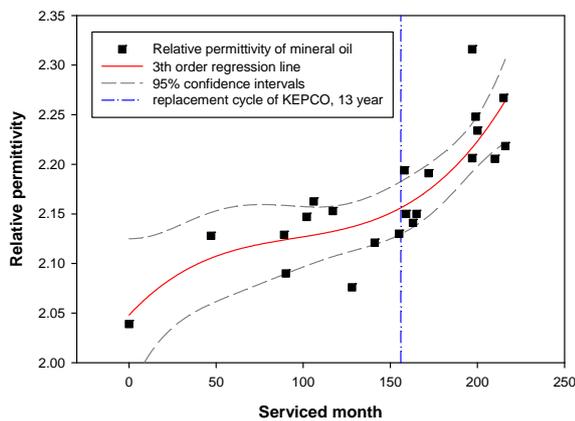


그림 5 배전용 변압기 전기 절연유(1종 광유)의 비유전율 경년 변화  
 Fig. 5 Relative permittivity trend of electrical insulating oil (Mineral oil #1) in distribution transformer

또한 채취한 시료들을 육안으로 확인한 결과, 대체적으로 절연유가 탄화되어 혼탁도가 짙어짐에 따라 시료의 비유전율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 채취 시료 중 약 200 개월에 걸쳐 사용된 광유의 비유전율이 가장 높은

수치를 보였는데 측정결과, 신품 대비 약 13 % 이상 증가하였으며, 이는 적정 수준의 전기용량을 갖는 센서와 측정회로를 구비하면 충분히 감지가 가능한 범위로 판단된다. 이러한 전기 절연유의 비유전율 경년변화특성은 산화반응 및 이로 인한 산화물의 생성 등과 같은 일련의 경년열화 현상 및 고온운전으로 인한 열적열화 현상과 밀접한 관련성을 지니고 있는 것으로 추정된다.

#### 4.2 3-전극식 전기용량 센서의 측정 정밀도 평가

그림 6과 표 1은 상기 크로스 커패시턴스 원리를 이용한 표준급 비유전율 측정 시스템으로 배전용 변압기 전기 절연유의 비유전율 측정결과와 본 논문을 통해 설계·제작된 3-전극식 전기용량 센서의 측정값을 비교하여 측정 정밀도를 평가한 결과를 나타내고 있다. 3-전극식 전기용량 센서의 측정 정밀도는 표준급 비유전율 측정시스템의 측정결과와의 상대오차로 표현하였으며 측정 결과 약 0.08~0.34 % 범위 내에서 부합하고 있어 제작된 센서의 측정 정확도 및 안정도가 매우 우수한 것으로 판단할 수 있었다.

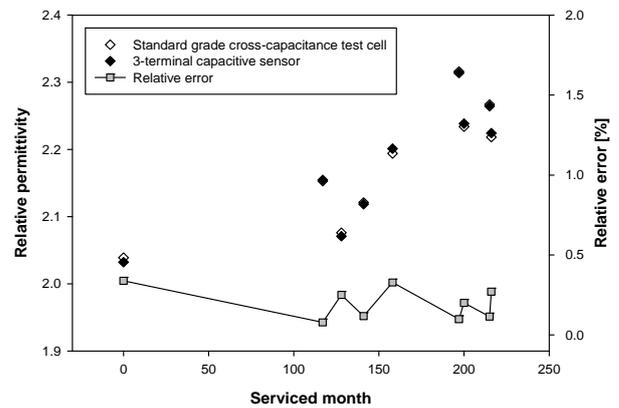


그림 6 3-전극식 전기용량 센서의 측정 정밀도 평가  
 Fig. 6 Evaluation of accuracy about 3-terminal capacitive sensor

표 1 3-전극식 전기용량 센서 및 표준급 전기용량 측정 시스템의 측정결과 비교

Table 1 Comparison data of relative permittivity and relative error of 3-terminal capacitive sensor versus cross-capacitance measurement system

Specimens	Serviced period [month]	Cross-capacitance test cell [ $\epsilon_r$ ] (A)	3-terminal capacitive sensor [ $\epsilon_r$ ] (B)	Relative error [%] ((A-B)/A×100)
Mineral oil	Virgin	2.039	2.032	0.34
	117	2.153	2.155	0.08
	128	2.076	2.071	0.25
	141	2.121	2.119	0.12
	158	2.194	2.201	0.33
	197	2.316	2.314	0.10
	200	2.234	2.239	0.20
	215	2.267	2.264	0.11
	216	2.218	2.224	0.27

한편 크로스 커패시턴스 전극구조는 기존의 3-단자식 전극 구조에 비해 전극면과 시료 계면에 존재하는 공극의 영향을 최소화하여 측정 정확도와 안정도가 매우 우수한 방식이나 동일한 전극크기에 비해 매우 작은 전기용량을 유도하므로 LCR meter와 같은 범용 전기용량 측정기의 측정 가능범위를 벗어나게 된다[10]. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해서는 1~5 kV의 고전압 전원을 사용하는 브릿지 회로를 사용해야 하므로 측정회로가 복잡해지며, 열화진단 센서의 피측정물이 액체상의 전기 절연유임을 감안할 때 전극-시료간의 공극으로 인한 오차요인이 비교적 적은 환경이므로 3-단자식 전극구조를 가지는 전기용량 센서를 적용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

**4.3 3-전극식 전기용량 센서의 열화진단 및 온도이력 특성**

다양한 조건으로 열화된 절연유의 열화패턴과 절연유의 종류에 대한 3-전극식 전기용량 센서의 열화진단 특성을 평가하기 위해 표 2에서 나타내고 있는 절연유시료를 대상으로 센서의 전기용량을 측정하였다. 피측정된 절연유 시료는 광유(제1종 2호)와 식물유(Biotrans 5000, ERNCO)로 각각 신품과 실사용된 변압기에서 채취한 경년열화시료와 130, 140 °C에서 960 시간동안 열화시킨 가속열화시료, 신품 절연유에 수분을 주입한 시료이다. 또한 변압기의 유온이 운전 조건 및 환경조건에 따라 변하므로 열화진단 특성 평가와 더불어 유전율 및 전기용량 센서의 이력특성을 평가하기 위해 각각의 시료는 전기용량 측정시험 셀에 주입한 후 진공 건조오븐을 활용하여 가열온도를 변화시키면서 온도에 따른 이력특성 및 전기용량 변화를 LCR meter를 통해 측정하였다. 측정조건은 각각의 시료에 대해 10 kHz 주파수에서 20~100 °C의 온도구간으로 설정하여 시험평가를 진행하였다.

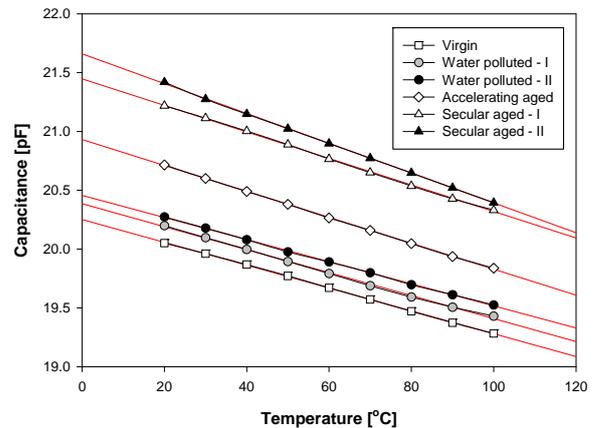
**표 2** 시험시료의 열화조건 및 물성  
**Table 2** Aging condition and property of specimens

Insulating oil type/ Aging condition	Moisture contents [ppm]	Breakdown voltage [kV/2.5mm]	
virgin	11.2	52.0	
Water Polluted-I	21.9	42.7	
Mineral oil	Water Polluted-II	213.8	10.0
	Secular aged-I	31.5	46.8
	Secular aged-II	47.7	48.7
	Accelerating aged(130°C,960h)	21.0	38.4
Vegetable oil	virgin	306.3	50.4
	Accelerating aged-I(130°C,960h)	334.4	44.1
	Accelerating aged-II(140°C,960h)	176.9	45.0

그림 7과 그림 8은 제작된 3-전극식 전기용량 센서를 통해 측정된 열화패턴 및 절연유 종류별 전기용량 변화와 각각의 온도 이력특성을 측정된 결과를 나타내고 있다.

먼저 광유의 경우, 절연유 열화 및 수분 오염에 따라 전기용량이 증가하였으며, 열화정도와 조건, 수분함유량에 따라 전기용량 변화가 확연히 구분되었다. 각 시료에 대한 전기용량 변화를 살펴보면 열적 스트레스만을 가한 가속열화된 시료와 광유 신품에 수분함유량을 달리하여 주입한 시료에 비해 현장에서 장시간 사용되어 복합적인 열화요인에 노출되었던 시료

의 전기용량이 가장 큰 것으로 측정되었다. 또한 수분을 강제 주입한 시료와 가속열화된 시료를 비교해보면 열적 스트레스로 인한 절연유의 열분해 현상이 전기용량 변화에 보다 지배적인 것으로 나타났다. 반면 광유의 절연과피전압은 일반적으로 잘 알려진 바와 같이 수분함유량이 증가함에 따라 저하되는 특성을 보였으나 절연유의 전기용량 변화와는 뚜렷한 상관관계가 없는 것으로 판단되며, 무극성 분자로 구성된 광유 중에 유전율이 큰 극성분자인 수분이 증가하여 배향분극 및 계면분극이 활성화되므로 전기용량 변화와의 상관성을 가지는 것으로 판단된다. 또한 각 시료에 대한 온도이력특성은 모든 시료에서 온도상승에 따른 전기용량 변화가 매우 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 절연유와 같은 액체 유전체의 유전율의 온도 의존성은 온도 상승에 의한 체적 팽창과 이로 인한 밀도 저하로 인해 단위 체적당 유도된 전하량이 감소하는 특성과, 반대로 온도 상승에 의해 점도 저하가 저하됨에 따라 분극 저항이 감소하여 보다 쉽게 전하를 유도하게 되는 특성을 모두 반영한 결과로 볼 수 있다. 따라서 동일한 측정 주파수 환경에서 온도 상승에 따른 광유의 전기용량의 선형적인 감소 현상은 체적 팽창의 선형적 증가 현상이 온도에 따른 유전특성 변화에 보다 지배적임을 확인할 수 있었으며, 전기용량 센서를 활용한 열화진단장치 개발 시 온도보상 알고리즘 구현에 있어 유리한 요소로 작용할 것으로 판단된다.



**그림 7** 열화조건 및 온도에 따른 광유에 대한 센서의 전기용량 변화

**Fig. 7** Capacitance change of sensor about temperature and aging conditions in mineral oils

한편 식물유에 대한 측정결과를 살펴보면 식물유는 극성이 있는 트리글리세라이드(triglycerides) 화합물로 구성되어 셀룰로오스 절연지의 유전율과 유사한 값을 가지므로, 광유에 비해 전기용량이 큰 것으로 나타났으며, 가속열화조건에 있어서도 가열온도가 보다 가혹할수록 전기용량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 식물유의 온도에 대한 전기용량 변화는 광유에 비해 기본적으로 체적 열팽창이 심하므로 온도가 증가함에 따라 유전율의 감소율이 확연히 큰 것으로 나타났으며, 열화 식물유의 경우 열화온도가 증가하여 수분함유량이 감소하였음에도 불구하고 열 스트레스가 가혹한 시료의 전기용량이 보다 큰 것을 확인할 수 있었다.

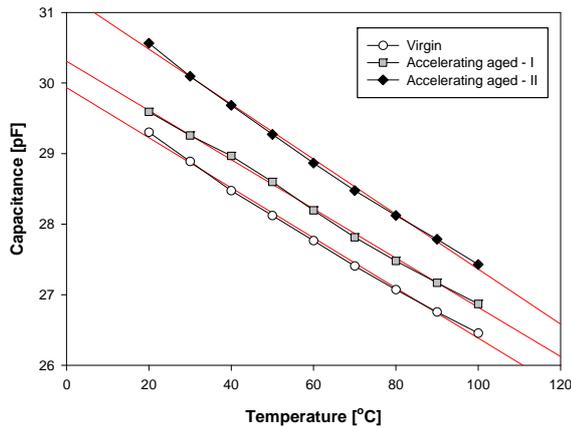


그림 8 열화조건 및 온도에 따른 식물유에 대한 전기용량 센서의 측정결과

Fig. 8 Capacitance change of sensor about temperature and aging conditions in vegetable oils

### 5. 결 론

본 논문에서는 변압기, 차단기, 콘덴서, 케이블 등과 같은 다양한 유입식 전력기기의 절연재료로서 널리 사용되고 있는 전기 절연유의 열화 진단을 위한 3-전극식 전기용량 센서를 설계 및 제작하였으며, 제작된 센서의 정밀도와 절연유의 열화감지 특성 및 온도이력특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 전기 절연유의 전기용량 측정을 위한 진단센서의 측정 정밀도를 확보하기 위해 모서리 효과를 최소화할 수 있는 3-단자식 전극을 적용하였으며, 진단센서의 전기용량 확보함과 동시에 부피를 최소화하기 위해 2쌍의 3-단자 전극을 병렬로 배치하고, 부유 전기용량과 외부 노이즈에 의한 측정 불확도를 배제하기 위해 전극부의 배면과 전극부 보호를 위한 하우징을 차폐 설드로 구성하여 이중 정전차폐 구조를 가지도록 하였다.
2. 변압기 절연유의 경년열화에 따른 비유전율의 경년변화 특성을 평가하기 위해 크로스 커패시턴스 원리를 이용한 표준급 액체 유전체 측정 시스템을 활용하여 장기간에 걸쳐 사용된 배전용 변압기에서 채취한 전기 절연유(광유, 1종 2호)의 비유전율을 측정하였다. 측정 결과에 따르면 부하조건을 비롯하여 각각의 시료의 사용환경 및 운전조건이 다름에도 불구하고 사용기간이 길어질수록 절연유의 비유전율이 증가하는 추세를 보이고 있음을 알 수 있었으며 경년사용품의 비유전율 변화는 신품 대비 최대 13 % 증가하는 것으로 나타나 적정 수준의 전기용량을 갖는 센서와 측정회로를 구비하면 충분히 감지가 가능한 범위로 판단된다.
3. 상기와 같은 연구결과를 바탕으로 제작된 3-단자식 전기용량 센서의 측정 정밀도를 평가하기 위해 크로스 커패시턴스 원리를 이용한 표준급 액체 유전체 측정 시스템과 비교평가 시험을 수행하였으며, 측정 결과 약 0.08 ~ 0.34 %의 상대오차 범위 내에서 부합하고 있어 제작된 센서의 측정 정확도 및 안정도가 매우 우수한 것으로 판단된다.

4. 3-전극식 전기용량 센서의 열화진단 특성과 온도이력 특성을 평가하기 위해 다양한 조건으로 열화된 절연유 시료에 대해 각각 온도를 변화시켜 시험을 진행하였다. 광유의 열화조건에 따른 전기용량 변화는 실사용품이 가장 극심하였으며, 단일 열화요인에서 수분오염에 비해 열 스트레스로 인한 절연유의 열분해 현상이 전기용량 변화에 보다 지배적인 것으로 나타났다. 또한 온도상승에 따른 광유의 전기용량은 매우 선형적인 특성을 보임을 확인 할 수 있었다. 반면 식물유는 광유에 비해 전기용량이 크며 동시에 가속열화 시 가열온도가 가혹할수록 전기용량이 증가하였으며, 온도 상승에 따른 전기용량의 감소율도 보다 급격한 것을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2008년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의해 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] 김정부 외, “변전설비 진단기술 개발 연구”, 한국전력공사 전력연구원, pp. 24-30, 1998. 1
- [2] 송일근 외, “지중배전용 변압기 신뢰도 향상에 관한 연구”, 한국전력공사 전력연구원, pp. 1-4, 2006. 3
- [3] 강성준 외, “전력용 변압기의 점검기준에 관한 연구”, 한국전기안전공사 전기안전기술연구원, pp. 28-42, 2000. 12
- [4] ASTM D 150, “Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation”, ASTM International, pp. 2-6, 2004
- [5] ASTM D 924, “Standard Test Methods for Dissipation Factor(or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids”, ASTM International, pp. 5-7, 2008. 11
- [6] W. C. Heerens, “Application of Capacitance Techniques in Sensor Design”, J. Phys. E:Sci. Instrum, Vol. 19. pp. 897-905, 1986
- [7] A. H. Scott and H. L. Curtis, “Edge Correction in the Determination of Dielectric Constant”, J. Research of National Bureau of Standards, Vol. 22, pp. 747-775, 1939
- [8] 김주한, 한상욱, 최남호, 강진흥, 김한준, “전산해석을 통한 액체 유전체용 정전용량형 센서설계”, 2003년도 대한전기학회 고전압 및 방전기술연구회 춘계학술대회, pp. 96-98, 2003. 5

- [9] 김주한, 한상옥, “전기용량형 센서를 이용한 변압기 절연유 열화진단용 예방진단기법 개발”, 대한전기학회 하계학술대회, pp. 2061-2062, 2009. 7
- [10] 이래덕, 김한준. P. Semenov, “크로스 커패시턴스 원리를 이용한 액체의 유전상수 정밀측정”, 새물리 Vol. 40, No. 2, pp. 97-102, 2000. 2
- [11] ANSI/IEEE Standard C57.91-1981, “IEEE guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65 degrees C or 55 degrees C average winding rise”, American National Standards Institute, pp. 11-13, 1981. 7



**한 상 옥 (韓 相 玉)**

1946년 5월 12일생. 1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5655

Fax : 042-821-8895

E-mail : sohan@cnu.ac.kr

---

**저 자 소 개**



**김 주 한 (金 周 漢)**

1976년 5월 15일생. 2003년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 충남대학교 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-821-7604

Fax : 042-821-8895

E-mail : rykiel76@cnu.ac.kr