

# Tan Delta 측정을 이용한 유침 절연지의 열화특성 분석

## Analysis of Degradation Characteristics for Oil-Paper Insulation using Tan Delta Measurement

김 정 태\* · 김 우 빈\*  
(Jeong-Tae Kim · Woo-Bin Kim)

**Abstract** - In this study, in order to understand the degradation characteristics of oil-paper insulation for power transformers and OF cables, tan delta was measured using cable model specimens with long-term accelerated thermal and electrical aging. In addition, to find out the degradation level due to the accelerated aging, tensile strengths of aged papers were measured. As a result, tan  $\delta$  showed the characteristics of slight decrease at the first stage and then increase with the aging time, which could be analyzed due to the evaporation of remaining moisture and the change of aging rate with time. Also, the trend of tensile strengths with aging temperature and time was appeared to be exponentially decreased and by use of these data equivalent calculated lifetimes and accelerated aging factors were derived for each aging temperatures. After then, tan  $\delta$  was analyzed with the equivalent operating years. For all different aging temperatures, the aged data were very well fit to the equivalent operating years and it is shown that tan  $\delta$  was increased with the decrease of tensile strength.

**Key Words** : Oil-paper insulation, Thermal and electrical degradation, Tensile strength, Lifetime estimation, Tan delta

### 1. 서 론

유침절연지를 사용하는 전력용 변압기 및 OF 케이블에 대한 열화특성은 수명예측과 잔존수명 파악을 위해 매우 중요하다. 유침절연을 구성하는 절연지와 절연유 중 주로 절연지가 절연을 담당하게 되며, 이중 절연유가 열화되는 경우에는 절연유의 필터링 또는 교체를 통해 비교적 간단히 유지보수를 수행할 수 있으나 절연지가 열화되는 경우에는 매우 심각한 유지보수를 수행하거나 아예 전력기기를 교체하여야 한다. 일반적으로 유침절연에 대한 절연진단은 주로 유증가스분석(DGA : Dissolved Gas Analysis)을 수행한다. 그러나, 다양한 형태의 진단방법 적용 및 전반적인 설비특성 파악과 절연지 자체의 열화판단을 위해 tan delta 측정이 꾸준히 제기되고 있다. 특히 OF 케이블의 경우에는 절연유 채취 부위가 접촉함으로 한정되고 케이블 내에 절연유가 잘 순환되지 않기 때문에 절연유에 대한 DGA를 수행하여도 접촉함 부분의 문제만을 접근할 따름이므로 tan  $\delta$  측정에 장점이 있을 수 있다.

유침절연이 열화될수록 tan  $\delta$ 가 커진다는 것은 보고는 일반적이지만, 주로 유침절연지에 대해 열적 열화를 수행한 뒤 tan  $\delta$ 를 측정하는 것이 대부분이다[1]. 또한 현장 수거 OF 케이블 및 열

적 열화 시편에 대한 tan  $\delta$  측정을 통해 현장 설비의 수명예측 방안을 제시하기도 하였다[2]. 그러나, 대부분은 연구는 유침절연지의 열적 열화만에 따른 tan  $\delta$  측정의 변화를 제시하는 수준이며, 열적 전기적 복합 열화가 인가된 경우에 대한 분석 및 절연지의 수명을 평가하는 기계적 수명분석과 함께 tan  $\delta$  특성을 분석하는 연구는 매우 미흡한 실정이다. 현장 설비에 대한 열화상태 판단 및 수명예측을 위해서는 이러한 상관성에 대한 연구가 필요하다.

이에 따라 본 논문에서는 열적 및 전기적 열화와 tan  $\delta$ 와의 상관성 분석을 위하여, 동축 원통 구조의 케이블 모델 시편을 제작하고 유증 열화 챔버를 이용하여 열적열화와 전기적열화의 복합 가속 열화 실험을 수행하였고, 가속열화에 따라 tan  $\delta$  및 절연지의 인장강도를 측정하여 tan  $\delta$  측정을 통한 유침절연지의 열화 정도에 대한 분석을 시도하였다.

### 2. 실험 구성

#### 2.1 케이블 모델 시편

본 연구에서는 유침절연지에 대한 열화 특성을 분석하기 위하여, 시편에서 연단효과(edge effect)에 의한 전계 집중으로 인해 절연지 열화의 고유 특성 분석이 어려워지는 것을 피하기 위해 케이블 모델 구조의 시편을 제작하였다. 케이블 구조 시편의 경우 원통형 시편의 양쪽으로 전계완화를 위한 절연보강층이 있어 연단효과를 피할 수 있다. 이러한 구조는 OF 케이블과 유사하며,

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Daejin University, Korea.

E-mail: tkim@daejin.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Daejin University, Korea.

Received : July 3, 2016; Accepted : August 12, 2016

유입식 전력용 변압기의 절연 구조와는 다소 다르지만 절연지 고유의 열화특성 파악에는 적절하다고 판단된다. 또한 원통형 시료의 양쪽 끝에 가드링을 설치하는 경우  $\tan \delta$  측정의 정확성을 기할 수 있다.

직경 30 mm의 원통형 구리 파이프 위에 반도체 테이프를 2겹 감아 내부 반도체층을 형성한 뒤, 동일 전압에서 전계가 다르도록 0.125 mm 두께 크라프트 절연지를 8겹(1mm) 및 10겹(1.25mm) 감은 후 다시 반도체 테이프를 2겹 감아 외부 반도체층을 형성하도록 하였고 그 위에 동선을 감아 접지를 형성하도록 하였다. 케이블 구조의 양 끝에는 연단효과를 배제하기 위해 절연보강층을 설치하였으며, 실제 제작된 케이블 구조 시편을 그림 1에 나타내었다. 모의 가속열화 수행 이전에 수분제거와 절연유 함침을 위해 제작된 시편을 오븐 속에서 120°C 24시간 동안 건조시킨 후 알킬벤젠유에 함침하여 0.1 torr 진공펌프로 24시간 탈포 작업을 통해 시편 내부의 기포를 제거 및 완전함침을 수행하였다.



그림 1 케이블 구조의 유침절연지 시편  
Fig. 1 Specimen of oil/paper insulation with cable structure



그림 2 가속열화 챔버 및 장착된 시편  
Fig. 2 Acceleration chamber with installed specimens

## 2.2 가속열화 실험 조건

본 연구에서는 실제 전력기기의 열화조건을 모의하기 위해 장기적인 열적 전기적 열화를 동시에 수행하였다. 이를 위해 총 48개가 들어갈 수 있는 가속열화 챔버를 그림 2와 같이 제작하였다. 챔버 내에 절연유(알킬벤젠)를 채워넣은 후 시료를 거치대에 거치시켜 절연유에 함침시켰다. 유침절연지의 일반적인 최고 허용온도가 85°C 정도인 점을 감안하여 본 연구에서는 가속열화 온도조건으로 105°C, 120°C, 135°C를 설정하고 실험을 수행하였다.

전기적 가속열화를 위해서는 동일 시편에 다양한 전압을 인가하여야 하지만 장기 열화의 시간적인 문제를 고려하여 동일 전압에 두께를 달리하여 다양한 전계가 되도록 하였으며, 시편이 케

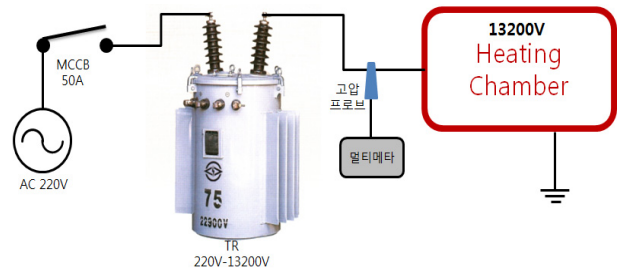


그림 3 전압 인가 방안  
Fig. 3 The method of voltage application

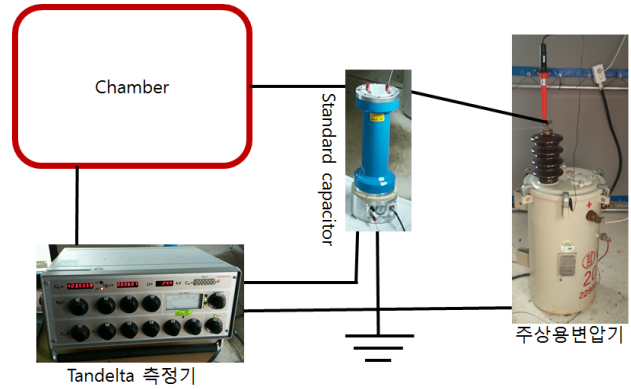


그림 4  $\tan \delta$  측정용 슈링브릿지 회로 구성도  
Fig. 4 Schering bridge circuit configuration for  $\tan \delta$  measurement

이블 구조인 만큼 154kV OF 케이블 절연층의 평균전계를 고려하여 2가지 조건(8겹 : 13.2 kV/mm 2.5E<sub>0</sub>, 10겹 : 10.5 kV/mm 2.0E<sub>0</sub>)을 적용하였다. 이때 48개나 되는 시편의 커패시턴스가 커서 일반적인 시험용 내압기로의 실험이 어려워 22.9 kV 배전용 주상 변압기를 이용하여 모든 시편에 13.2 kV의 동일한 전압을 그림 3과 같이 인가하였다.

열화 기간은 각 열화온도 별로 약 10주 동안씩 실험을 수행하였으며, 열화 중간에 일부 시료를 수거하여 주기적으로  $\tan \delta$ 를 측정하였다.

## 2.3 $\tan \delta$ 측정 시스템

측정에 이용한 슈링브릿지 회로를 그림 4에 나타내었으며, 가속열화기간 10주 동안 주기적으로  $\tan \delta$ 를 측정하였다.  $\tan \delta$ 는 온도와 수분에 크게 민감하기 때문에, 측정을 위해 전압인가와 가열을 배제한 후 챔버가 충분히 식은 후 일정한 온도에서 시편 하나마다 개별적으로  $\tan \delta$ 를 측정하였다. 수분에 대해서는 가속열화 온도가 높아 충분히 증발되었을 것으로 고려하여 별도의 조치를 취하지는 않았다. 아울러 전술한 바와 같이 케이블 구조의 시편 양단에 가드링 설치로 연면으로 누설되는 전류를 배제하여 유침절연층 자체만의  $\tan \delta$  측정이 되도록 하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 tan δ 측정 결과

가장 열악한 열적 열화의 경우인 135℃ 열화의 tan δ 측정 결과를 그림 5에 나타내었다. 그러나 열화 온도 135℃에서는 높은 온도로 인해 절연유에서 많은 유증기가 발생되었고, 그로인해 유위가 낮아져 열화실험 진행을 위해 열화실험 약 10일 이후부터 2주마다 절연유를 보충하였다. 따라서, 그림 5의 tan δ 값 중에서 10일 즉 240 시간 이후의 데이터는 신유가 함침되는 관계로 정확하지 못하였다. 열화 시작 후 열화 시간에 따라 tan δ 값이 증가하였으나, 절연유를 보충하고 측정한 tan δ 값은 증가되는 추세에서 낮아져 작아진 모양의 그래프로 판단된다.

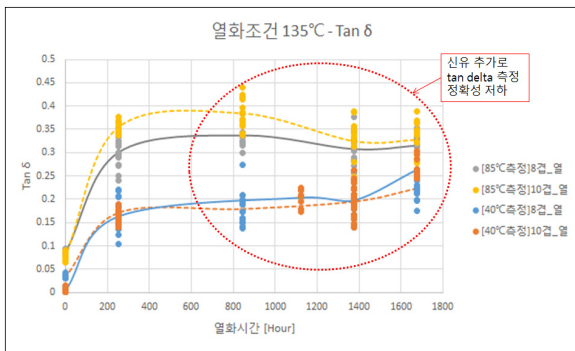


그림 5 열화조건 135℃의 측정 온도별 tan δ  
**Fig. 5** tan δ with various measuring temperatures for 135℃ aging condition

그림 6에 열화조건 120℃의 tan δ 측정값을 그래프로 나타내었다. 기본적으로 당연한 결과로 보이지만, 높은 열화 온도에서 높은 tan δ 값이 측정되었으며 시간에 따라 점차로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

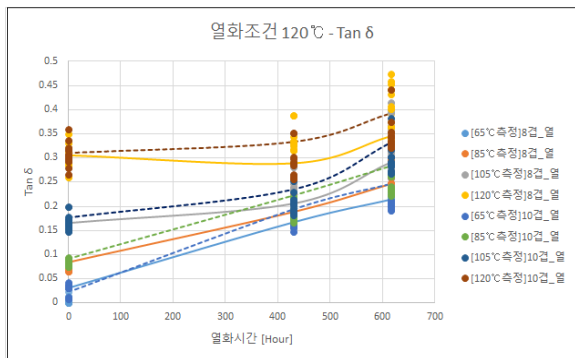


그림 6 열화조건 120℃의 측정 온도별 tan δ  
**Fig. 6** tan δ with various measuring temperatures for 120℃ aging condition

105℃ 열화조건의 tan δ 측정값을 그림 7에 나타내었다. 105℃에서도 높은 열화 온도의 시편에서 높은 tan δ 값이 측정되었으며, 약 740시간 열화시켰을 때 tan δ 값이 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 원인은 절연지에 잔존하는 수분 및 열화 시간에 따라 열화 발생 정도가 달라지기 때문으로 해석된다. 즉, 초기에 절연지에 잔존하는 수분은 시간이 지남에 따라 증발되어 감소하므로 tan δ 값이 저하하며, 문헌 [3]에 보고된 바와 같이 열화 시간에 따라 일정하게 열화되지 않고 초기에는 열화율이 증가하다가 시간이 지나면 감소하는 경향과도 연관이 있는 것으로 해석된다. 120℃ 및 135℃ 열화에서도 이러한 현상은 나타났을 것으로 추정되지만 높은 열화 온도로 인해 tan δ 측정주기인 2주 이내에 이러한 변화가 나타나 본 실험에서 관측되지는 않았다고 판단된다.

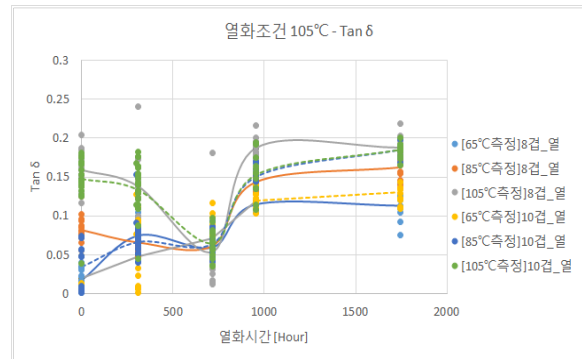


그림 7 열화조건 105℃의 측정 온도별 tan δ  
**Fig. 7** tan δ with various measuring temperatures for 105℃ aging condition

#### 3.2 열화시편에 대한 인장강도 측정 및 추정 수명 분석

본 연구에서는 열적 전기적 열화된 유침 절연지의 수명을 추정하기 위하여 열화된 유침절연지에 대해 인장강도를 측정하였다. 인장강도 측정은 KS M ISO 1924-2 ‘절연지 및 보드 - 인장특성 결정’ 규격[4]에 따라, 열화된 유침지를 250 mm × 15 mm 크기로 재단한 뒤 85℃ 오븐에서 24시간 건조시킨 후 수행하였다. 인장강도 TS의 계산은 다음과 같다.

$$TS = \frac{F_t}{bt} \quad [N/mm^2] \quad (1)$$

단,  $F_t$  : 최대 인장 부하       $b$  : 시료의 초기 폭  
 $t$  : 시료의 초기 두께

그림 8은 열화 온도에 대한 열화 시간에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 것으로, 열화 온도가 높을수록 인장강도가 심하게 감소되는 것을 알 수 있다. 이러한 감소는 다음 식으로 나타낼 수 있다. [5]

$$TS(t) = TS_0 e^{-C_{TS}(T)t} \quad (2)$$

단,  $TS(t)$  : 시간  $t$ 에서 인장강도 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $TS_0$  : 초기 인장강도 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $C_{TS}(T)$  : Arrhenius 관계식으로 가정되는 열화환경에 따른 열화계수

$$C_{TS}(T) = A e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

$A$  : 계수  
 $E_a$  : 크라프트지의 활성화 에너지 (113 [kJ/mol])  
 $R$  : 기체상수 (8.314 [kJ/mole/K])  
 $T$  : 절대온도 [K]

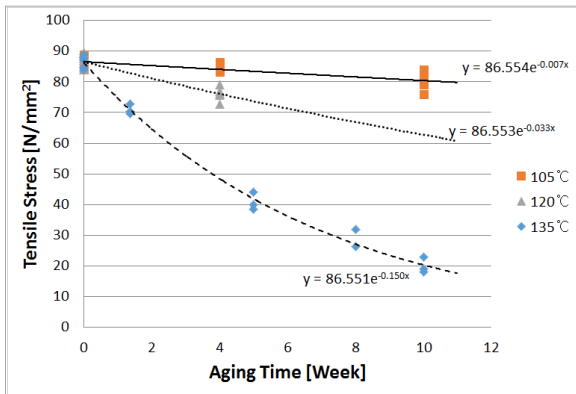


그림 8 열화온도에 대한 열화 시간에 따른 인장강도의 변화  
 Fig. 8 Changes of tensile strength with aging time for various aging temperatures

그림 8의 실험결과로부터 열화온도별 등가환산수명 및 가속열화배수를 구하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 온도별 열화기간에 따른 인장강도 측정 및 추세선 수식 도출 (식 (2) 이용)
- 2) 열화계수  $C_{TS}(T)$ 의  $A$  계산 및 수식 도출 (활성화 에너지  $E_a = 113$  [kJ/mol] 적용)
- 3) 온도별 수명식 완성
- 4) 인장강도 50% 저하시점을 한계수명으로 적용 [6]

식 (2)를 이용하여 구한 각 열화온도 및 최고허용온도 85°C에서의 각 계수와 인장강도가 50%로 저하되는 것을 한계수명으로 적용할 때의 등가환산수명과 가속열화 배수를 표 1에 나타내었다. 이에 따르면 결국 85°C에서의 수명이 10.4년으로 나타나고 있어 일반적인 유침절연지의 설계수명인 85°C 30년 정도보다 약 1/3 수준으로 나타나고 있다. 이것은 본 실험에서 열적 열화 과정 중 산소의 접촉으로 열화가 가속되었기 때문으로, 산소가 존재할 경우 2~4.5배 정도 열화가 가속된다는 보고[7]와 유사하다.

표 1 온도별 열화조건 계수  $C_{TS}(T)$  및 환산 수명 계산 결과  
 Table 1 Result for aging condition coefficient  $C_{TS}(T)$  with aging temperatures and the equivalent lifetime calculations

$T$ [°C]	$\frac{E_a}{RT}$	$C_{TS}(T)$	$A$	환산수명 (주) / (년)	가속 배수
135	2.934E+14	0.1504	5.126E-16	4.6 / 0.1	117.6
120	1.046E+15	0.033	3.154E-17	21.0 / 0.4	25.8
105	4.127E+15	0.0074	1.793E-18	93.7 / 1.8	5.79
85	3.077E+16	0.001279	4.157E-20	542.0 / 10.4	1

### 3.3 열화조건에 따른 등가환산수명을 고려한 $\tan \delta$ 분석

그림 9는 8겹(절연두께 1mm,  $2.5E_0$  인가) 시편에 대해 85°C에서 측정한  $\tan \delta$  특성이다. 135°C 열화의 경우에는 온도가 높아 유증기 증발이 심해 새로운 절연유를 보충하였기 때문에 열화 특성이 달라져 신유를 보충하기 전인 1,000시간 이내의 데이터만 정리하였다. 135°C의 경우에는 시간에 따라 증가율이 낮아지긴 하였지만 꾸준히 증가하는 것을 알 수 있다. 105°C의 경우에는 초기에 감소하다가 1,000시간 이후에는 증가하고 있으며, 이는 전술한 바와 같이 절연지 내에 존재하는 잔존 수분이 증발하고 또한 열 열화가 일어나면서 부산물이 발생하는 비율이 초기에는 작다가 어느 정도 시간이후에는 커지기 때문으로 판단된다.

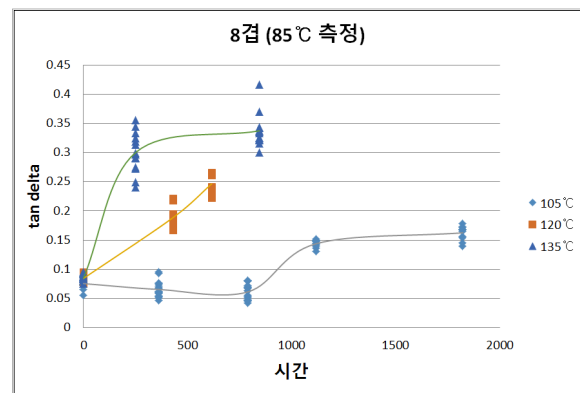
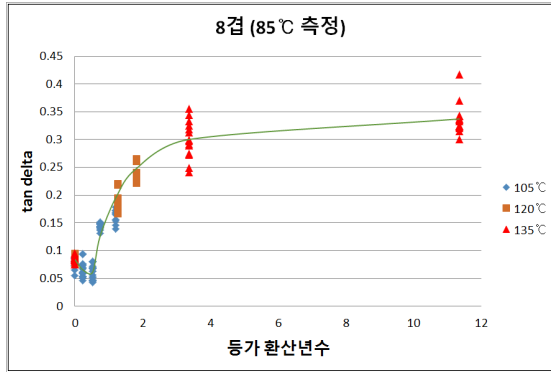


그림 9 열화온도별 열화시간에 따른  $\tan \delta$  측정 결과  
 Fig. 9  $\tan \delta$  results with aging time for various aging temperatures

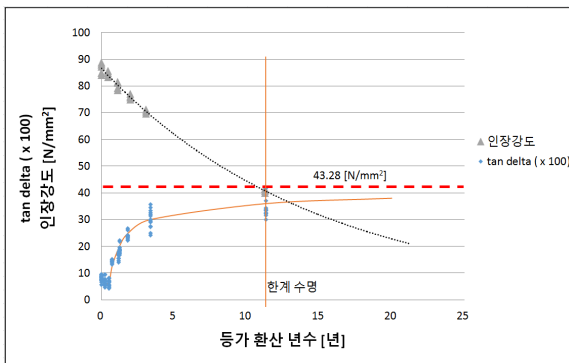
그림 9는 열화온도별로 단순히 시간에 따른 결과를 표현한 것으로 각 열화온도별로 직접적인 비교가 되지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 표 1에 나타난 열화온도별 가속열화 배수를 고려한 등가환산년수를 이용하여 상기 데이터를 재분석 하여 이를 그림 10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각기 다른 열화온도에 따른 결과였지만 모든 데이터가 등가환산년수에 따라 증가하고 있다. 초기에는 약간 줄어들다가 0.5년 정도의 등가환산

년수 이후에는 크게 증가하면서 시간에 따라 점점 증가율은 낮아지고 있다. 각각 다른 열화온도의 데이터임에도 불구하고 등가환산년수를 이용하여 분석하는 경우 모든 데이터가 적합하게 잘 피팅되고 있어서 본 연구의 인장강도를 고려한 가속열화배수 즉 등가환산년수의 적용이 타당한 것으로 해석된다.



**그림 10** 열화온도에 따른 등가환산년수 적용 tan δ 분석  
**Fig. 10** Analysis of tan δ results with applying equivalent operating years for various aging temperatures

한편 그림 11은 등가환산년수를 이용한 인장강도와 tan δ (100배)를 비교한 것으로 인장강도의 저하에 따라 tan δ가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 인장강도의 한계로 적용하는 50% 저하값(43.28 [N/mm<sup>2</sup>])은 대략 0.4 정도의 tan δ에 해당하는 것으로 보인다. 실제로 본 연구의 열화실험 도중에 파괴가 발생하는 경우는 대체로 tan δ가 0.3 이상의 값이었다.



**그림 11** 등가환산년수를 이용한 인장강도와 tan δ 비교  
**Fig. 11** Comparison of tensile strength and tan δ with applying equivalent operating years

그러나, 열적 열화에 따른 인장강도 특성과의 정량적인 관련성을 파악하기는 쉽지 않으리라 판단된다. 특히 본 실험의 결과는 외부 대기와의 접촉이 없는 실제 전력용 변압기나 OF 케이블에 서와는 양상이 다를 수 있다고 생각된다. 본 실험의 경우 절연유가 산소와 접촉하고 있어 산소가 공급되기 때문에 절연유의 산화

가 크게 일어나며 절연지의 분해도 심화될 수 있다는 점을 감안할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전력용 변압기 및 OF 케이블에 사용하는 유침 절연지의 열화특성을 파악하기 위해 케이블 모델 구조의 시편에 대해 장기적으로 열적 및 전기적 열화를 수행하면서 tan δ 측정을 수행하였다. 또한, 열화 온도에 따른 열화정도를 파악하기 위해 열화시편에 대해 인장강도를 측정하였다. 그 결과, tan δ는 초기에는 약간 줄어들다가 열화시간에 따라 증가하는 특성을 나타내었는데, 이는 시편에 존재하는 잔존수분의 증발 및 열화시간에 따라 열화발생 정도의 변화에 기인하는 것으로 해석된다. 또한 열화온도 및 열화시간에 따른 인장강도 변화는 지수함수적으로 나타났으며, 이를 이용하여 등가환산년수 및 가속열화배수를 구하여 이를 적용한 tan δ의 변화를 분석하였다. 열화온도는 달랐어도 등가환산년수의 적용에 따라 모든 열화 데이터는 서로 잘 피팅되었으며, 인장강도의 저하에 따라 tan δ가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 산소가 접촉되는 실험 환경으로 인해 열화가 가속되었고, 이것은 실제 변압기나 케이블과 같이 대기가 접촉되지 않는 환경에서의 열화특성과는 다르고 이로 인해 tan δ의 해석도 다소 달라지리라 보이므로, 본 연구의 결과로부터 정량적인 tan δ의 한계값을 도출하는 것은 어려울 것으로 판단된다. 향후, 산소가 접촉되지 않는 환경에서의 열적 전기적 열화 실험을 통해 보다 정확한 tan δ 측정의 한계값을 제시하여 실제 변압기 및 케이블의 열화 및 한계수명 판단에 적용할 필요가 있다고 본다.

#### 감사의 글

본 연구는 2016년도 한국에너지기술평가원의 지원 (20162220200030) 연구로서 깊이 감사드립니다.

#### References

- [1] P. Thomas et al, "Ageing studies on paper and oil to assess the condition of solid insulation used in power transformers", 7th International Conference on Solid Dielectrics, pp.69-72, 2001
- [2] Lukasz Chmura et al, "Use of Dissipation Factor for Life Consumption Assessment and Future Life Modeling of oil-Filled High-Voltage Power Cables", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 28, No. 1, pp. 27-37, 2012
- [3] A. J. Kachler, I. Höhle, "Aging of Cellulose at Transformer Service Temperatures. Part 1: Influence of Type of Oil and Air on the Degree of Polymerization of

- Pressboard, Dissolved Gases, and Furanic Compounds in Oil”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 2, pp. 15-21, 2005
- [4] KS M ISO 1924-2, Paper and board - Determination of tensile properties
- [5] H. P. Gasser, “Determining the aging parameters of cellulosic insulation in a transformer”, IEE, High Voltage Engineering Symposium, No. 467, 4.143-147.P1, 22-27 August 1999
- [6] IEC 60076-7, “Loading guide for oil-immersed power transformers”, 2009
- [7] A. M. Emsley, “Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 3: Effects of oxygen and water on ageing in oil”, IEE Proc-Sci Meas. Technol. Vol. 147, No. 3, pp. 115-119, November 2000

---

## 저 자 소 개



### 김 정 태 (Jeong-Tae Kim)

1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업(학사).  
1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업(석사).  
1992년 한양대 공대 전기공학과 졸업(공박).  
현재 대진대 공대 전기공학과 교수. 2007년~2008년 : 미국 Mississippi State University 교환교수. 2000년~2008년 CIGRE SC-B1 Insulated Cables, Regular Member.  
관심분야 : 고전압 절연설계, 절연 수명, 전력설비 절연진단 등.  
E-mail : jtkim@daejin.ac.kr



### 김 우 빈 (Woo-Bin Kim)

2014년 대진대 공대 전기공학과 졸업(학사).  
2016년 대진대 공대 전기공학과 졸업(석사).  
관심분야 : 고전압 절연설계, 절연 수명, 전력설비 절연진단 등.  
E-mail : dnqls12@naver.com