

Evaluation of Insulating Oil by Terahertz Time Domain Spectroscopy

金 根 柱* · 全 錫 基** · 宣 鍾 好*** · 陳 潤 植†
 (Kim Geun-Ju · Jeon Seok-Gy · Sun Jong-Ho · Jin Yun-Sik)

Abstract - A new method on the evaluation of insulation oil was proposed. Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) was applied to investigate the properties of the insulating oil. For the diagnostics of oil degradation, three kinds of oils have been analyzed by THz-TDS. The degraded oil showed different optical and electrical constants compared with a new one. Generally, the power absorption coefficient, the refractive index, the dielectric constant and loss $\tan\delta$ of the oil increase as the aging of insulating oil proceed. And the characteristics of two kind of insulation oil, 1-4 and 7-4, was compared in terahertz spectral region. Difference in refractive index and complex dielectric constant has been observed between the samples. The results of this study suggest that THz-TDS is a promising new means for evaluating degradation and identification of insulating oil.

Key Words : Terahertz Time-Domain Spectroscopy, Terahertz Wave, Insulating Oil, Refractive Index, Absorption, Dielectric Constant

1. 서 론

전원 공급의 안정성은 정보 기술 사회에 있어서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 현재 폴리머 재질이 고압 기계 장치에서 일반적으로 많이 사용되어지고 있으나 여전히 많은 장비에서는 유전적인 강도와 열적 방사를 높이기 위한 목적으로 절연지나 절연유가 사용되어지고 있다. 특히 변압기와 같은 절연유를 포함한 전력기기는 장기간 사용할 경우 사용 환경과 사용 조건에 따라 계속 그 특성이 변화한다. 이러한 전력기기의 안전성을 확보하기 위해서는 절연유의 잔여 수명 해석과 상태 점검은 매우 중요하다. 일반적으로 절연유의 특성 평가는 변압기 내부의 가스를 검출함으로써 기능 불량을 검출하는 용존 가스 분석(gas-in-oil analysis)이 널리 사용되어지고 있다[1-2]. 이외에도 점도 검사나 초음파를 이용한 방법, 절연유의 회복시간 측정, 누설 전류 측정법 등 다양한 방법이 있으며 UV, 적외선(infrared), X-ray 등 광 영역에서의 측정도 활발하게 이루어지고 있다[3-5].

테라헤르츠파(terahertz; THz) 전자기파는 0.1~10THz 범위의 주파수를 가진 전자기파로 스펙트럼 분포 상 마이크로파와 광파의 중간에 위치하며 파장으로는 30 μ m~3mm, 광

자 에너지로는 0.4~40[meV]에 해당한다. 광전도 방법(photoconductive)에 의한 THz 전자기파의 발생과 검출이 개발된 이래 이를 이용하여 기존의 GHz나 IR 영역에서 분석이 불가능했던 반도체, 광학적 결정체, 전도성 폴리머 등 다양한 물질의 특성 분석에 활용되어 왔다[6-8]. 이러한 특성 분석은 테라헤르츠파 시간 영역 분광법(THz time-domain spectroscopy: THz-TDS)에 의한 것으로 THz-TDS 분석에서의 신호 대 잡음비(signal to noise ratio : SNR)가 10,000:1 이상으로 매우 높아 기존의 어떠한 측정보다 결과의 정확도가 높을 뿐만 아니라 펄스의 폭이 매우 짧아 얇은 박막 형태도 측정이 가능하다. 또한, THz-TDS는 재료의 광학적, 전기적 특성인 흡수율, 굴절률, 유전상수 등을 비교적 용이하게 비접촉으로 측정할 수 있으며, 또한 고정밀도 측정이 가능하므로 시료의 작은 특성변화도 검출가능하다.

본 논문에서는 테라헤르츠파 시간 영역 분광법을 처음으로 전력용 절연유의 노화특성 분석과 절연유의 특성 및 식별에 적용하는 시도를 하였다. 사용에 따른 노화(aging) 특성을 측정하기 위해 순수한 절연유(7종 2호)와 사용되어진 절연유 그리고 폐유 세 종류에 대해서 특성변화를 비교 분석하였다. 또한 주로 고전압 대용량 유압변압기에 사용되는 절연유인 1종 4호와 7종 4호 두 종류의 절연유에 대해서 THz 영역에서의 광학적, 전기적 상수를 측정하고 비교하였다. 본 연구를 통하여 절연유의 광학적, 전기적 특성 변화를 측정함으로써 기존의 방법보다 정확하고 간편하게 절연유의 특성 변화를 검출할 수 있었고, THz 영역의 분광특성 분석을 통하여 절연유의 광학적 전기적 상수의 측정과 더불어 육안으로 식별이 불가능한 절연유의 종류 구분도 가능하였다.

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 THz파 전문연구팀
 E-mail : ysjin@keri.re.kr

* 正會員 : 韓國電氣研究院 THz파 전문연구팀 研究員

** 正會員 : 韓國電氣研究院 THz파 전문연구팀 先任研究員

*** 正會員 : 韓國電氣研究院 전력설비진단그룹 責任研究員

接受日字 : 2006年 4月 21日

最終完了 : 2006年 6月 16日

2. 실험장치

2.1 THz 분광시스템

그림 1은 광전도 안테나를 이용한 THz 전자기파의 발생 및 계측을 위한 시스템의 개략도이다. THz 전자기파의 발생은 크게 안테나를 이용한 광전도 안테나법(photoconductive antenna: PCA), 비선형 결정을 이용한 광정류법(optical rectification : OR), 반도체 표면 전계(surface field of semiconductor)를 이용한 방법 등이 있으나 본 연구에서는 큰 테라헤르츠 전자기장을 얻기 위해 광전도 안테나법을 사용하였다[9]. THz 전자기파의 발생과 검출을 위해 다이오드 레이저 펄핑에 의한 모드 잠금 Ti:sapphire 펄스 레이저를 사용하였다. 사용된 Ti:sapphire 펄스 레이저는 800[nm]의 파장, 70[fs]의 펄스 폭, 1W의 평균출력과 80MHz의 반복률(repetition rate)을 가진다. 레이저로부터 나온 빔은 $\lambda/2$ 파장판(waveplate)과 편광 빔 분배기(polarizing cube beam splitter)를 이용하여 여기용 빔(Pump Beam)과 검출용 빔(Probe Beam)으로 나누어 발생기와 계측부에 유도하였다. 그림 2는 사용된 테라헤르츠 이미터(emitter) 안테나의 개략적인 구조이다. 이미터는 SI-GaAs 위에 공면 스트립 라인(coplanar strip line) 구조를 가진 안테나를 사용하였다. 이미터는 100 μ m의 간격, 20 μ m의 폭을 가진 두 개의 전송 라인(transmission line)으로 구성되어 있다. THz 전자기파의 발생을 위해 7mW 레이저 파워를 입사시켰으며 큰 THz 전자기파를 얻기 위해 두 전송라인에 DC 30V($E_{bias} = 3kV/cm$)를 인가한 후 양(+) 전압이 인가된 전송라인에 여기(excitation) 레이저 빔을 입사시켰다[10-11]. 이미터로부터 발생된 THz 전자기파는 초점거리 4 인치인 2개의 타원 반사경(parabolic mirror)과 초점거리 10cm인 2개의 고저항 실리콘 렌즈를 이용하여 THz 빔을 시료에 집속하였다.

THz 전자기파의 검출은 크게 쌍극자 안테나를 이용한 광전도 방법과 비선형 결정을 이용한 자유공간 전광 샘플링(Free-Space Electro-Optic Sampling: FS-EOS) 등 다양한 방법이 있으나 본 연구에서는 FS-EOS 방법을 사용하였다. FS-EOS 방법은 광전도 방법에 비해 신호 대 잡음비는 낮으나 광대역 주파수 응답 특성이 우수한 장점이 있다[12]. 시료를 통과한 THz 전자기파는 고저항 실리콘 렌즈와 타원 반사경을 이용하여 1mm 두께의 <110> ZnTe 결정에 입사된다. 이때 THz 전자기파의 경로 상에 고저항 실리콘 웨이퍼를 설치하여 검출용 레이저 빔과 THz 전자기파가 평행하게 입사되도록 하였다. 본 실험에 적용된 비선형 결정을 이용한 FS-EOS의 측정원리에 대해서는 문헌 [13]을 참고하기 바란다. 광 다이오드로부터의 전류 측정은 Stanford Research System사의 lock-in amplifier SR830을 사용하였다. 또한 신호의 신호대 잡음비(SNR)를 개선하기 위해 펄프 빔을 기계식 초퍼(chopper)를 이용하여 2kHz로 변조시켰다. THz 빔이 전파되는 광학계를 아크릴로 만든 박스로 밀폐 후 상대 습도 <1 % 이하의 건조공기를 주입하여 실험 도중 공기에 포함된 수분에 의한 THz 전자기파의 영향을 최소화하도록 하였다.

그림 3은 절연유 측정을 위해 제작한 시료 홀더의 개략적인 구조이다. 액체 상태인 절연유의 측정을 용이하도록 하기 위해 두께 6mm의 말굽 모양의 용기를 제작하였다. 용기 양

면에는 두께 1.0mm의 PP(Polypropylene) 판을 부착하여 시료의 교체 용이하도록 하였다. PP는 테라헤르츠 영역에서 흡수 계수가 <5 cm^{-1} 이며 굴절률 또한 1.51로 일정하여 THz 전자기파의 왜곡이 거의 없으므로 측정된 데이터의 해석이 용이하다.

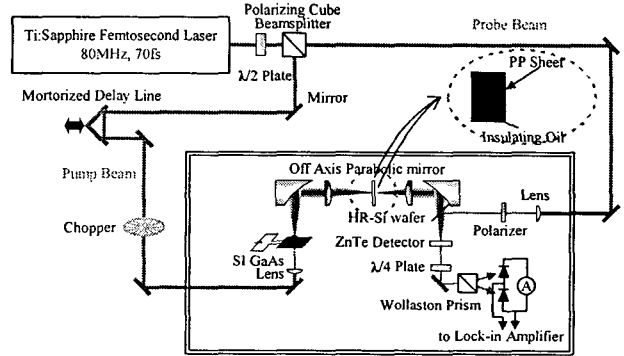


그림 1. 광전도 안테나를 이용한 테라헤르츠파 발생 및 계측 시스템 개략도
 Fig. 1 Schematic diagram of THz generation and detection system by photoconductive antenna

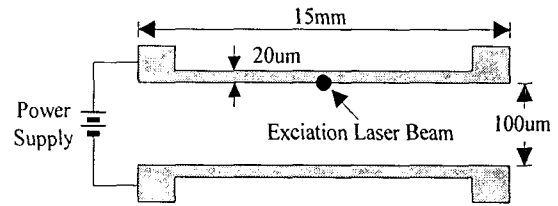


그림 2. 테라헤르츠 이미터 안테나 구조
 Fig. 2 Structure of terahertz emitter antenna

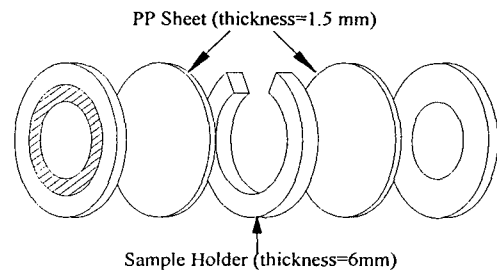


그림 3. 시료 홀더
 Fig. 3 Manufactured sample holder

2.2 측정 원리 및 이론

2.1절에서 설명한 광전도 안테나에서 발생한 THz 파 펄스를 분석하고자 하는 시료에 입사시키면, 그 펄스는 시료 표면에서 일부는 반사되고 일부는 투과하는 과정을 거친다. 투과 또는 반사된 테라헤르츠 신호(시료신호; sample signal or waveform)는 시료가 없을 때의 공기중을 전파한 신호(기준신호; reference signal or waveform)에 비해서 진폭이 감소하며, 분산이 일어나고, 위상의 지연이 생기게

된다 (그림 5 a.참조). 일반적으로 시료의 흡수가 강할수록 신호의 크기가 많이 감소하며, 굴절률이 클수록 위상지연이 많이 나타나게 된다. 이러한 변화를 측정하여 물질의 특성을 분석하는 기술이 THz파 시영역 분광법(THz time-domain spectroscopy; THz-TDS)이다. 한편, 시간 영역에서 측정된 데이터를 주파수 영역으로 변환시키기 위하여 고속 푸리에 변환을 함으로써 각 주파수 성분의 진폭(amplitude)과 위상(phase)을 모두 알 수 있다. 주파수 영역의 진폭과 위상 성분을 이용하여 물질의 굴절률과 같은 광학상수와 유전율, 전도율과 같은 전기적 상수를 간단히 계산해 낼 수 있다.

본 실험에서는 시료가 비극성 액체인 절연유이며, 이 절연유의 복소 굴절률은 $\tilde{n}(w) = n_s(w) - j \cdot k_s(w)$ 으로 나타낼 수 있다. 그림 4는 THz-TDS를 이용한 절연유 측정 방법을 개략적으로 나타낸 것이다. 먼저 시료가 없을 때 THz파를 시료홀더에 투과시켜 이 때 얻어진 파형의 푸리에 변환한 스펙트럼을 \tilde{S}_r (reference spectrum)이라 하고 시료(절연유)를 채운 상태에서 THz파를 투과시켜 얻은 파형의 푸리에 변환한 스펙트럼을 \tilde{S}_s (sample spectrum)라고 하면, 이 두 복소 주파수 스펙트럼 비는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 실수 굴절률 $n_s(w)$ 와 허수 굴절률 $k_s(w)$ 는 두 스펙트럼 크기의 비 $\rho(w)$ 와 위상차 $\phi(w)$ 항으로 표현된다[14].

$$\frac{\tilde{S}_s(w)}{\tilde{S}_r(w)} = \rho(w) \cdot e^{-j\phi(w)} \dots\dots\dots (1)$$

$$n_s(w) = \phi(w) \cdot \frac{c_0}{wL} + 1 \dots\dots\dots (2)$$

$$k_s(w) = \ln\left(\frac{4n_s(w)}{\rho(w) \cdot (n_s(w) + 1)^2}\right) \cdot \frac{c_0}{wL} \dots\dots (3)$$

여기에서 L은 측정하고자 하는 시료의 두께이며, c_0 는 진공에서의 빛의 속도이다. 전자기파 강도(intensity)의 감소를 나타내는 흡수 계수 $\alpha(w)$ 는 허수 굴절률 $k_s = c_0\alpha(w)/2w$ 의 관계로부터

$$\alpha_s(w) = \frac{2}{L} \cdot \ln\left(\frac{4n_s(w)}{\rho(w) \cdot (n_s(w) + 1)^2}\right) \dots\dots (4)$$

로 구하여 진다. 한편 복소 유전율은 복소 굴절률과 $\tilde{\epsilon}(w) = (\tilde{n}(w))^2$ 의 관계에 있으므로 유전 상수의 실수부와 허수부는 각각

$$\epsilon'(w) = (n_s(w))^2 - [c_0\alpha(w)/2w]^2 \dots\dots\dots(5)$$

$$\epsilon''(w) = 2n_s(w)k_s(w) = c_0n_s(w)\alpha(w)/w \dots\dots\dots(6)$$

로부터 구하여 진다. 또한, 복소 유전 상수로부터 유전적 전력 손실을 나타내는 손실계수 $\tan\delta$ 는

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''(w)}{\epsilon'(w)} \dots\dots\dots (7)$$

의 관계식으로부터 계산할 수 있다.

실험에서 얻어진 시간영역의 데이터를 이용하여 상기의 계산을 통하여 얻어진 파라메타들은 THz영역에서의 물질의 고유한 특성을 나타낸다. 주로 광학적 측면에서의 물질의 특성을 나타내는 것이 굴절률과 흡수율이며, 전기적 특성을 비교할 때 이용할 수 있는 파라메타가 유전율과 손실계수로 볼 수 있다.

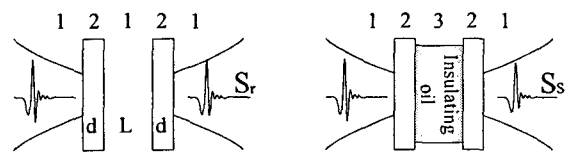


그림 4. 테라헤르츠 시간 영역 분광법을 이용한 절연유 측정 원리에 대한 개략도. Sr은 기준파이며, Ss는 시료를 통과한 파를 나타낸다. 1은 공기, 2는 pp 필름, 3은 절연유를 나타내며 d는 pp 필름의 두께, L은 절연유 시료의 두께.

Fig. 4 Schematic diagram for measurement principle of insulating oil using THz-TDS. S_r is reference field and S_s is the transmitted field through sample. 1 assigned for air, 2 is the polypropylene(cell material) and 3 is the insulating oil. L is the thickness of liquid sample and d is the cell side thickness

3. 실험 결과 및 토의

THz-TDS를 이용한 절연유의 열화 특성을 측정하기 위해 일반 유압 변압기에 사용되는 7종 2호 절연유에 대해서 순수한 절연유(신유)와 일정기간 변압기에 사용된 절연유 그리고 폐유 수준의 절연유의 세 종류를 측정하였다. 육안으로는 순수한 절연유는 무색 투명하며, 사용된 절연유는 노란색, 폐유 수준의 절연유는 적황색을 띠었다. 그림 5(a)는 각 시료로부터 측정된 THz 전자기 펄스를 보여주고 있는데, 측정 펄스의 신호대 잡음비(SNR)를 높이기 위해 각 시료에 대하여 3번 측정 후 그 평균값을 취하였다. 측정 결과 신호대 잡음비는 약 1000:1이었다. 그림에서 실선은 두 장의 PP 시트를 투과한 기준파이며 점선은 6mm 두께의 절연유를 투과한 THz 펄스이다. 각 시료 펄스는 노화 정도에 따라 기준파와 다른 시간 지연이 발생하였으며 펄스의 크기 또한 변화하였다. 이러한 THz-TDS에서의 시간 지연과 크기 변화는 시료의 두께 및 굴절률 그리고 흡수율에 비례하므로 쉽게 시료의 변화 유무를 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 그림 5(a)의 시간영역 펄스를 푸리에 변환을 통해서 얻어진 주파수 영역의 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 열화 정도에 따라 흡수율이 증가됨(스펙트럼의 진폭이 감소됨)을 확인할 수 있다. 스펙트럼에서 1.7THz와 2THz 부근의 약간 들어간 부분은 공기 중의 수분에 의한 영향이다.

그림 6은 측정된 데이터로부터 2.2절의 식(2)~(7)을 이용하여 계산한 0.3~3 THz 영역에 대한 절연유의 흡수 계수, 굴절률, 유전 상수 및 $\tan\delta$ 값이다. 그림 6(a)는 흡수 계수

로서 측정된 주파수 영역에서는 주파수의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 또한, 폐유의 흡수 계수는 신유에 비해 약 1.5배 정도 증가하였다. 그림 6(b)와 (c)는 각각 굴절률과 유전 상수 값으로 1THz에서 신유는 각각 1.460, 2.13이었으나 폐유는 1.477, 2.18로 값이 증가하였다. 그림 6(d)는 유전 손실계수 $\tan\delta$ 로서 주파수 증가에 따라 선형적인 증가 특성을 보였으나 2 THz 이후에서는 일정한 값으로 나타났다. 이것은 열화정도가 심할수록 유전손실이 증가함을 보여주는 결과이다. 상기의 측정결과를 종합하면 절연유의 노화 정도가 심할수록 THz 영역에서의 흡수계수, 굴절률, 유전상수 및 $\tan\delta$ 모두가 전체적으로 증가하는 특성을 보였다. 이는 절연유의 열화에 따른 절연유의 분자구조의 변화와 절연유 내부에 생성된 불순물 등에 의한 것으로 추정된다. 결론적으로 THz 주파수 영역에서 분광특성을 분석하는 THz-TDS 분광법은 절연유의 열화정도를 진단할 수 있는 새로운 방법의 하나로서의 가능성을 보여주는 결과를 얻었다.

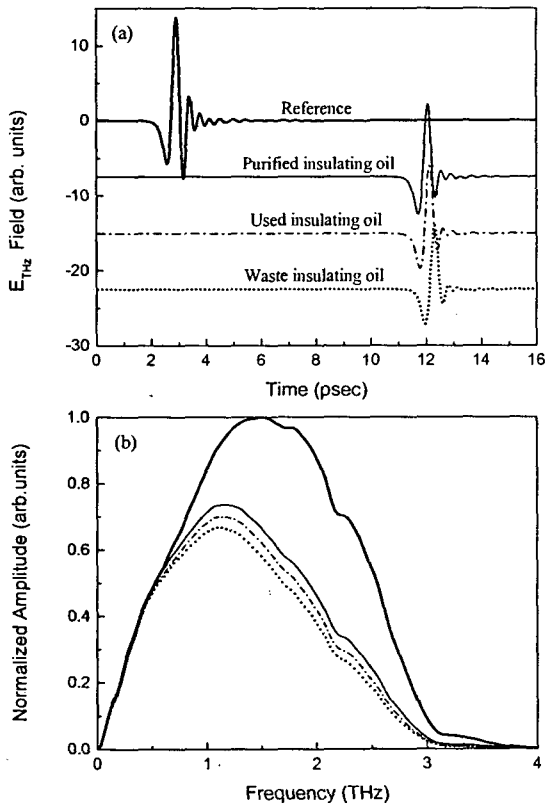


그림 5. (a) 측정된 테라헤르츠 펄스(두꺼운 실선은 2개의 PP 시트를 투과한 기준파, 가는 실선은 깨끗한 절연유, 실선-점선은 일정기간 사용된 절연유, 점선은 폐유 수준의 절연유), (b) (a) 펄스에 대한 스펙트럼
 Fig. 5 (a) Measured terahertz pulse(Thick line is reference pulse passing through 2 PP sheets. Thin line is pulse for purified insulating oil. Dash-dot line is pulse for used insulating oil. Dot line is pulse for waste insulating oil) (b) Spectra of time domain pulse (a)

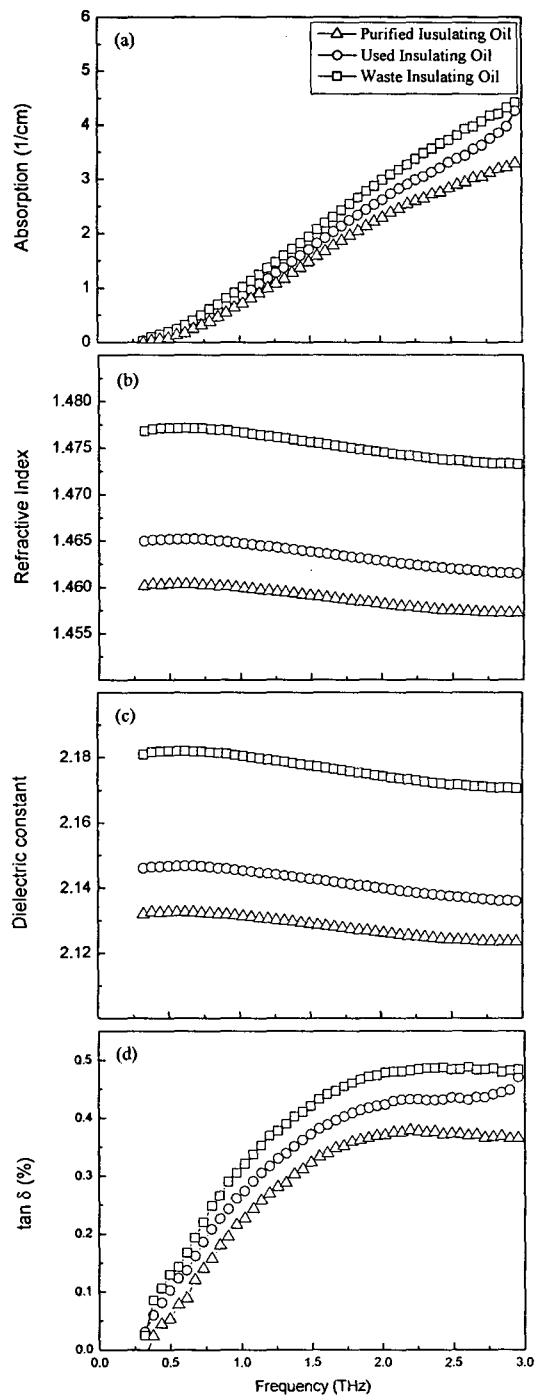


그림 6. 노화 정도에 따른 절연유 특성 (a) 흡수 계수 (b) 굴절률 (c)유전 상수 (d) $\tan\delta$
 Fig. 6 The characteristics of insulating oil due to the aging. (a) Absorption coefficient (b) Refractive index (c) Dielectric constant (d) $\tan\delta$

다음으로 고전압 대용량 유입변압기에 주로 사용되는 절연유 1종 4호와 절연유 7종 4호 두 종류의 절연유에 대해서 THz 영역에서의 분광분석을 시도하였다. 한국산업 규격 KS C 2301에 따르면 절연유 1종 4호는 주성분이 광유로 되어 있으며, 절연유 7종 4호는 주성분이 광유인 1종과 주성분이

알킬벤젠인 2종을 혼합한 혼합유이다. 이들 절연유에 대한 각종 파라메타도 상기의 2.2절에서 설명한 바와 같은 과정을 거쳐 산출하였다. 그림 7(a)는 흡수율로서 낮은 주파수에서는 두 종류의 절연유에서 큰 차이를 보이지 않지만 2THz 이상의 주파수 대역에서 다소 차이를 보였다. 그림 7(b)와 (c)는 굴절률과 유전 상수를 계산한 결과로서 1THz에서 1종 4호는 각각 1.460, 2.13, 7종 4호는 1.456, 2.12로 나타나 1종4호가 7종 4호보다 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 본 실험에서 얻은 광유(1종 4호)의 굴절률 및 유전 상수 값은 참고 문헌 [15]에 나타나 있는 $n=1.48$, $\epsilon = 2.18\sim 2.2$ (at 60Hz, 80°C) 보다 다소 작은 값으로 측정되었다. 이는 기존에 알려진 굴절률은 가시광 영역(수백 THz)에서의 값이며, 유전율은 60 Hz라는 저주파 영역에서 제시한 값이므로 본 실험에서 측정된 300GHz-3THz 값과 다소 차이를 보이는 것으로 판단된다. 본 실험에서 얻은 값 자체는 기존에 알려지지 않았던 주파수 영역에서의 새로운 데이터로서의 의미를 가진다고 볼 수 있다. 한편, 그림 7(d)는 유전 손실계수 $\tan\delta$ 로서 두 가지 절연유에 대해서 유사한 특성을 보여주고 있는데 약 300GHz에서의 값은 0.02-0.03%로서 기존의 광유에 대하여 알려진 값 0.02% [15]와 거의 일치함을 알 수 있었다. 본 결과로부터 THz-TDS의 고정밀 분광측정을 통하여 산업적 응용이 높은 절연유의 THz 영역에서의 특성을 파악하였고, 이러한 특성 분석으로부터 육안으로는 식별이 불가능한 절연유의 구분이 가능함을 알 수 있었다.

4. 결 론

테라헤르츠 전자기파를 이용하여 0.2~3 THz 영역에 대한 절연유의 특성을 처음으로 평가하였다. 절연유의 열화에 따른 측정에서는 열화 정도가 심화될수록 흡수율, 굴절률, 유전상수 및 $\tan\delta$ 값 모두 증가하는 특성을 보였다. 이러한 결과로부터 테라헤르츠파 분광법이 절연유의 열화정도를 진단하는 새로운 수단이 될 수 있다는 가능성을 제시하였다. 또한 다른 두 종류의 절연유에 대해서 THz 영역에서 특성 비교 분석을 통하여 테라헤르츠파 분광법이 절연유의 종류를 확인할 수 있는 가능성을 보여주었다. 추후 보다 많은 종류의 절연유에 대해서 THz 영역에서의 분광 특성에 관한 데이터 베이스 축적이 이루어진다면 테라헤르츠파 분광법은 열화진단 뿐만 아니라 미지의 절연유에 대한 확인을 할 수 있는 우수한 수단을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구를 위하여 절연유 시료와 데이터시트를 제공해주신 (주)효성 조익춘 팀장님 이하 직원 분들께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

[1] V. G. Arakelian, "The Long Way to the Automatic Chromatographic Analysis of Gases Dissolved in

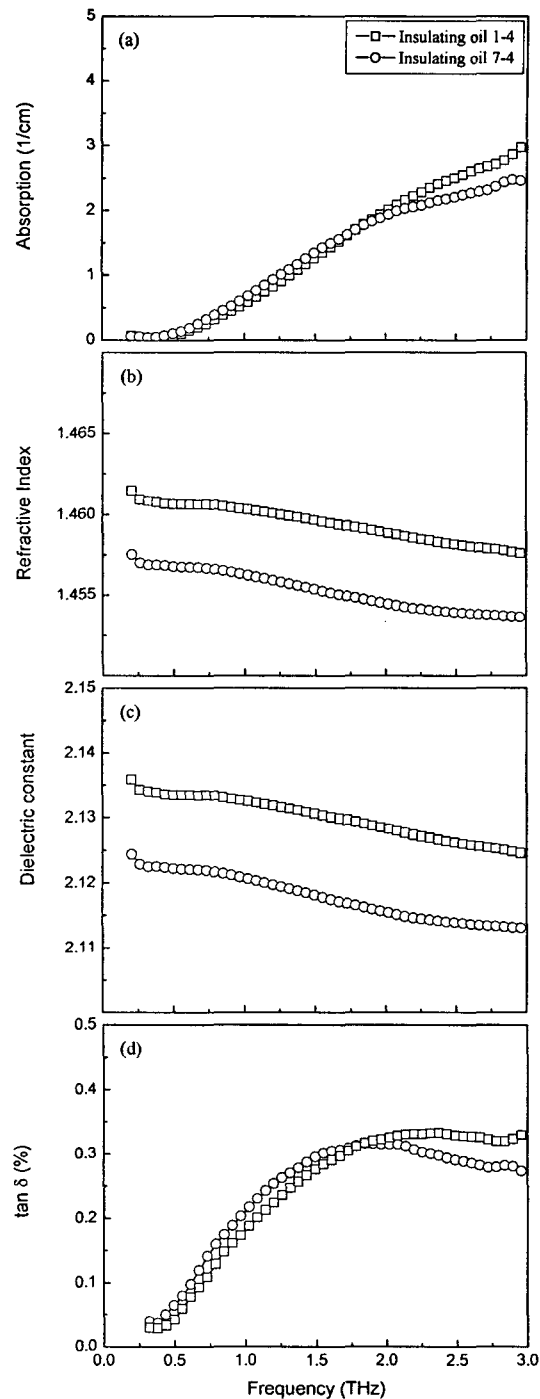


그림 7. 절연유 1종 4호와 절연유 7종 4호 비교 (a) 흡수 계수 (b) 굴절률 (c)유전 상수 (d) $\tan\delta$

Fig. 7 Comparison of insulating oil 1-4 and insulating oil 7-4 (a) Absorption coefficient (b) Refractive index (c) Dielectric constant (d) $\tan\delta$

Insulating Oil", IEEE electrical insulation magazine : a publication of the IEEE Electrical Insulation

Society, Vol. 20, No. 6, pp. 8-25, 2004

[2] Kan. H., Miyamoto. T., Makino. Y., Namba. S., Hara. T., "Absorption of CO₂ and CO gases and furfural in insulating oil into paper insulation in oil-immersed transformers", Electrical Insulation Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on, pp. 41-44, 1994

[3] Nagamune. K., Kobashi. S., Kondo. K., Hata. Y., Taniguchi. K., "An ultrasonic evaluation for degradation of insulating oil using fuzzy inference", Ultrasonics, 2003 IEEE Symposium on, pp. 893-896, 2003

[4] Hosier. I.L., Vaughan. A.S., Sutton. S.J., Davis. F.J., "Chemical and physical properties of aged dodecylbenzene insulating oil" Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005, pp. 225-228, 2005

[5] Aka-Ngnui. T., Benounis. M., Jaffrezic-Renault. N., Stevenson. I., Beroual. A., "In situ monitoring of the degradation of insulating oil under AC voltage", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005, pp. 253-256, 2005

[6] Tae-In Jeon and D. Grischkowsky, "Nature of Conduction in Doped Silicon", Phys. Rev. Lett., Vol. 78, pp. 1106-1109, 1997.

[7] G. Gallot, Jiangquan Zhang, R. W. McGowan, Tae-In Jeon, and D. Grischkowsky, "Measurements of the THz absorption and dispersion of ZnTe and their relevance to the electro-optic detection of THz radiation", Appl. Phys. Lett., Vol. 74., pp. 3450-3452, 1999.

[8] Al-Douseri, F.M., Liu, Haibo, Jin Yun-Sik, Chen, Yunqin, Zhang, X.C, "Applications of THz-time domain spectroscopy and far-infrared Fourier transform spectroscopy on petroleum products analysis", Infrared and Millimeter Waves, 12th International Conference on Terahertz Electronics, 2004. pp. 401-402, 2004

[9] D. Dragoman and M. Dragoman, "Terahertz fields and applications", Prog. Quantum Electromis, Vol. 28, pp. 1-66, 2004

[10] Stephen E. Ralph and D. Grischkowsky, "Trap-enhanced electric fields in semi-insulators : The role of electrical and optical carrier injection", Appl. Phys. Lett. Vol. 59. pp. 1972-1974, 1991

[11] 진윤식, 김근주, 손채화, 정순신, 김지현, 전석기, "광전도 안테나에 의한 광대역 테라헤르츠파의 발생특성", Trans. KIEE. Vol. 54C, pp. 286-292, 2005

[12] Q. Wu and X.-C. Zhang, "Free-Space Electro-Optic Sampling of Terahertz Beam", Appl. Phys. Lett. Vol. 67, pp. 3523, 1995

[13] 진윤식, 전석기, 김근주, 손채화, 정순신, "ZnTe결정을 이용한 테라헤르츠파의 발생 및 검출특성", 한국광학회지, 제16권 제6호, pp. 553-599, 2005

[14] S.P.Mickan and X.-C. Zhang, "T-Ray Sensing and Imaging", Int'l J. High Speed Electronics and systems, Vol. 13, pp. 601-676, 2003

[15] 講談社サイエンティフィック, "電氣絶縁油 핸드ブック 石油學會/編" Chapter 1, 1989

저 자 소 개



김근주 (金根柱)

1975년 12월 22일생. 2001년 한국해양대 전기공학과 졸업. 2003년 한국해양대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 테라헤르츠파 전문연구팀 연구원
Tel : 055-280-1467
Fax : 055-280-1490
E-mail : kikimanse@lycos.co.kr



전석기 (全錫基)

1972년 6월 12일생. 1998년 서울대 사대 물리교육과 졸업(학사). 2001년 서울대 자연대 물리학부 대학원 졸업(석사). 2005년 동대학원졸업(박사). 2005년 1월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 테라헤르츠파 전문연구팀 선임연구원.
Tel : 055-280-1415
Fax : 055-280-1490
E-mail : sgjeon72@keri.re.kr



선종호 (宣鍾好)

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단 연구그룹 책임연구원
Tel : 055-280-1578
Fax : 055-280-1547
E-mail : jhsun@keri.re.kr



진윤식 (陳潤植)

1963년 4월 17일생. 1986년 서울대 공대원 자핵공학과 졸업. 1990년 동대학원 졸업(석사). 1999년 나가사키 대학 대학원 졸업(공학박사). 1999년 9월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 테라헤르츠파 전문연구팀, 그룹장, 책임연구원.
Tel : 055-280-1458
Fax : 055-280-1490
E-mail : ysjin@keri.re.kr