

이슬점 응축 현상을 이용한 오일 내 수분함량 측정에 관한 실험적 연구

공호성*, 윤의성, 한흥구, 김학열
한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

An Experimental Study on the Measurement of Water Content in an Lubricating Oil by Implementing a Dew-point Condensation Sensor

Hosung Kong, Eui-Sung Yoon, Hung-Gu Han, Hak Yeul Kim
Tribology Research Center, KIST

Abstract - Presence of water in the lubricating oils could be one of the first indicators of potentially expensive and possibly catastrophic failure of the machine as it may cause displace the oil films to prevent the lubrication function of the oil or chemically react with many oil additives resulting in the oil degradation. In order to detect water content quantitatively in lubricating oils many methods and sensors has been developed. Among these, capacitive sensors including sensitive layer, whose dielectric factor changes according to the water content absorbed in the layer, are proposed mainly in the market. But these sensors are not sensitive to a high water content. Besides, the absorbing layer soils in time. In this work, an evaporation of water moisture from oil into air volume above lubricant surface and condensation of water vapor at a cooling surface was used to measure water content quantitatively in an lubricating oil. Laboratory test results of a prototype sensor were presented. Test results showed that the proposed method could be available to measure a low levels of oil moisture.

Key words: water content, oil deterioration, dew point, lubricant sensor

1. 서 론

윤활유의 상태진단은 기계설비 시스템에서의 돌연한 파손을 조기에 검지하여 핵심적인 기계 부품 파손을 방지하기 위하여 최근 들어 국내외적으로 많은 관심을 가지며 연구되고 있다. 특히 윤활유 내에 존재하는 수분함량은 윤활유 상태를 진단하는 주요한 항목이라 할 수 있다.

윤활유 내의 수분은 기계시스템의 실링 요소의 파손 등에 의하여 외부로부터 혼입되기도 하지만, 오일 탱크의 주입구 및 브리더 등과 같이 오일 주변의 대기와 연결되어 있는 부분들에서 대기와 호흡하면서 오일 속으

로 자연스럽게 침투된다. 수분은 본질적으로 오일과 혼합되지 않으므로 오일 속에서 분리되어 오일의 밑 부분으로 가라앉게 되나, 오일 순환에 난류가 형성될 때에는 수분이 방울(droplet) 형태로 오일 내에 분산되는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 경우, 수분은 기계 접촉 부위에서의 오일 층을 밀어내어 윤활유로서의 기능을 상실하게 하며, 윤활유 내의 각종 첨가제들과 화학적으로 반응하여 상기 기능들을 급격하게 저하시키기도 한다. 또한 수분은 금속 표면들의 부식을 촉진하기도 한다.

저널베어링 내부에 존재하는 수분은 오일 윤활막을 손상하여 과도한 마모를 초래하는데, 오일 내의 1% 수분 침투에 의하여 저널

베어링의 수명이 90% 정도나 단축된다고 보고되고 있다[1] (Fig. 1 참조). 구름베어링의 경우는 수분이 윤활막의 강도를 저하시킬 뿐만 아니라, 고온 및 고압 접촉 조건 하에서 수분이 기화하여 침식마모를 초래하는 현상들이 보고되고 있다. 또한 윤활유 내의 수분은 윤활유 내에 구리, 납 및 아연과 같은 금속이 존재할 경우, 윤활유의 산화를 10배 정도나 증가하여 윤활유의 열화를 급속하게 촉진할 수도 있는 것으로 알려져 있다.

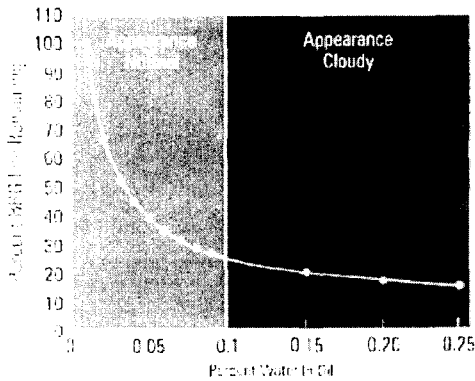


Fig.1. Effect of water contamination on bearing life [1].

오일 내의 수분은 Table 1에서와 같이 세 가지 상(phase)으로 존재한다[1-3]. 첫 번째로 수분이 오일 내에 수화(hydrate)되거나 화학첨가제와 반응하여 용해(dissolved)된 상태로 존재한다. 윤활유 내의 용해된 수분은 오일 내부에 눈으로 직접 관찰하기에는 불가능할 정도로 매우 작은 크기의 수분입자들이 분산되어 있는 형태로서, 대기 중에 존재하는 수분과 유사하다 할 수 있다. 따라서 오일이 상당한 양의 수분을 지니고 있다 하더라도 이의 존재를 쉽게 판별하기 어렵게 된다. 유압작동유 및 터빈유와 같은 산업용 오일의 경우, 온도 및 오일의 열화정도에 따라서 대략 200 내지 600 ppm(0.02 - 0.06%)의 수분이 용해된 수분 형태로 존재할 수 있다고 알려져 있다[1].

수분 함량이 오일 내에서 용해될 포화 정도를 초과하면 수분은 미세한 방울로 이루어진 이물질(emulsion) 형태로 유화된다. 이물질

은 물리적으로 안정한 형태를 유지하여 수분 혹은 수년에 이르기까지 상기 형태를 안정적으로 유지하기도 한다. 오일 내부에 유화된 이물질 입자들의 크기가 증가됨에 따라서 오일의 색이 점차적으로 뿌옇게 변화되어 육안으로도 관찰할 수 있게 된다. 유화된 오일에 보다 많은 수분이 함유하게 되면 이물질 입자들이 상호 결합하게 되어 급속도로 free water를 형성하고 상분리가 발생하여 바닥으로 가라앉게 된다[3].

Table 1. Water forms in oil.

Water form in oil	Size dispersed particles	Optical characteristics	
Dissolved water	Water hydrogen bonded to the hydrocarbon molecules of oil	Transparent	
Emulsion	Micro	0.01 - 0.2 μm	From transparent to semi-transparent
	Macro	0.2 - 50 μm	Opaque
Free water	separated from oil		

산업용 윤활유들은 다양한 종류의 기유와 첨가제 성분들에 따라서 Table 2에 나타난 바와 같이 오일 내에 포화될 수 있는 수분의 함량이 달라진다. 순수한 광유계 오일에서는 1 ppm 정도로 극히 낮은 수분만이 포화되는 반면에 디젤 엔진유에서는 1 내지 5% 정도까지 높은 수분함량이 포화될 수 있음을 알 수 있다. 또한 대상 기계시스템에 따라서 수분 측정센서의 측정범위 및 정도가 각각 달라져야 함을 알 수 있다[3].

Table 2. Dependence of dissolved water content on the lubricants types.

Lubricants type	Normal water content	Saturation level
Diesel engine oil	0.5% (5000 ppm)	1 - 5%
Industry oil	0.02 - 0.06%	0.06 - 0.5%
Hydraulic oil	0.05 - 0.15%	0.01 - 0.1%
Gear box oil	0.05 - 0.15%	
Turbine oil	0.05 - 0.15%	100 ppm
Transformer oil		1 - 3 ppm
Pure mineral oil		1 ppm

2. 수분 측정원리 및 측정센서

임의의 매질 내의 수분함량의 측정은 다음과 같이 Henry의 법칙에 의하여 의한다고 알려져 있다[4]. 일정한 온도 하에서 주어진 체적 속에 용해되는 가스의 질량은 평형상태의 가스의 압력에 비례하므로, 매질 내에 존재하는 수분의 질량비 농도, C , (weight concentration, ppm 혹은 질량%)는 다음 식(1)과 같이 매질 내 수분 가스의 부분압, P (partial pressure)에 비례한다.

$$C = KP \quad (1)$$

식(1)에서 K 는 Henry 상수이다. 매질이 수분으로 포화되었을 때, 상기 포화 조건은 다음과 같다.

$$C_S = KP_S \quad (2)$$

식(2)에서 C_S 는 수분의 포화농도를, P_S 는 매질의 온도 하에서 포화점에서의 수분 기체의 압력을 각각 의미한다. 상기 두 식으로부터 다음 식을 구할 수 있다. 즉,

$$C = C_S \frac{P}{P_S} \quad (3)$$

식(3) 및 (1)에서 헨리 상수 K 는 C_S/P_S 이 되며 매질의 용해도라고도 불린다. 따라서 어떠한 매질의 수분 포화 농도가 주어진다면 수분 농도 값은 매질 내의 수분 기체의 압력을 측정함으로써 구할 수 있다. 그러나 이러한 포화점이 온도에 따라서 변하므로 농도 값을 측정함에 있어서 온도에 관한 고려가 필수적으로 있어야 한다.

일반적으로 오일 내 수분함량은 다음과 같은 세 가지 특성적인 형태로 측정된다. 첫 번째로 오일 샘플 속에 존재하는 수분의 함량을 질량비 형태의 질량농도(mass concentration, ppm)로 표시한다. 이러한 측정방법들 중 대표적인 것으로 화학 적정(titration)을 이용하는 Karl Fisher의 수분측정 방법을 들 수 있다. 상기 방법에 의하여 10 ppm 정도의 낮은 수분함량이 측정되는 것으로 알려져 있다. 또한 현장에서 간편하게 수분함량을 측정하는 방법으로 calcium hydride test kit가 이용되기도 하는데, 상기 방법은 오일 내에 free water가

존재하면 측정 셀 내의 압력의 변화가 발생함을 측정함으로써 수분함량을 50 ppm 수준 정도까지 측정할 수 있다.

두 번째로는 오일 내 수분의 상대 포화도(relative saturation)를 측정한다. 상대 포화도는 주어진 온도 하에서 오일에 최대 포화될 수 있는 수분 함량에 관하여 실제적으로 샘플 오일 속에 존재하는 수분 량을 상대적으로 퍼센트로 나타낸다. 오일 속에 수분함량이 일정하다 하더라도 온도 변화에 따라서 수분이 요해되고 분리되는 특성이 달라지므로 상기 방법에 의한 측정법이 수분 침투에 의한 위험성을 경고함에 있어서 보다 효과적일 수 있다[5].

세 번째는 식(3)에서의 압력비를 0에서 1 사이의 water activity 정의하여 측정하는 것이다. 상기에서 0은 오일 내에 수분이 전혀 없음을 의미하고, 1은 수분이 포화되어 있는 상태를 의미한다[6]. 따라서 water activity가 0.9 정도에 다다르면 오일의 온도가 감소할 시에 오일 내에 용해되어 있던 수분들이 free water로 분리될 수 있는 위험성이 있는 것으로 해석하게 된다.

FTIR에 의한 분광분석법이 오일 내 수분함량을 측정하는 실험실적 방법으로 많이 사용되나, 측정 정도가 낮아서 1000 ppm 이하의 수분함량은 측정하기 곤란한 문제점이 있다고 보고되고 있다[7].

오일 내 수분함량을 실험실적으로 분석하는 방법들의 공통적인 문제점은 오일 샘플링 및 분석에 시간이 많이 걸리고 실제적인 사용 온도 조건 하에서의 위험성을 신뢰성 있게 평가하기 어렵다는 것이다. 따라서 최근에는 현장에서 직접 측정을 행할 수 있는 장착형 수분 측정센서들이 많이 개발되고 연구되고 있다. 이러한 장착형 센서들의 대부분은 오일의 전기적 특성변화를 측정하는 원리를 사용하고 있다.

오일의 전기적 특성을 측정하는 센서들 중 오일의 정전용량 변화를 측정하는 방법이 가장 많으며, 저항 변화를 측정하는 경우도 있다. Fig. 2는 다양한 측정원리들을 사용하는 수분 측정센서들의 측정원리들을 나타내고 있다[8-17].

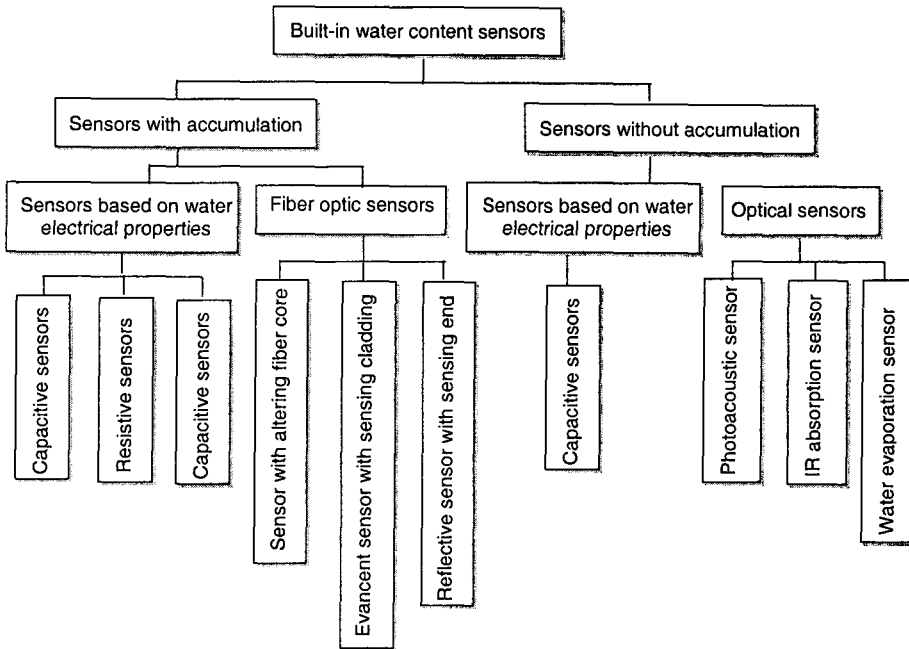


Fig. 3. Overall view of built-in water content sensors.

3. 측정장치의 고안

Fig. 4는 오일 내 수분함량 측정을 위하여 본 실험에서 사용한 측정센서 장치를 나타내고 있다. 고안된 센서는 윤택유 표면 위에 위치한 공기 체적으로 건조한 공기를 붙여 넣어 오일 내의 수분 기체가 기화되는 현상을 이용하여 오일 내에 존재하는 수분함량을 정량적으로 측정하도록 하였다. 수분을 함유하고 있는 오일 표면이 경계면에서 건조한 공기와 만나면 수분 평형을 이루기 위하여 오일 내부의 수분이 공기 쪽으로 기화하게 된다. 따라서 본 고안된 센서 장치 내의 공기 체적 내에 전자 습도계(8)를 위치하고 측정하면 공기의 상대습도가 오일 내의 수분함량에 비례하여 증가하게 된다. 그러나 상기의 방법에서 공기 내의 전자습도계 센서 표면이 시간이 갈수록 오염되는 문제점이 야기될 수 있기 때문에 현실적으로 상기 원리를 구현하기 어렵다.

이와 같은 문제점을 피하기 위하여 공기 체적 내에 Fig. 5와 같이 그리드(grid) 구조를

갖는 캐패시터(capacitor) 센서 소자(4)를 위치하고 이를 통하여 공기 내 상대습도의 변화를 간접적으로 측정하도록 하였다. 또한 적은 상대습도의 변화를 효과적으로 측정하기 위하여 캐패시터 소자 위에 펠티어(peltier) 열전소자(5)를 위치하고 그리드 소자 표면을 이슬점(dew point) 온도까지 냉각하여 소자 표면에 수분이 응축하도록 하였다. 따라서 그리드 소자의 정전용량은 소자 표면에 응축한 수분의 질량에 비례하여 변화되며 상기 변화량을 통하여 오일 내 수분함량을 정량적으로 측정하도록 하였다.

수분 측정을 위하여 그리드 표면을 이슬점까지 냉각한 후에는 펠티어 열전소자를 가열하여 그리드 표면이 재차 건조되도록 하였다. 센서 장치 내에 그리드 표면 및 오일의 온도를 각각 측정할 수 있는 온도 센서들이 위치되어 있다.

Fig. 6은 본 실험에서 행한 전형적인 측정 결과를 나타내고 있다. 즉 샘플 오일과 공기 경계면 사이에 수분 농도에 관한 평형이 이루어지면 그리드 센서 표면에서의 출력과 공기

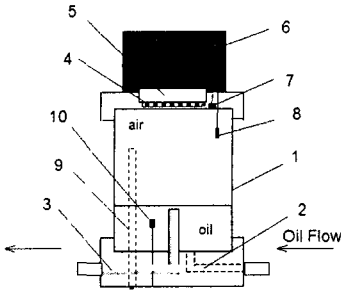


Fig. 4. Condensation Detector of Water in Oil: 1 glass chamber; 2 and 3 inlet and outlet for oil flow; 4 grade sensor; 5 Peltier Module; 6 heat sink; 7 temperature sensor; 8 air humidity sensor; 9 drain air tube; 10 oil temperature sensor.

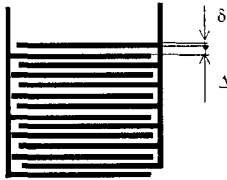


Fig. 5. The grid (comb) structure of sensor capacitor: • is electrode thickness and • is gap between electrodes

내 전자습도계의 측정값이 일정하게 된다. 이 때 펠티어 소자를 가열하여 그리드 표면의 온도를 T_1 으로 증가시켜 그리드 표면 위의 수분을 제거한다. 이 때 온도 증가와 함께 그리드 센서에서의 출력값이 동시에 증가하나, 그리드 표면이 건조해짐에 따라서 점차적으로 상기 측정값이 감소하여 원래 상태로 돌아감을 알 수 있다. 이후에 그리드 소자 표면을 냉각하여 온도가 T_2 로 떨어지면 그리드 표면에 수분이 응축하게 되며 따라서 그리드 소자의 정전용량이 증가하여 센서의 출력값이 증가하게 된다. 실험 결과 온도가 T_2 로 떨어지면 센서의 출력값이 초기에는 약간 감소하는 모습이 관찰되었는데, 이는 그리드 표면의 갑작스런 온도 변화에 의하여 발생한 것으로 사료되었다.

Fig. 6은 본 실험 센서장치에 사용한 센서 그리드 정전용량 측정 장치를 위한 전기 회로 블록 다이어그램이다. 제너레이터에서 발생한 펄스의 주파수는 4 MHz이고 전압은 7 V를 사용하였다. 검출기를 통하여 캐패시터의 전

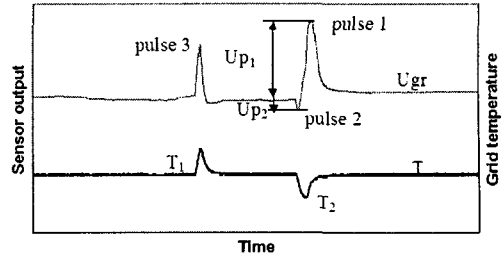


Fig. 6. Variations in output signals of Condensate sensor (U_{gr}), and grid temperature (T) in the course of measurement.

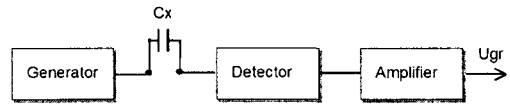


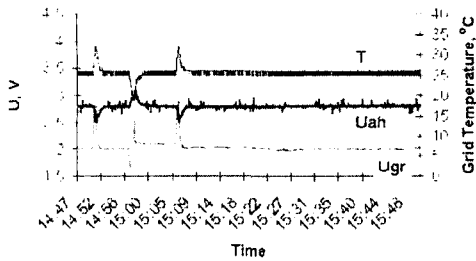
Fig. 7. Block diagram of measurement of capacitance of sensor grid.

류를 정류하고 증폭하였다.

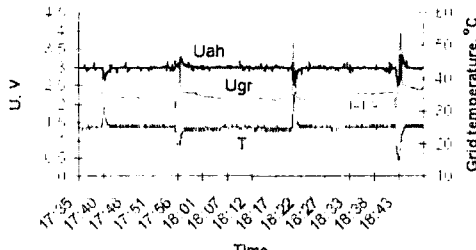
4. 실험결과 및 해석

Fig. 8 및 9는 각각 유압작동유 신유 (DTE-24, #32 HD oil Mobil) 및 사용유 오일에 인위적으로 수분을 함량별로 첨가하여 본 연구에서 고안한 센서장치로 측정된 시험결과들이다. 오일 샘플로의 수분의 첨가는 syringe를 사용하여 행하였으며, 40°C 하에의 온도 하에서 9-10 시간동안 잘 교반한 다음 대기 온도 (약 25°C)로 냉각된 후에 오일의 water activity를 측정하는 Vaisala Water Sensor(HMP 228 model)[6]을 이용하여 샘플 오일의 수분함량을 비교 측정하고 확인하였다. 센서 장치 내로의 샘플 오일의 유동은 peristaltic pump를 이용하였다. 샘플 오일과 공기 표면과의 수분 농도가 평형을 이루기 위하여 일정한 시간동안 (약 1시간 정도) 센서 장치 내로 오일이 유동된 후에 센서 장치 내에 설치된 전자습도계의 출력값이 안정화되면 오일 밸브를 닫아서 센서 내로의 오일 유입을 차단하고 측정을 시작하였다. 펠티어 소자 모듈에 0.5 A를 줄 경우에는 6°C 정도의 온도가 상승하거나 감소하였고, 1 A의 전류 하에서는 약 10°C 정도의 온도 변화가 관찰되었다.

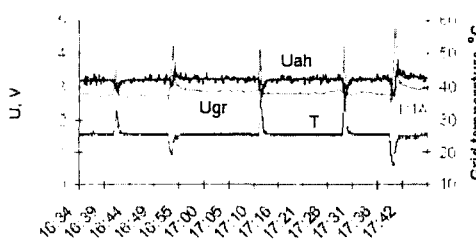
Fig. 10에는 전술한 실험결과들을 Vaisala



(a)

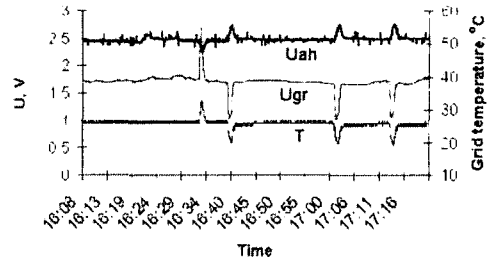


(b)

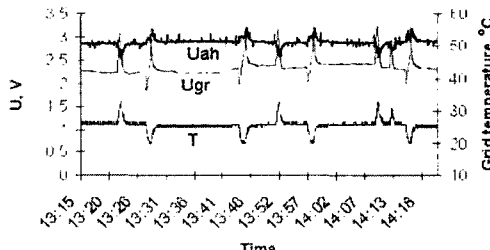


(c)

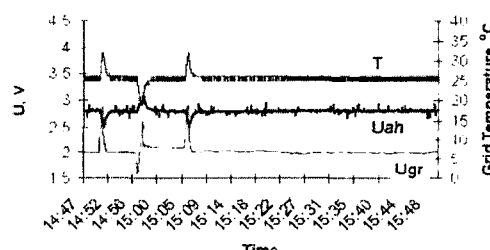
Fig. 8. Results of clean oil test for different water contents: a.w.=0.581 (a); 0.655 (b); and 0.744 (c). Ugr output of condensation sensor; Uah output of air humidity sensor and T grid temperature.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Results of used oil test for different water contents: a.w.=0.480 (a); 0.628 (b); and 0.799 (d). Ugr output of condensation sensor; Uah output of air humidity sensor and T grid temperature

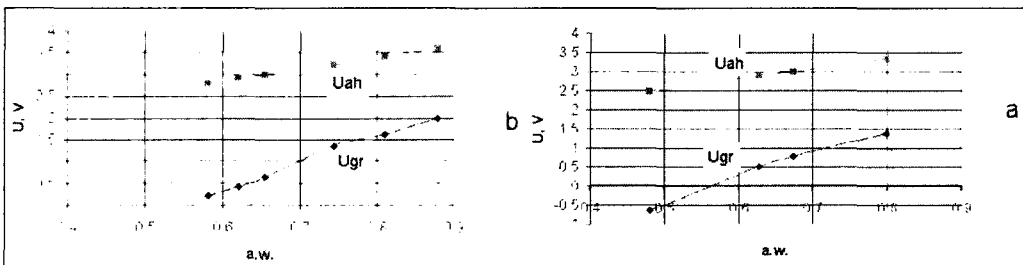


Fig.10. Correlation between outputs of air humidity sensor (Uah), Condensation sensor (Ugr) and Vaisala Sensor (a.w.) for clean (b) and used oil (a).

Water Sensor에서 측정된 결과들과 비교하였다. 샘플 오일 속에 수분함량이 증가할수록 본 실험에서 고안한 센서에서의 출력값이 오

일 내 수분함량 증가에 비례하여 선형적으로 증가함을 알 수 있었으며, 아울러 전자습도계에서 측정된 상대습도 값 변화와도 잘 일치하는 특성을 관찰할 수 있었다.

5. 결 론

오일 내 수분함량 측정을 위하여 윤활유 표면 위에 위치한 공기 체적으로 건조한 공기를 불어 넣어 오일 내의 수분 기체가 기화되는 현상을 이용하여 오일 내에 존재하는 수분 함량을 정량적으로 측정하도록 하였다. 본 연구에서 고안된 센서 장치 내의 공기 체적 내에 그리드 구조를 갖는 캐패시터 센서 소자를 위치하고 이를 통하여 공기 내 상대습도의 변화를 간접적으로 측정하도록 하였다. 또한 적은 상대습도의 변화를 효과적으로 측정하기 위하여 캐패시터 소자 위에 펠티어 열전소자를 위치하고 그리드 소자 표면을 이슬점 온도까지 냉각하여 소자 표면에 수분이 응축하도록 한 결과에서 그리드 소자의 정전용량은 소자 표면에 응축한 수분의 질량에 비례하여 변화되며 상기 변화량을 통하여 오일 내 정량적인 수분함량을 효과적으로 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Water - The Forgotten Contaminant. Mark Barnes, Noria Corporation.
2. Lance Lewand "Understanding Water in Transformer Systems" *NETA World, Spring 2002, p. 1-4.*
3. US 5656767.
4. An introduction to Hygrometry. IMA Ltd. /www.ima.co.uk
5. Are You Sensing Moisture Problems? *Pall's New Water Sensor Reports Dissolved Water Concentrations, Practicing Oil Analysis, Instrument Review, Issue Number: 199907.*
6. HMP228 Operating Manual M210282en-A.
7. Mark Barnes, "Fourier Transform Infrared Spectroscopy". *Practicing Oil Analysis Magazine, March 2002.*
8. Ron Parrett. Water Saturation as a Screening Method for On-site Oil Analysis. Issue Number: 200107, *Practicing Oil Analysis,*

Case Studies.

9. Automatic determination of moisture content and lubricant type: US5656767, publ. 12.08.97.
10. Capacitive oil water emulsion sensor system: patent US5642098, publ. 06.24.9.
11. Method and apparatus for measuring liquid dielectric behavior: patent US6509745, publ. 21.01.03.
12. N.S. Foster , J.E. Amonette, T. Autrey, J.T. Ho. Detection of trace levels of water in oil by photoacoustic spectroscopy. *Sensors and Actuators, 77 (2001) 620-624.*
13. "Easy, Online Moisture Monitoring". *Practicing Oil Analysis Magazine. July 2001.*
14. US6447573 Apparatus and method for lubricant condition control and monitoring.
15. Capacitive humidity sensor construction and method for manufacturing the sensor: US5075816, publ. 24.12.91, (Vaisala).
16. Fiber optic moisture sensor, US 6582658, 2003.
17. Optical fiber sensor with light absorbing moisture-sensitive coating, US 4894532, 1990.

논문 발표

Seession III

The Acoustic Emission Energy Analysis of Subambient Pressure Tri-pad Slider	139
Dynamic Characteristics of HDD Slider by Perturbed Finite Element Method	143
피스톤 링 팩 연구를 위한 기초 프로그램 개발	149
자동차 엔진 운동부의 트라이볼로지적 특성에 관한 고장 사례 연구	158
기체분자운동론을 이용한 박막 베어링 해석	162
스크롤 압축기 스러스트 베어링의 윤활해석	171
고속 회전 유연 디스크의 진동 저감용 공기 베어링 해석	175
고속 공기 포일 베어링의 정적·동적 특성에 관한 실험적 연구	186
터보펌프용 Inter-Propellant Seal의 개발 현황	195
내부 원형 그루브를 갖는 저속 드라이 가스 시일의 윤활 성능해석	201
고온조건에서 NBR O-링 밀봉력에 관한 실험적 연구	209