

# 윤활유 분석 센서를 통한 기계상태진단의 문헌적 고찰 (윤활유 센서의 종류와 기능)

홍성호<sup>†</sup>

동국대학교 창의융합공학부 기계시스템공학전공 조교수

## Literature Review of Machine Condition Monitoring with Oil Sensors -Types of Sensors and Their Functions

Sung-Ho Hong<sup>†</sup>

Assistant Professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Dongguk University-Gyeongju

(Received November 5, 2020 ; Revised December 9, 2020 ; Accepted December 10, 2020)

**Abstract** – This paper reviews studies on the types and functions of oil sensors used for machine condition monitoring. Machine condition monitoring is essential for maintaining the reliability of machines and can help avoid catastrophic failures while ensuring the safety and longevity of operation. Machine condition monitoring involves several components, such as compliance monitoring, structural monitoring, thermography, non-destructive testing, and noise and vibration monitoring. Real-time monitoring with oil analysis is also utilized in various industries, such as manufacturing, aerospace, and power plants. The three main methods of oil analysis are off-line, in-line, and on-line techniques. The on-line method is the most popular among these three because it reduces human error during oil sampling, prevents incipient machine failure, reduces the total maintenance cost, and does not need complicated setup or skilled analysts. This method has two advantages over the other two monitoring methods. First, fault conditions can be noticed at the early stages via detection of wear particles using wear particle sensors; therefore, it provides early warning in the failure process. Second, it is convenient and effective for diagnosing data regardless of the measurement time. Real-time condition monitoring with oil analysis uses various oil sensors to diagnose the machine and oil statuses; further, integrated oil sensors can be used to measure several properties simultaneously.



© Korean Tribology Society 2020. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

**Keywords** – function(기능), machine condition monitoring(기계상태진단), oil sensor(오일 센서)

### 1. 서 론

기계상태진단(machine condition monitoring)은 상태 감시를 통하여 측정된 자료와 정보를 바탕으로 기계 결

함이나 고장 여부를 진단함으로써 기계고장을 예방하고 고장 원인을 개선하여 기계의 신뢰성을 높이는데 기여하는 분야이다[1-4]. 기계상태진단에는 Fig. 1과 같이 과거에는 압력이나 속도 같은 물리량의 기준 값으로 기계상태를 진단하는 compliance monitoring과 strain gauge를 통해 구조물의 응력과 변형을 측정함으로써 기계상태진단을 하는 structure monitoring이 많이 이용되었다. 요즘에는 과거에서부터 사용하던 방법뿐만 아니라 진동 소음을 이

<sup>†</sup>Corresponding author: Sung-Ho Hong  
Tel: +82-54-770-2211, Fax: +82-54-770-2870  
E-mail: hongsh@dongguk.ac.kr  
<https://orcid.org/0000-0002-3445-0646>

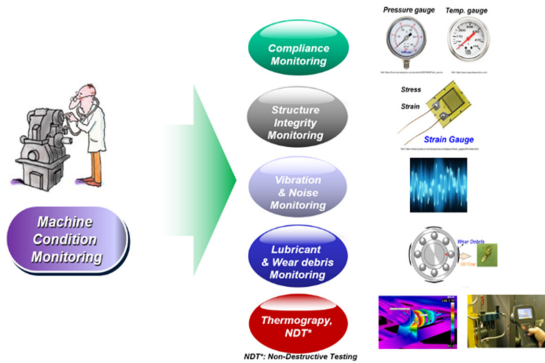


Fig. 1. Machine condition monitoring.

용하여 기계상태를 진단하는 방법, 열화상(thermography)을 이용한 진단 방법, 초음파와 같은 비파괴 기법을 이용한 진단 방법, 윤활유와 마모입자 분석을 이용한 진단 방법이 있다. 여러 가지 기계상태진단 방법 중 가장 많이 적용되고 있는 분야는 소음, 진동 분석을 기반으로 하는 상태진단 방법이고 그 외에도 센서나 관련 측정 기계의 발달뿐만 아니라 기술의 발달로 열화상과 윤활유 분석뿐만 아니라 초음파 같은 비파괴 방법등이 많이 적용되고 있고 또한 여러 기술들이 함께 복합적으로 적용되기도 한다[5-7].

윤활유 분석을 통한 기계상태진단은 예전보다 측정 센서의 발달과 측정 기술의 개선으로 Fig. 2와 같이 다양한 분야에서 적용이 되고 있다. 자동차, 기차, 탱크나 장갑차와 같은 군용 기계의 엔진이나 기어 박스 같은 중요 부분에 대한 상태진단뿐만 아니라 선박용 엔진, 건설기



Fig. 2. Application of machine condition monitoring with oil analysis.

계, 화학 또는 발전 플랜트에서도 적용되고 있다. 그 외에도 풍력 발전기나 항공기에 많이 적용되고 있다[7-8].

이 논문에서는 윤활유 분석을 이용한 기계상태진단에 대해서 기존의 연구방법에 대한 소개뿐만 아니라 윤활유 센서를 이용한 진단 방법을 중점적으로 소개하고자 한다. 특히 관련 문헌을 통해 조사한 내용 중, 윤활유 센서의 종류와 기능에 대해서 중점적으로 서술하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2-1. 윤활유 분석을 이용한 기계상태진단의 장점

윤활유 분석을 이용한 기계상태진단은 Fig. 3과 같이 다른 상태진단 방법에 비해 기계 이상이나 손상을 조기에 감지할 수 있다. 윤활면의 접촉에 의한 마모입자가 발생하기 때문에 이를 감지함으로써 기계의 이상을 조기 감지하여 큰 손상을 방지할 수 있다[9]. 그 외에도 간헐적으로 생기는 이벤트에 대해서도 윤활유 분석의 결과 값들은 분석이 용이하다는 장점도 있다. 즉 윤활유 분석 또는 측정 결과들이 주로 지속적으로 증가하거나 지속적으로 감소하는 형태를 나타내기 때문이다.

### 2-2. 윤활유 분석의 방법

기계 시스템에서 윤활유를 분석하는 방법은 Fig. 4와 같이 크게 3가지로 나눈다. 오일 샘플링(oil sampling)을 통해 윤활유를 분석하는 방법을 오프 라인(off-line) 방법이고 주된 흐름이 발생하는 곳에 직접적으로 분석을 하는 방법을 인라인(in-line) 방법이라고 한다. 이 방법 외에 주된 흐름이나 작동에 영향을 주지 않고 우회로 등을 활용하거나 대표성이 있는 곳에서 분석을 하는 방법으로 온라인(on-line) 방법이 있다. 오프라인 방법으로 윤

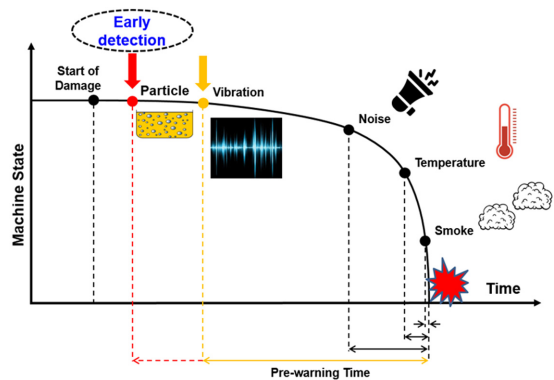


Fig. 3. Advantage of machine condition monitoring with oil analysis.

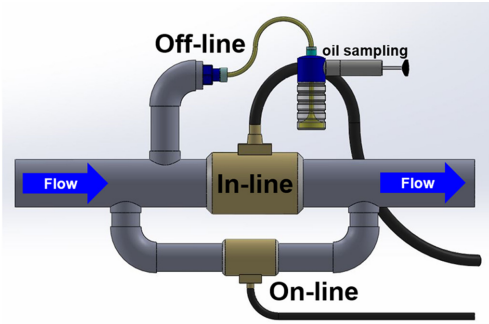


Fig. 4. Methods of oil analysis.

활유를 분석할 경우 가장 큰 단점은 실시간으로 분석이 가능하지 않다는 것이다. 이를 보완하는 방법이 윤활유 센서를 기반으로 하는 온라인 방법이다. 온라인 방법은 오프라인 방법에 비해 사람에 의한 오염이나 실수를 줄일 수 있고 윤활유 센서를 통해 조기 진단이 가능하여 큰 고장을 방지할 수 있으며 시간, 비용적인 측면에서 경제적이며 또한 분석을 위한 숙련된 기술이 필요하지 않다. 이런 장점으로 인해 오프라인 방법보다는 윤활유 센서를 활용하는 온라인 방법이 선호된다[8-9].

2-3. 윤활유 센서의 종류와 기능

윤활유의 각 물리량을 측정하는 윤활유 센서들을 정리를 하면 Fig. 5와 같다. 윤활유 사용 중에 발생하는 마모입자를 측정하는 마모입자 센서, 윤활유의 가장 기본적인 물성값인 점도를 측정하는 센서, 수분 오염의 정도를 측정하는 수분 센서, 디젤 엔진 등에서 주로 발생하는 수트(soot)를 측정하는 센서, 산가와 염기가를 측정하는 센서, 윤활유에 포함되어 있는 공기의 양을 측정하는 센서, 그리스의 특성을 측정하는 그리스 센서 등이 있다. 점도를 측정하는 센서는 단독으로 점도만을 측정하기도 하고 온도와 밀도를 함께 측정하는 통합형 센서를 사용하여 동점도나 온도에 따른 점도 변화를 함께 모니터링을

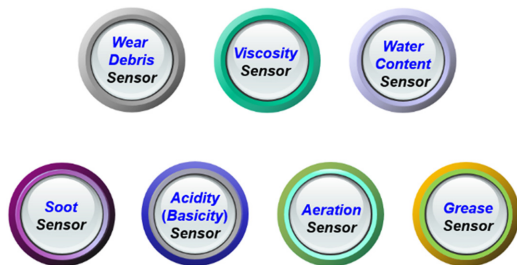


Fig. 5. Type of oil sensors.

하는데 활용된다.

2-3-1. 마모입자 센서 (wear debris sensor)

기계 시스템에서 고장이나 이상 작동이 발생하는 과정에서는 주로 작은 마모입자가 발생한다. 이 작은 마모입자의 발견은 기계 시스템의 상태 감시에서 중요하다. Fig. 6은 시간에 따른 마모입자 사이즈(wear debris size)와 농도(concentration)를 보여준다. 새로운 엔진이나 기어 박스 같이 마모가 발생하는 기계시스템에서 초기나 정상 상태(normal condition)일 때는 마모 입자의 크기가 1~10 μm이고 농도는 거의 일정하다. 그러나 기계가 비정상 상태(abnormal condition)일 때는 20~100 μm 크기의 비교적 큰 마모입자가 발생한다. 따라서 마모입자를 통한 기계상태진단을 할 때 주로 20 μm이상의 마모입자를 모니터링 한다[11-13].

윤활유에 포함되어 있는 마모입자는 윤활유의 유전율(permittivity), 투과율(permeability), 전도도(conductivity), 광학 특징(optical properties)을 변화시킨다. 즉 윤활유의 이러한 성질을 이용하여 윤활유에 포함된 마모입자를 파악한다[14]. Fig. 7은 마모입자 센서의 측정 방법을 보여

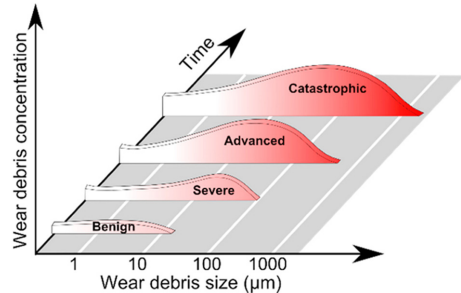


Fig. 6. Relationships of wear debris size, concentration, and machine conditions [10].

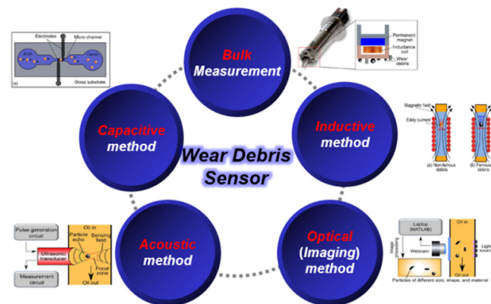


Fig. 7. Wear debris sensors.

**Table 1. Wear debris sensors [14]**

Monitoring method classification	Specific sensor	Material detected	Detection range	Advantage	
Induction	Magnetic collection	Gill sensors	Ferrous debris	NA	Clear up ferrous debris, high throughput
	3-D solenoid structure	MetalSCAN sensor	Ferrous and non-ferrous debris	100-3360 $\mu\text{m}$	Differentiate ferrous and non-ferrous debris, high throughput
	2-layer planar coil structure	Inductive pulse sensor	Ferrous and non-ferrous debris	20-1000 $\mu\text{m}$	Differentiate ferrous and non-ferrous debris, Detect individual wear debris particles
Capacitance	Dielectric constant	Bulk capacitance sensor	Metallic debris	NA	High throughput
		Microfluidic capacitance sensor	Metallic debris	10-40 $\mu\text{m}$	High sensitivity
Ultrasonic	Acoustic amplitude change	Ultrasonic oil debris sensor	Solid debris, air bubble	170-1000 $\mu\text{m}$	Detect solid debris and air bubbles
Optical		Integrated ultrasonic-inductive pulse sensor	Metallic debris, ceramic, air bubble	50-310 $\mu\text{m}$	Differentiate ferrous, non-ferrous, solid debris and air bubbles
	Wear debris morphology	Active pixel sensor	Solid debris	5-160 $\mu\text{m}$	Detect debris particle shape and material
Monitoring method classification	Specific sensor	Disadvantage			
Induction	Magnetic collection	Gill sensors	Cannot detect individual debris particles and non-ferrous debris particles		
	3-D solenoid structure	Ferrous and non-ferrous debris	Low sensitivity, may identify multiple debris particles as one large debris particle due to large sensing zone		
	2-layer planar coil structure	Ferrous and non-ferrous debris	Low throughput		
Capacitance	Dielectric constant	Bulk capacitance sensor	Low sensitivity, water influence, large sensing zone		
		Microfluidic capacitance sensor	Extremely low throughput, water influence		
Ultrasonic	Acoustic amplitude change	Ultrasonic oil debris sensor	Complicated structure, cannot differentiate metallic and non-metallic debris		
Optical		Integrated ultrasonic-inductive pulse sensor	Low throughput, complicated flow recess structure		
	Wear debris morphology	Active pixel sensor	Low throughput, complicated system, affected by oil transparency		

준다. 측정하는 방법에는 인덕턴스(inductance), 전기용량(capacitance), 음향(acoustics), 광학(optics) 또한 인덕턴스와 영구자석을 이용해 다량의 철분 마모입자들이 측정 가능한 bulk measurement 방법이 있다. Table 1은 다양한 마모입자 센서들의 측정 범위, 측정 기구(mechanism) 등 그 특징들을 정리하였다.

#### 2-3-1-1. Bulk measurement 가능한 마모입자 센서

기어박스, 변속기, 엔진 등에서 철분 마모 입자를 모니터링하는 것은 효과적이다, 따라서 다량의 철분 마모 입자를 일부 포집하면서 윤활유 에 포함된 철분 마모입자의 양을 측정하는 센서이다. Fig. 8의 Gill sensor는 대표적인 센서로서 인덕턴스 코일과 영구자석을 이용한다.

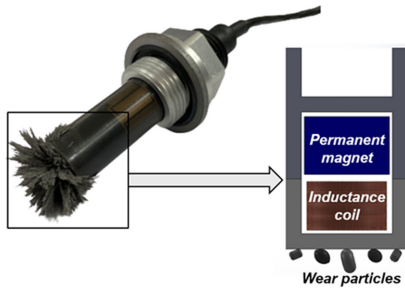


Fig. 8. Ferrous wear debris sensor of Gill sensor.

이런 종류의 센서는 윤활유에 포함되어 있는 철분 마모 입자들을 일부 포집하여 윤활유 순환 중에 발생하는 마모를 방지하는 효과도 있으나 비철 금속의 마모입자나 개별적인 철분 마모입자의 크기나 농도에 대한 정보는 제공하지 못한다[15].

2-3-1-2. 전기용량과 인덕턴스를 이용한 마모 입자 센서

전기용량을 이용한 마모입자 센서는 윤활유와 마모입자 사이의 유전율 차이로 인해 전기용량의 차이가 발생한다. 이 방법은 10 μm 정도의 작은 마모 입자를 발견할 수 있지만 자성 과 비자성 입자를 구분할 수 없고 전기용량은 산가(Acid number, AN)이나 점도(viscosity), 수분 함량(water content)에 영향도 받기 때문에 전기용량의 변화로 마모입자의 양을 정확히 측정하는데 어려움이 있다[16-19].

인덕턴스를 이용한 마모입자 센서는 3-D 솔레노이드(solenoid) 센서를 기반으로 하고 자성과 비자성 마모입자를 구분 가능하며 또한 공기나 물에 의한 영향을 배제할 수 있다. 인덕턴스의 변화는 투자율과 와전류(eddy current)에 의해 결정된다. 투자율은 자화 자기장에서 단위 면적당 자력선 또는 자속 밀도를 전선 코일 내에 흐르는 전류에 의해 형성되는 자화 자기장의 세기로 나눈 값을 의미한다. Fig. 9(a)는 마모입자가 자성일 때 와전류는 마모입자에 의해 기존에 자기장과 같은 방향으로 형성되는 반면에 Fig. 9(b)는 마모입자가 비자성일 때 와전류의 방향과 기존 자기장의 방향이 반대인데 이는 전체적으로 자속(magnetic flux)을 줄인다[20-21].

3-D 솔레노이드 구조의 마모입자 센서는 Fig. 10과 같이 측정 영역은 넓으나 날개의 마모입자에 대한 측정에 어려움이 있다. 즉 다수의 작은 마모입자들이 동시에 같은 측정 영역에 있을 때는 하나의 큰 마모입자와 구별이 불가능하다는 단점이 있다. 그래서 평면 형태의 측정 영역을 갖는 planar coil 타입이 측정 영역은 좁으나 3-D

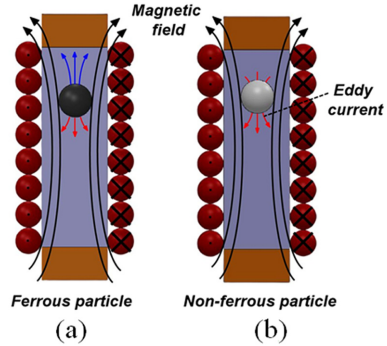


Fig. 9. Sensing mechanism for inductive sensors [14]. (a) ferrous debris (b)non-ferrous debris

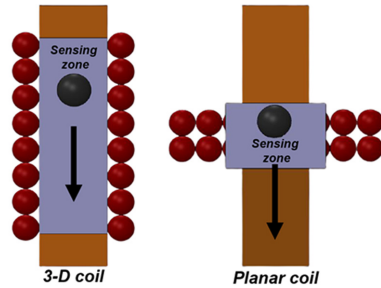


Fig. 10. Comparisons of sensing zone between 3-D coil and planar coil structure [23].

솔레노이드 구조의 단점을 보완하므로 3-D 솔레노이드와 planar coil 타입을 혼합해서 적용하기도 한다[22-25].

2-3-1-3. 음향을 이용한 마모입자 센서

음향을 이용한 마모입자센서는 하나 또는 두개의 초음파 진동자(ultrasonic transducer)를 이용하여 큰 진폭(amplitude)을 가지는 파를 방출하고 유체 내의 마모입자에 의해 발생하는 반사파(echo signal)를 받아 측정한다. 마모입자의 크기는 반사파의 진폭에 근거하여 파악된다. 이 방법의 큰 장점은 고체 입자와 공기 방울을 구별할 수 있다. Fig. 11과 같이 반사파에서 최대 음의 값(maximum negative peak)이 최대 양의 값(maximum positive peak)보다 먼저 발생할 때 이는 공기 방울이며 그 반대는 고체 입자인 경우이다. 이 방법은 마모입자가 초음파의 초점 영역(focal zone)을 지나지 않는 경우 마모입자 크기가 과소 평가될 수 있는 단점이 있다[26-28].

2-3-1-4. 광학(이미지)를 이용한 마모입자 센서

광학을 이용한 마모입자 센서는 오일의 빛 투과(light transmission)를 이용하여 마모입자를 측정한다. 이 방법

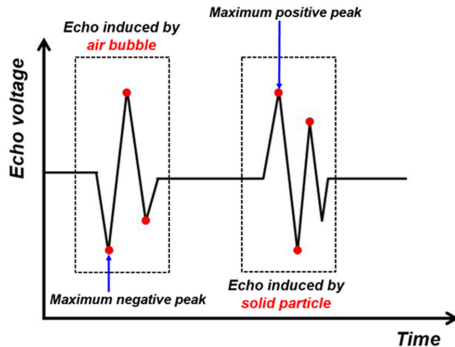


Fig. 11. Sensor response for air bubble and solid debris[28].

은 광원, 유체 채널, 속도 웹 카메라(speed web camera)를 이용하여 마모입자의 크기와 모형을 측정할 수 있다[29]. 이 방법은 다른 방법과 달리 마모입자의 모양을 알 수 있다는 장점은 있지만 윤활유 작동 중에 오염과 열화에 의해 불투명해지므로 측정오차가 발생하며 마모입자를 구별해 내는 고도의 이미지 처리 기술과 고가의 장비가 필요하다[30].

### 2-3-2. 점도 센서 (viscosity sensor)

점도는 윤활시스템에서 충분한 유막두께를 제공하는 데 중요한 물성 값이다. 점도는 산화, 연료의 오염, 첨가제의 소멸 등에 의해 변화된다. 점도를 측정하는 센서에 사용되는 방법은 크게 변위(displacement)[31], 음파(acoustic wave)[32-33], 진동(vibration) [34-35]을 이용하는 것이다. 변위를 이용하는 방법은 강자성 피스톤(ferromagnetic piston)이 위와 아래에 전자기 코일이 설치된 작은 채널에서 움직일 때 걸리는 시간을 이용하여 점도를 측정한다. 음파를 이용한 방법은 압전 소자(piezoelectric material)와 석영 맴브레인(quartz membrane)을 이용하여 공진 주파수의 시프트(resonance frequency shift)를 통해 점도를 측정한다. 진동을 이용하는 방법은 점도에 따라 공진의 주파수나 진폭의 변화를 측정하여 점도를 파악한다.

### 2-3-3. 수트 센서 (soot sensor)

수트는 연소과정에서 발생하는 탄화수소의 불완전 연소로 만들어 지는 입자들이다. 수트의 오염은 점도를 증가시키고 뭉쳐진 수트는 엔진 마모를 증가시키는 원인이 된다. 그리고 국부적으로는 산가를 증가시키고 윤활면에서 오일 고갈(oil starvation)을 야기시킨다[36-37]. 수트의 측정은 윤활유의 전기 전도도(conductivity) 또는 유전율의 변화로 가능하다. 그러나 전기 전도도와 유전

율은 수트에 의해 변화만 하는 것이 아니라 다른 윤활유의 물성 값에 의해 변화하므로 이런 전기화학적인 센서(electrochemical sensor)는 수트 함량을 정확히 평가하기 어렵다. 따라서 윤활유의 유전 성질(dielectric property)과 주파수의 함수인 임피던스(impedance)를 활용하고 다변량 데이터 분석(multivariate data analysis)기술을 이용하여 엔진오일 내에 수트의 함량을 예측한다[38-39].

### 2-3-4. 수분 센서 (water content sensor)

사용환경에서 물의 응축 또는 냉각수의 누설 등에 의해 윤활유가 수분 오염이 된다[40-41]. 수분 오염에 의해 금속 표면에서의 마모를 발생시키거나 산화를 촉진하게 된다. 윤활유 내의 수분의 양은 전기 저항(resistance)이나 전기용량을 이용하는 방법, 광학을 이용하는 방법 등이 있다. 특히 물의 빛 흡수성을 이용한 방법은 150 ppm 정도까지 수분 함량을 측정할 수 있다[42].

### 2-3-5. 산가, 염기가 센서 (acidity, basitiy sensor)

고온, 수분, 공기, 연소에 의한 산성 오염물에 의한 윤활유의 열화는 산화를 야기시키므로 산가(acid number, AN)는 증가한다. 그리고 디젤엔진과 같이 황 함유량은 상대적으로 많은 연료를 사용하는 경우에는 윤활유 내에 염기가(base number, BN)가 감소한다. 즉 윤활유의 산가와 염기에 대한 모니터링함으로써 윤활유의 열화 정도를 파악할 수 있다[43]. 과거에 사용된 pH 센서를 활용하는 것은 윤활유와 같은 탄화수소 환경에서 느린 응답성과 불안정성으로 인해 적합하지 않다. Ruthenium oxide( $\text{RuO}_2$ )의 얇은 박막을 이용한 센서나 CNT를 활용한 산가 센서들이 개발되었다. 하지만 실제 산업 현장에서 적용되고 있는 산가, 염기가 센서는 거의 없다[44-46].

### 2-3-6. 에어레이션 센서 (aeration sensor)

공기는 윤활시스템에서 순환과정에 의해 윤활유 내에 들어가게 된다. 윤활유 내의 공기는 용적 효율을 낮게 하고 산화를 증가시킨다[47]. Fig. 12(a)와 같이 이미지 기술을 이용하여 에어레이션 비율(aeration rate)과 공기방울의 사이즈를 측정한다. 할로겐(halide) 광원과 CCD 카메라를 이용하여 공기방울을 인식하고 에어레이션 비율을 계산할 수 있는 프로그램이 실행된다. 정확도는 높으나 그림의 질(picture quality)에 크게 의존한다. 그 외에도 Fig. 12(b)와 같이 X-ray를 이용하여 측정하는 방법도 있으나 이 방법은 0.5 L 이하의 아주 작은 유량에 적용이 가능하고 물, 수트 같은 다른 오염원에 의해 영향을 받는다[48-49].

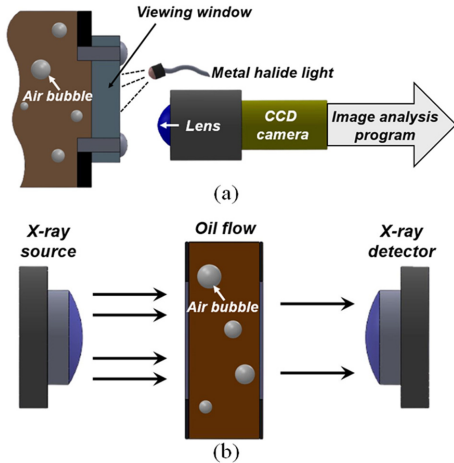


Fig. 12. Aeration sensors[48-49]. (a) image analysis (b) X-ray absorption

2-3-7. 그리스 센서 (grease lubricant sensor)

그리스의 높은 점도 조건과 유동이 균일하지 않으며 사용환경이 가혹한 조건이 많기 때문에 일반적인 액상 윤활유에 적용되는 센서들은 그리스를 사용하는 환경에 적용하기 어렵다[50-52]. 최근에 Schaeffler 에서 그리스의 수분 함량, 마모 입자, 온도, 불투명도(opacity)를 측정 가능한 센서를 개발하였다. Fig. 13과 같이 근적외선 (near-infrared) 광원을 이용하여 그리스에 의해 반사되는 것을 검출기(detector)로 측정하는 방식이다. 이 방법은 비슷한 흡수 특성을 갖는 오염물에 대한 구분이 어렵고 또한 센서의 위치에 민감하다[53-54].

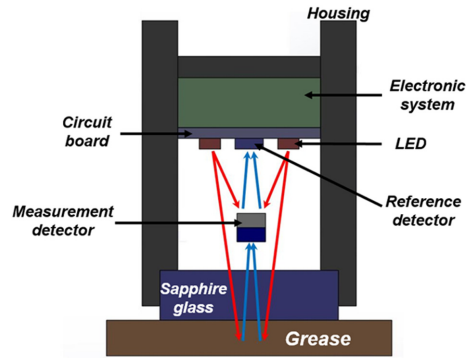


Fig. 13. Grease sensor [53].

2-3-8. 오염도 센서 (contamination sensor)

오염도 센서는 윤활유 내에 마모입자나 다른 이물질이 얼마나 포함되어 있는지를 파악하여 윤활유의 오염도를 평가한다. 이미 폐기된 NAS 1638 또는 주로 사용

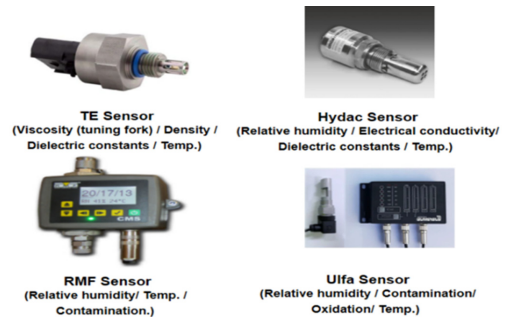


Fig. 14. Integrated oil sensors.

Table 2. Specification of integrated oil sensors

Oil sensor model	IFM LDH 100	RMF Contamination monitoring sensor 2	TE FPS 2800	Hydac HLB 1400	Ulfa Oil-Mon sensor
Working Temp.	-20°C~120°C	-40°C~120°C	-40°C~150°C	-25°C~100°C	-20°C~85°C
Working pressure	Max. 50 bar	Max. 20 bar	Max. 25 bar	Max. 50 bar	Max. 10 bar
Errors	Temp: ±2°C, Relative humidity: ±3%	Temp: ±2°C, Relative humidity: ±3%, Contamination: ±0.5 code for 4, 6, 14 µm	Temp: ±0.1°C, Density: ±1%, Viscosity: ±2%, Dielectric constant: ±1%	Temp: ±3°C, Relative humidity: ±3%, Electrical conductivity: ±5%, Dielectric constant: ±5%	Temp: ±3°C, Relative humidity: ±3%, Contamination: ±0.02 ppm
Measuring items	Temperature, Relative humidity	Temperature, Relative humidity, Contamination	Temperature, Density, Absolute viscosity, Dielectric constant	Temperature, Relative humidity, Electrical conductivity, Dielectric constant	Temperature, Relative humidity, Contamination, Oxidation

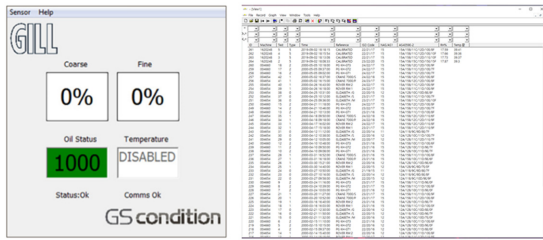


Fig. 15. Monitoring screen of oil sensors.

하는 ISO 4406 등으로 윤활유의 오염 등급을 평가하였다. 이전에는 오일 샘플링을 통해 실험실에서 오염 등급을 측정하였으나 현재는 레이저를 이용하여 오염 등급을 평가하는 센서들이 적용되고 있다. 오염도 센서는 하나의 광원을 사용할 경우 빛의 직진성으로 오염 등급이 과소 평가될 수도 있고 또한 공기 방울 등이 마모 입자와 함께 측정되어 과대 평가되기도 한다.

#### 2-3-9. 통합형 센서 (integrated sensor)

윤활유의 오염과 열화는 어떤 한 종류의 오염원에 의해 변화하기 보다는 복합적인 원인들에 의해 발생한다. 따라서 윤활유나 기계의 상태진단을 위해서는 여러 물성값의 평가가 필요하다. 따라서 단일 항목에 대한 윤활유 센서의 적용보다는 Fig. 14와 같이 여러 항목을 함께 측정 가능한 통합형 센서의 적용이 바람직하다[55-56]. Table 2는 산업계에서 주로 사용되고 있는 통합형 센서들을 정리한 내용이다. MEMS 또는 센서 제작 기술의 발달로 예전보다는 통합형 센서의 신뢰성과 가격 측면에서 개선이 되었지만 아직도 더욱 개선과 발전이 필요하다[57-58].

#### 2-4. 윤활유 센서와 결합된 상태진단 프로그램

윤활유의 각 물리량을 측정하는 윤활유 센서들로부터 얻어진 데이터는 전압, 전류, 전기용량 등이 있지만 이러한 정보들을 이용한 상태진단 프로그램이 없다면 전문지식을 가지고 있지 않은 사용자는 사용한계를 가진다. Fig. 15와 같이 간단한 비율이나 디지털 정보를 제공하는 것 뿐만 아니라 진단 알고리즘이 포함된 진단 프로그램과 신뢰성 있는 센서의 개발이 함께 진행되어야 윤활유 센서를 통한 기계상태진단이 발전할 것이다. 이를 위해서는 각 기계시스템의 윤활유 관리 기준의 설정이 우선이 되어야 한다. 그 관리 기준을 바탕으로 측정에 필요한 적합한 윤활유 센서가 결정되고 또한 측정 데이터를 바탕으로 적합한 진단 알고리즘이 적용되어야만 효과적인 기계상태진단이 가능하다고 판단된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 기존의 기계상태진단 방법에 비해 윤활유 센서를 통한 기계상태진단의 장점과 윤활유 분석 방법에 대해서 소개하였다. 그리고 윤활유 센서를 기반으로 하는 온라인 분석 방법의 장점을 설명하였다. 마모 입자 센서, 점도 센서, 통합형 센서 등 다양한 윤활유 센서에 대해 그 특징과 측정 원리를 정리하였다. 아직도 산가, 염기가 센서의 개발과 통합형 센서의 신뢰성 개선이 필요하다. 또한 윤활유 센서와 결합된 프로그램에서도 각 기계시스템에 적합한 관리 기준을 바탕으로 상태진단을 위한 진단 알고리즘이 포함된 제품의 개발이 진행되어야 한다.

### Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업연구비 (2018 RIC1B5046698)지원으로 이루어 졌음.

### References

- [1] Lee, K. S., Kim, J. W., "A study on strategy of condition based maintenance for rolling stock", Proc. Spring Conf. Korean Society for Railway, Mokpo, Korea, May 2015.
- [2] Yan, R., Gao, R. X., "Complexity as a measure for machine health evaluation", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.53, pp.1327-1334, 2004.
- [3] García, Márquez, F. P., Tobias, A. M., Pinar, Pérez, J.M., Papaelias, M., "Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods", *Renew Energy*, Vol.46, pp.169-178, 2012.
- [4] Kumar, M., Shankar, Mukherjee, P., Mohan, Misra, N., "Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: a review", *Ind. Lubr. Tribol.*, Vol.65, pp.3-11, 2013.
- [5] Hong, S. H., "Literature review of machine condition monitoring with oil sensors-Types of sensors and their functions", Proc. Autumn Conf. Korean Tribol. Soc., Pusan, Korea, October 2019.
- [6] Khan, M. A., Starr, A. G., "Wear debris: basic features and machine health diagnostics", *Insight Non-Destr. Test Cond. Monit.*, Vol.48, pp. 470-476, 2006.
- [7] Younus, A. M. D., Yang, B. S., "Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image", *Expert Syst. Appl.*, Vol.39, pp.2082-2091, 2012.
- [8] Hong, S. H., "Literature review of machine condition monitoring with oil sensors-Application cases",



- Proc. Conf. Korean Tribol. Soc., Daejeon, Korea, September 2020.
- [9] Hong, S. H., Ha, J. M., Seo, M. G., Cho, J. I., Jeon, H. G., Yoo, J. H., "Machine condition monitoring system with ferrous wear debris sensor", Proc. Autumn Conf. Korean Tribol. Soc., Pusan, Korea, October 2019.
- [10] Flanagan, I. M., Jordan, J. R., Whittington, H. W., "Wear-debris detection and analysis techniques for lubricant-based condition monitoring", *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, Vol.21, pp.1011-1016, 1988.
- [11] Du, L., Zhu, X., Han, Y., Zhe, J., "High throughput wear debris detection in lubricants using a resonance frequency division multiplexed sensor", *Tribol. Lett.*, Vol.51, pp.453-460, 2013.
- [12] Cao, W., Dong, G., Chen, W., Wu, J., Xie, Y.B., "Multi sensor information integration for online wear condition monitoring of diesel engines", *Tribol. Int.*, Vol.82, pp.68-77, 2015.
- [13] Shen, M. X., Dong, F., Zhang, Z. X., Meng, X. K., Peng, X. D., "Effect of abrasive size on friction and wear characteristics of nitrile butadiene rubber (NBR) in two-body abrasion", *Tribol. Int.*, Vol.103, pp.1-11, 2016.
- [14] Zhu, X., Zhong, C., Zhe, J., "Lubricating oil condition sensors for online machine health monitoring – A review", *Tribol. Int.*, Vol.109, pp.473-484, 2017.
- [15] Controls, Gill Sensors & Controls. Oil debris sensor, <https://www.gillsc.com/assets/Uploads/GScondition-CD1599-Iss-5.pdf>, Accessed December 16, 2020.
- [16] Murali, S., Xia, X., Jagtiani, A. V., Carletta, J., Zhe, J., "Capacitive Coulter counting: detection of metal wear particles in lubricant using a microfluidic device", *Smart Mater. Struct.*, Vol.18, pp.37001, 2009.
- [17] Wen, Z., Yin, X., Jiang, Z., "Applications of electrostatic sensor for wear debris detecting in the lubricating oil", *J. Inst. Eng. Ser. C.*, Vol.94, pp.281-286, 2013.
- [18] Liu, Y., Liu, Z., Xie, Y., Yao, Z., "Research on an on-line wear condition monitoring system for marine diesel engine", *Tribol. Int.*, Vol.33, pp.829-835, 2000.
- [19] Keller, M. A., Saba, C. S., "Monitoring of ester base lubricants by dielectric constant", *Lubr. Eng.*, Vol.45, pp.347-351, 1989.
- [20] Du, L., Zhe, J., Carletta, J., Veillette, R., Choy, F., "Real-time monitoring of wear debris in lubrication oil using a microfluidic inductive Coulter counting device", *Microfluid Nanofluidics*, Vol.9, pp.1241-1245, 2010.
- [21] Du, L., Zhe, J., Carletta, J. E., Veillette, R. J., "Inductive Coulter counting: detection and differentiation of metal wear particles in lubricant", *Smart Mater. Struct.*, Vol.19, pp.57001, 2010.
- [22] Gastops Long Live Equipment. MetalSCAN MS4000, [http://www.gastops.com/wp-content/uploads/2016/09/C008850\\_001.pdf](http://www.gastops.com/wp-content/uploads/2016/09/C008850_001.pdf), Accessed December 16, 2020.
- [23] Du, L., Zhe, J., "A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring", *Tribol. Int.*, Vol.44, pp.175-179, 2011.
- [24] Du, L., Zhe, J., "Parallel sensing of metallic wear debris in lubricants using under-sampling data processing", *Tribol. Int.*, Vol.53, pp.28-34, 2012.
- [25] Du, L., Zhu, X., Han, Y., Zhao, L., Zhe, J., "Improving sensitivity of an inductive pulse sensor for detection of metallic wear debris in lubricants using parallel LC resonance method" *Meas. Sci. Technol.*, Vol.24, pp.75106, 2013.
- [26] Nemarich, C. P., Whitesel, H. K., Sarkady, A., "On-line wear particle monitoring based on ultrasonic detection and discrimination", *Mater. Eval.*, Vol.50, pp.525-530, 1988.
- [27] Xu, C., Zhang, P., Wang, H., Li, Y., Lv, C., "Ultrasonic echo waveshape features extraction based on QPSO-matching pursuit for online wear debris discrimination", *Mech. Syst. Signal Process*, Vol.60, pp.301-315, 2015.
- [28] Du, L., Zhe, J., "An integrated ultrasonic-inductive pulse sensor for wear debris detection", *Smart Mater. Struct.*, Vol.22, pp.25003, 2013.
- [29] Hamilton, A., Cleary, A., Quail, F., "Development of a novel wear detection system for wind turbine gearboxes", *IEEE Sens. J.*, Vol.14, pp.465-473, 2014.
- [30] Wu, T., Wu, H., Du, Y., Kwok, N., Peng, Z., "Imaged wear debris separation for on-line monitoring using gray level and integrated morphological features", *Wear*, Vol.316, pp.19-29, 2014.
- [31] Markova, L. V., Makarenko, V. M., Semenyuk, M. S., Zozulya, A. P., "On-line monitoring of the viscosity of lubricating oils", *J. Frict. Wear*, Vol.31, pp.433-442, 2010.
- [32] Markova, L. V., Myshkin, N. K., Kong, H., Han, H. G., "On-line acoustic viscometry in oil condition monitoring", *Tribol. Int.*, Vol.44, pp.963-970, 2011.
- [33] Saluja, A., Kalonia, D. S., "Measurement of fluid viscosity at microliter volumes using quartz impedance analysis", *AAPS PharmSciTech*, Vol.5, pp.e47, 2004.
- [34] Salzer, S., Jahns, R., Piorra, A., Teliban, I., Reermann, J., Höft, M., et. al., "Tuning fork for noise suppression in magnetolectric sensors", *Sens. Actuators A Phys.*, Vol.237, pp.91-95, 2016.
- [35] Heinisch, M., Voglhuber-Brunnmaier, T., Reichel, E.K., Dufour, I., Jakoby, B., "Application of resonant steel tuning forks with circular and rectangular cross sections for precise mass density and viscosity measurements", *Sens. Actuators A Phys.*, Vol.226, pp.163-

- 174, 2015.
- [36] Mueller, C. J., Pitz, W. J., Pickett, L. M., Martin, G. C., Siebers, D. L., Westbrook, C. K., "Effects of oxygenates on soot processes in DI diesel engines: experiments and numerical simulations", *SAE Technical Papers*, Vol.1, pp.1791, 2003.
- [37] Laget, O., Malbec, L-M., Kashdan, J., Dronniou, N., Boissard, R., Gastaldi, P., "Experimental and numerical investigations on the mechanisms leading to the accumulation of particulate matter in lubricant oil", *SAE Int. J. Engines*, Vol.9, No.4, pp.2030-2043, 2016.
- [38] George, S., Balla, S., Gautam, M., "Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear", *Wear*, Vol.262, pp.1113-1122, 2007.
- [39] Ulrich, C., Petersson, H., Sundgren, H., Björefors, F., Krantz-Rülcker, C., "Simultaneous estimation of soot and diesel contamination in engine oil using electrochemical impedance spectroscopy", *Sens. Actuators B Chem.*, Vol.127, pp.613-618, 2007.
- [40] Mortier, R. M., Fox, M. F., Orszulik, S. T., "Chemistry and technology of lubricants, 3rd ed.", *London: Springer*, 2010.
- [41] Holzki, M., Fouckhardt, H., Klotzbücher, T., "Evanescent-fieldfiber sensor for the water content in lubricating oils with sensitivity increase by dielectrophoresis", *Sens. Actuators A Phys.*, Vol.184, pp.93-97, 2012.
- [42] Holzki, M., Fouckhardt, H., Klotzbücher, T., "Evanescent-fieldfiber sensor for the water content in lubricating oils with sensitivity increase by dielectrophoresis", *Sens. Actuators A Phys.*, Vol.184, pp.93-97, 2012.
- [43] Smiechowski, M.F., Lvovich, V.F., "Iridium oxide sensors for acidity and basicity detection in industrial lubricants", *Sens. Actuators B Chem.*, Vol.96, pp.261-267, 2003.
- [44] Soleimani, M., Sophocleous, M., Wang, L., Atkinson, J., Hosier, I. L., Vaughan, A. S., et. al., "Base oil oxidation detection using novel chemical sensors and impedance spectroscopy measurements", *Sens. Actuators B chem.*, Vol.199, pp.247-258, 2014.
- [45] Soleimani, M., Sophocleous, M., Glanc, M., Atkinson, J., Wang, L., Wood, R. J. K., et. al., "Engine oil acidity detection using solid state ion selective electrodes", *Tribol. Int.*, Vol.65, pp.48-56, 2013.
- [46] Moon, S-I., Paek, K-K., Lee, Y-H., Kim, J-K., Kim, S-W., Ju, B-K., "Multiwall carbon nanotube sensor for monitoring engine oil degradation", *Electrochem Solid-State Lett.*, Vol.9, pp.H78, 2006.
- [47] Ippoliti, L., Steimes, J., Hendrick, P., "Investigation on an oil aeration measurement technique for the study of pump performance in an aircraft engine lubrication system", ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, Quebec, Canada, August 2015.
- [48] Kimura, Y., Kato, N., Kataoka, T., Takahashi, K., Kikuchi, T., "Bubble behavior in engine lubricant", *Int. J. Automot. Eng.*, Vol.2, pp.149-153, 2011.
- [49] Delta Services Industrials. Lubricant aeration, <http://www.deltabeam.net/en/product/lubricant-aeration>, Accessed December 16, 2020.
- [50] Tandon, N., Ramakrishna, K. M., Yadava, G.S., "Condition monitoring of electric motor ball bearings for the detection of grease contaminants", *Tribol. Int.*, Vol.40, pp.29-36, 2007.
- [51] Zhao, M., Lin, J., Xu, X., Li, X., "Multi-fault detection of rolling element bearings under harsh working condition using imf-based adaptive envelope order analysis", *Sensors*, Vol.14, pp.20320-20346, 2014.
- [52] He, Y., Zhao, Z., Luo, T., Lu, X., Luo, J., "Failure analysis of journal bearing used in turboset of a power plant", *Mater. Des.*, Vol.52, pp923-931, 2013.
- [53] Industrial Technology, "Online condition monitoring of grease in rolling bearings", <http://www.industrial-technology.co.uk/products-online-condition-monitoring-of-grease-in-rolling-bearings.html>, Accessed December 16, 2020.
- [54] Aranzabe, A., Aranzabe, E., Marcaide, A., Ferret, R., Terradillos, J., Ameye, J., et. al., "Comparing different analytical techniques to monitor lubricating grease degradation", *NLGI Spokesm.*, Vol.70, pp17-30, 2006.
- [55] Wu, T., Wu, H., Du, Y., Peng, Z., "Progress and trend of sensor technology for on-line oil monitoring", *Sci. China Technol. Sci.*, Vol.56, pp.2914-2926, 2013.
- [56] Preethichandra, D. M. G., Shida, K., "Actual condition monitoring of engine oil through an intelligent multi-functional sensing approach", Proceedings of the 26th annual conference of the IEEE industrial electronics society, 2000. IECON: 2000, pp.2383-2387.
- [57] Duchowski, J. K., Mannebach, H., "A novel approach to predictive maintenance: a portable, multi-component MEMS sensor for on-line monitoring of fluid condition in hydraulic and lubricating systems", *Tribol. Trans.*, Vol.49, pp.545-553, 2006.
- [58] Zhu, X., Du, L., Liu, B., Zhe, J., "A microsensor array for quantification of lubricant contaminants using a back propagation artificial neural network", *J. Micromech. Microeng.*, Vol.26, pp.65005, 2016.