

기계 상태진단을 위한 인-라인형 오일 모니터링 스마트 센서

공호성[†] · 오씨아 빅터 · 한홍구 · 류보브 마르코바*

한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터, *MPRI 고멜 백러시아

In-line Smart Oil Sensor for Machine Condition Monitoring

H. Kong[†], C.V. Ossia, H.G. Han, and L. Markova*

Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

*V. A. Belyi Metal - Polymer Research Institute of Belarus National Academy of Science,
32A Kirov street, Gomel 246050, Belarus

Abstract – An integrated in-line oil monitoring detector assigned for continuous in situ monitoring multiple parameters of oil performance for predicting economically optimal oil change intervals and equipment condition control is presented in this study. The detector estimates oil deterioration based on the information about chemical degradation, total contamination, water content of oil and oil temperature. The oil oxidation is estimated by “chromatic ratio”, total contamination is measured by the changes in optical intensity of oil in three optical wavebands (“Red”, “Green” and “Blue”) and water content is evaluated as Relative Saturation of oil by water. The detector is able to monitor oils with low light absorption (hydraulic, transformer, turbine, compressor and etc. oils) as well as oils with rather high light absorption in visible waveband (diesel and etc. oils). In a case study that the detector is applied to a diesel engine oil, it is found that the detector provides good results on oil chemical degradation as well as soot concentration.

Key words – smart sensor, oil deterioration, machine condition monitoring, diesel engine oil

1. 서 론

점차적으로 높아져가는 친환경 관심과 함께 에너지 저감을 위한 기계 시스템 가동효율을 증대하고자 하는 추세에 부응하기 위하여 산업체 기계설비 관리자들은 오일의 수명을 연장하고 부품 수명을 향상시키기 위한 기계상태 모니터링에 관한 작업 및 관리업무에 보다 많은 노력을 경주하고 있으며, 상기의 목표를 달성하기 위한 수단으로서 새롭고 보다 효과적인 상태진단 측정 기기들을 활용하고자 함에 많은 관심을 가지고 있다.

현재 기계 상태진단을 위하여 기계 구조물의 진동소음의 측정, 열화상 측정, 윤활유 분석 등 다양한 종류의 비파괴 측정방법들이 사용되고 있다. 상기 기술들 중 윤활유 매체를 분석하는 방법의 장점은 다른 상태

진단 방법들에 비하여, 기계류 유회에 사용되는 오일은 기계가 사용됨에 따라서 발생하는 다양한 변화 및 이력들을 그 내부에 모두 포괄적으로 담고 있다는 점이다. 기계의 동특성을 측정하는 방법들의 경우에는 접촉면에서의 일련의 이벤트가 진행되는 바로 그 순간을 놓치면 그 현상을 올바르게 평가하기 어려우나, 오일은 기계접촉면에서 그동안 발생한 많은 이벤트 이력들을 모두 누적하여 함유하고 있기 때문에, 측정 타이밍과 크게 상관없이 기계 상태변화 특성을 직간접적으로 평가할 수 있기 때문이다[1].

한편 기계시스템 가동조건이 극심해 짐에 따라서 기계요소 접촉 경계면을 지지하고 있는 오일 조성도 과거에 비하여 날로 복잡해지고 있으며, 다양하고 새로운 화학첨가제 패키지들이 사용되고 있는 실정이다. 이에 따라 오일 모니터링 측면에서 점차적으로 보다 많은 수의 실험실적 분석과정에 의하여 소요되는 시간이 증가

[†]주저자 · 책임저자 : hkong@kist.re.kr

할 뿐 아니라 종합적인 데이터 해석을 점점 복잡하게 만들고 있다. 따라서 기계시스템 윤활라인의 적재적소에 측정센서들을 직접 설치하여 측정결과를 실시간으로 얻을 수 있는 오일 모니터링 측정/분석기기의 필요성이 매우 높은 실정이다. 인-라인 측정에 의하여 대상이 되는 오일물성에 대한 가장 생생한 정보를 바로 얻을 수 있으며, 상기 결과에 의하여 기계 가동자가 대상 오일을 계속적으로 사용가능한 지 여부를 판정함에 있어서 가장 좋은 선택의 근거를 제공할 수 있다.

일반적으로 오일의 상태를 실험실적으로 판정하는 작업은 주로 대어섯 종류의 물리/화학적 분석방법들을 수행하여 이루어지고 있다. 대표적 사항으로, (1) 입자계수기(particle count), (2) 수분함량, (3) 점도, (4) 첨가제 함량 및 (5) 산가 혹은 알카리가 들을 들 수 있다. 그러나 이와 같은 측정/분석을 행하는 장비들이 대부분 고가의 실험실적 장비이거나, 화학적으로 습식 분석을 행하기 때문에 현장에서 직접 적용하기가 현실적으로 불가능한 어려움이 있다. 따라서 상기와 같은 표준 실험실적 평가기기를 대체할 수 있는 인-라인형 디지털 센서를 개발하고자 하는 노력들이 최근 들어 많은 연구 개발자들에 의하여 활발하게 이루어지고 있다[2-6].

본 논문에서는 상기의 오일 모니터링과 관련된 여러 측정센서 기술들에 관하여 종합적인 관점에서 간단하게 소개하고자 한다. 둘째 본 논문의 연구자들에 의하여 오일 모니터링 목적으로 개발된 통합형 오일 모니터링 스마트 센서의 구성 예를 소개하고, 작동원리를 설명하고자 한다. 마지막으로 본 연구진에 의하여 개발되고 있는 센서중의 하나를 디젤상용차에 적용하여 얻어진 예비 시험결과를 통하여 현재 개발된 센서가 실험실적 분석방법으로 사용되고 있는 수트 함량 및 산가 측정결과와 좋은 상관관계가 나타났음을 예시하고자 한다.

2. 오일 모니터링 센서

2-1. 점도 센서

오일의 점도는 유체의 흐름에 저항함의 측정값으로서 상대 접촉운동을 하는 두 물체 사이의 하중을 지지하는 능력을 대변하는 매우 중요한 물성이다. 산업용 오일에서 점도의 증가는 산화, 먼지 또는 수분 혹은 높은 등급의 점도를 갖는 유체가 시스템에 오염되었음을 의미한다. 산업용 오일의 점도가 사용 중에 감소하

Table 1. Viscometers in the market

Company Name	Technology/Method						Measurement Output		
	Acoustic	Rotational	Electro-magnetic	Falling ball	Vibrational	Torsional	Other	Absolute viscosity	Kinematic viscosity
BiODE, Inc.		O						O	
Brookfield Engineering Laboratories, Inc.			O					O	
Cambridge Viscosity, Inc.				O				O	O
Duratech, Inc.					O			O	
Galvanic Applied Sciences USA, Inc.						O			O
Mansco Products, Inc.							O		
Norcross Corporation								O	O
PAD Peripheral Advanced Design Inc.					O			O	
Razaghi Meyer International		O						O	O
Sofraser SA								O	O
Symyx Technologies, Inc.						O	O	O	
TD Collaborative LLC								O	
Vindum Engineering, Inc.								O	

는 경우는 흔치 않으나, 만약에 상기의 현상이 발생한다면 이는 솔벤트 성분이나 점도가 낮은 오일이 혼입되었음을 의미한다. 엔진유의 경우는 연료의 혼입에 의하여 점도의 두드러진 감소가 야기될 수 있다. 일반적으로 대상 윤활유의 점도가 정상적인 등급에 비하여 10% 이상이하로 변하면, 통상적으로 윤활유 공급자는 오일을 교환하도록 하고 있으므로, 이를 기준으로 윤활유의 점도 변화를 정량적으로 측정하고 관리하고 있다[7].

점도의 크기는 오일이 중력을 받아 일정한 크기의 모세관을 통과하는데 소요되는 시간을 기준으로 하는 동점도(kinematic viscosity) 측정방법(ASTM D445)이 과거에는 일반적으로 사용되었던 반면에, 최근 들어서는 상용화된 대다수의 점도측정 기기에서는 절대점도(absolute viscosity)를 기준으로 측정하고 있음을 볼 수 있다(Table 1 참조). 절대점도는 펌프나 가압 공기 등과 같이 외부로부터 오일에 힘을 주었을 때 오일이 흐름에 저항하는 값(ASTM D4624)에 의해서, 혹은 오일 내에서 모터로 스펀들을 구동했을 때 유체를 통하여 발생하는 힘의 크기(예; Brookfield rotary method, ASTM D2983)를 기준으로 측정된다.

절대점도를 측정하는 센서는 상기 방법 이외에도 진동소자를 이용하는 방법[8], 초음파를 이용하는 방법[9] 등 다양한 방법들이 등장하고 있으며, 산업현장에서의 인-라인 적용을 위한 소형화 센서들도 점차적으로 등장하고 있는 추세이다. 그러나 점도지수 향상제 등과 같이 다양한 첨가제의 영향에 의하여 오일이 Non-Newtonian 유동특성을 지니는 경우에는 소형 센서들에 의하여 측정된 점도값이 부정확할 수도 있음은 유의할 사항이다.

2-2. 수분 센서

오일 내에 수분이 존재하면 이들에 의하여 부식이 촉진되고 베어링, 기어 및 유압작동 부품들 사이의 마모를 증가시킬 수 있다. 수분가를 측정하기 위한 방법들로는 간단하게 가라앉히는 방법과 Hot Plate를 사용하는 간단한 방법(오일 한 방울을 Hot Plate 위에 떨어뜨려서 탁탁 튀기는 소리가 나면 일반적으로 0.05% 또는 500 ppm 이상의 수분 함량을 의미함)과 칼-피셔 적정 방법 및 퓨리에 변환 적외선 분광(FT-IR) 측정방법들이 있다. 흔히 정확한 측정을 요구하지 않을 경우에는 오일 시료를 투명한 플라스크 내에 넣고 뿌연 정도를 본다거나 가라앉히거나 하여 검출할 수도 있다.

통상적으로 수분함량이 0.2% 보다 큰 경우에는 이에 대한 대책이 강구되어야 하나, 폴리글리콜계 오일에서는 2% 이상의 수분도 허용될 수 있다[7]. 심한 응력을 받는 구름요소 베어링의 경우는 0.01% 정도의 수분 오염에 의하여도 수명이 정상 값의 반으로 감소할 수 있다고 알려져 있다[10].

오일 내의 수분함량은 FT-IR 분석방법이 오일 내 수분함량을 측정하는 실험실적 방법으로 많이 사용되나, 측정 정밀도가 낮아서 1000 ppm 이하의 수분함량은 측정하기 곤란한 문제점이 있다고 보고되고 있다[7]. 또한, 오일 내 수분함량을 실험실적으로 분석하는 방법들의 공통적인 문제점은 오일 샘플링 및 분석에 시간이 많이 걸리고 산업현장 내의 사용 환경 조건 하에서의 오일 상태를 실험실에서 신뢰성 있게 평가하기 어렵다는 것이다. 따라서 최근에는 현장 인-라인 적용을 할 수 있는 측정센서들을 선호하고 있는 추세이다.

오일 내 수분함량의 정량적인 측정은 다음과 같은 방법으로 측정된다. 첫 번째로, 오일 속에 존재하는 수분의 함량을 질량비 형태의 질량농도(mass concentration, ppm)로 표시한다. 대표적인 것으로 화학 적정(titration)을 이용하는 칼 피셔(Karl Fisher)의 수분측정방법이 있으며, 이 방법에 의하여 10 ppm 정도의 낮은 수분함량도 측정되는 것으로 알려져 있다. 또한, 현장에서 간편하게 수분함량을 측정하는 방법으로 하이드라이드칼슘 테스트 키트(calcium hydride test kit)가 이용되기도 하는데, 이 방법은 오일 내에 자유 수분이 존재하면 측정셀 내의 압력의 변화가 발생함을 측정함으로써 수분함량을 50 ppm 수준 정도까지 측정할 수 있다. 두 번째는 오일 내 수분의 상대 포화도(relative saturation)를 측정하는 것이다[11]. 상대 포화도는 주어진 온도 하에서 오일에 최대 포화될 수 있는 수분함량에 대해 실제적으로 샘플 오일 속에 존재하는 수분량을 상대적으로 퍼센트로 나타낸 것이다. 오일 속에 수분함량이 일정하다 하더라도 온도 변화에 따라서 수분이 용해되고 분리되는 특성이 달라지므로, 이 측정방법이 수분 침투에 의한 위험성을 경고함에 있어 보다 효과적일 수 있다. 세 번째는 오일 내 수분의 함량을 0에서 1사이의 수분 활성도(water activity, a.w.)로 나타내는 것이다[12]. 수분 활성도가 0인 것은 오일 내에 수분이 전혀 없음을 의미하고, 1인 것은 수분이 포화되어 있는 상태를 의미한다. 따라서, 수분 활성도가 0.9 정도에 다다르면 오일의 온도가 감소할 시에 오일 내에 용해되어 있던 수분들이 자유 수분으로 분

리될 수 있는 위험성이 있는 것으로 해석된다.

2-3. 물리/화학특성 분석방법

2-3-1. FT-IR method

사용유 내에 존재하는 유기계 오염물 및 수분 그리고 오일 열화 생성물들을 검출하기 위한 분광분석 기법으로서, 유허유의 화학적 구조를 평가하고 화학적 오염원의 존재와 첨가제 고갈을 평가하는 분석방법이다. FT-IR 분석이 상기 측정방법을 위하여 사용되는데, 통상적으로 검출되는 화합물로는 수분과 에틸렌-글리콜과 같은 블로.바이 생성물, 타지 않은 연료 및 냉매용 가스 등이 있다. 첨가제가 고갈되는 정도에 의하여 대상 오일의 청정성 및 분산성, 알카리도, 내마모성 변화를 알 수 있듯이, 유허유가 산화, 탄화 및 황화되어 열화되는 것을 직/간접적으로 분석할 수 있다.

2-3-2. 절연상수(dielectric property, emissivity)

오일의 물성 및 전기화학적 특성들은 오일의 사용 중에 변할 수 있으므로 이 변화를 감지하고 이들이 유허유 능력에 미치는 영향을 아는 것이 중요한 사항이며, 상기 변화값을 정량적으로 측정하는 센서들[5,6]이 사용되고 있다. 절연도의 측정은 대상 오일의 절연도에 오염이 미치는 총 효과를 측정하여 나타내기 때문에, 상기 방법은 비교 시험으로서 유사한 종류의 신유 샘플에 대한 보정을 필요로 한다. 다만 상기 시험은 산화 및 수분, 산화도 변화 요인 이외에도, 금속 입자 및 연료의 혼입, 또는 먼지, 슈트 및 슬러지 등에 의한 오염에 의해서도 민감하게 반응할 수 있어서 분석 결과를 해석함에 각별한 주의를 요하는 문제가 있다.

2-3-3. 전산가(TAN)/전알카리가(TBN)

유허유의 산가는 전통적으로 산을 중화하는데 필요로 하는 수산화칼륨의 양으로 표시하며 오일 1그램당 KOH 밀리그램으로 표현한다. 오일의 전산가(TAN)가 갑작스럽게 증가하는 것은 비정상적인 작동 상황(예로 과열)을 나타내기 때문에, 유허유 공급자들은 전산가 사용 한계를 제시하는데, 원래 값의 두 배 정도가 통상적으로 허용되는 수준이다. 유압작동유 및 기어유는 대상 유허유가 산화됨을 평가하는 것으로 전산가를 시험할 수 있다. 반면에 디젤엔진 오일은 연료의 황 함량이 대상 오일의 열화를 유도하여 궁극적으로 부품의 부식을 초래함으로써 전알카리가(TBN)를 시험할 수 있다. TBN이 보통 정상 값의 50% 정도로 고갈되게 되면 상기 오일을 교환함이 요구된다[7]. 상기 방법의 다른 접근 방법으로는 오일의 페아(pH) 값을 측정할 수

있으나 사용유에 이 방법을 적용하는 것은 제한적인 값을 가질 수 있다. 왜냐하면 이 값이 대상 오일이 얼마나 부식적인가를 직접적으로 측정하는 것도 아니며 측정값들이 오일의 기본적인 물성에 좌우되기 때문이다.

2-3-4. 오염도/마모입자 분석

오일을 오염시키는 요인은 유허시스템 외부로부터 먼지들이 혼입되는 외부적 요인과 기계 시스템 내부 접촉면에서 기계체료가 파손되어 마모가 발생하여 내부적 요인으로 나뉠 수 있다. 이와 같이 오일 속에 존재하는 오염물들은 기계 접촉하중을 지지하는 유허막에서 하중지지 능력이 현저하게 떨어지는 요인이 됨과 아울러 특히 기계 요소간 간극이 매우 적은 정밀부품의 운동을 방해하는 직접적인 요인으로 작용할 수 있으므로 이를 허용수준 이하로 청결하게 유지함이 필수적이라 할 수 있다. 오일의 오염도를 평가하는 가장 간단한 방법은 오일 필터에 여과되어 있는 물질을 수동적으로 체크하는 방법을 사용할 수 있으나, 정량적으로 오염도를 평가하기 용이하지 않으며 오염입자들이 서로 엉켜있는 형태라서 이들 오염입자들을 개별적으로 상세 관찰하기 용이하지 않은 단점이 있다.

1970년대말 미국에서 개발된 Ferrography 분석방법은 이와 같은 단점을 극복하여 오일 내에 오염된 입자들을 효과적으로 분석할 수 있는 기반을 제공한 바 있는데, 상기 기술의 등장 이후로 현재까지 오일의 오염도를 정량/정성적으로 분석할 수 있는 다양한 측정센서들이 시장에 등장하고 있다. Ferrography 분석방법은 오일 속에 미세한 크기의 입자로서 존재하는 마모입자들을 개별적으로 분리하여 정성적으로 분석할 수 있는 기술인데, 입자들의 다양한 기하학적 특징들과 칼라 등을 종합적으로 판독하여 상기 입자들이 발생하게 된 고유한 마모생성기구(Governing Wear Mechanism)을 판단하게 함으로써, 상태진단 기술자가 상기 마모가 발생하는 근본적인 Root Causes를 제거하는 효과적인 방법을 선택하게 하는 근거를 제공하는 점에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다.

최근 들어서는 입자계수기(Particle Counter)와 같이 다양하게 오일 시료의 오염도를 정량적으로 측정하는 센서들을 사용하여 NAS, ISO 등급을 정량적으로 평가하는 방법이 산업계 현장에서 폭 넓게 활용되고 있으며, 산업현장 인-라인 적용을 위한 소형 입자계수기 측정센서[13]도 등장하고 있다.

2-3-5. SOAP

Spectroscopic Oil Analysis Program (SOAP) 방법

은 미국 공군에서부터 채택되어 오늘날까지 여러 산업계에서 기계상태진단 장비로 사용하고 있는 오일 정량 분석방법으로서, 상기 기술의 가장 첫 번째 장점은 오일 내에 부유하고 있는 미세입자들을 정성적 및 정량적으로 분석할 수 있다는 점이다. 따라서 SOAP 분석을 하면, 오일이 순환되는 기계요소의 어느 재료 부위에서 마모가 발생하고 있고 얼마나 많이 발생하고 있는지 파악할 수 있다. 그러나 상기 기기의 이와 같은 우수한 분석능력에서의 장점과 아울러 단점으로 거론되는 점들로는 상기 분석기기가 경제적으로 고가의 기기라서 오일 모니터링을 요하는 모든 기계류에 적용할 수 없으며, 적당한 시간대를 부여하여 주기적인 오일 샘플링을 함이 요구되는데, 이에 따라서 오일 샘플링 작업과 관련된 human error가 발생하게 되고 아울러 샘플링 주기 이내에 발생하는 대상기계의 파손을 조기에 발견할 수 없는 문제점이 발생하게 되는 문제점을 지니고 있다. 또한 SOAP 분석방법에서의 또 다른 기술적인 문제점으로는, SOAP 측정방법이 오일 내의 입자들을 아크 및 플라즈마 에너지로서 바로 태워서 이때 발생하는 방출광의 주파수를 분석하므로 불가피하게 오일 내부에 존재하는 각종 오일첨가제 영향을 크게 받는다는 점을 들 수 있다[14]. 특히 이와 같은 점은 각종 오일첨가제들이 과거에 비하여 많이 사용하게 되면서 SOAP 측정결과를 해석하고 대책을 수립함에 있어서 종종 어려움을 야기하는 것으로 알려져 있어서 상기 측정결과와의 분석 시에 유의해야 할 점이다.

3. 인-라인형 오일 모니터링 스마트 센서

3-1. 스마트 센서의 개념

‘똑똑하다’ 또는 ‘현명하다’라는 의미의 영어단어 ‘스마트’는 주로 지능화된 장비 또는 로봇 등에 사용되어 왔으나, 최근 반도체 IC 기술이 보편화되고 마이크로 센서기술이 발전되면서 타분야 측정센서 분야에도 광범위하게 사용되고 있다. 일반적으로 스마트 센서는 마이크로 센서기술에 반도체 VLSI 기술을 결합시킨 것으로 컴퓨터가 갖는 우수한 데이터 처리 능력, 판단기능, 메모리기능, 통신기능 등을 갖기 때문에 종래의 센서에는 볼 수 없는 많은 장점을 갖는다. 따라서 스마트 센서는 물리적 또는 화학적 현상을 전기신호로 변환하는 센서의 단순 기능 이외에 논리제어기능, 통신기능, 판단기능을 가져야 한다[15]. 논리제어기능은 센서신호의 디지털화 및 보정/보상을 하고 동작제어를 말

하며, 통신기능은 주로 표준화된 디지털통신 프로토콜을 이용하여 센서신호를 외부에 전달하고 제어신호를 받는 것이다. 판단기능은 제어기능과 더불어 센서의 최적화 및 자기진단, 전원관리 등을 일컬으며 더 나아가 센서에서 얻은 데이터의 의미까지 파악할 수 있는 수준까지 나아 갈 것으로 예측된다.

3-2. 인-라인형 오일 모니터링 스마트 센서의 개발

실시간으로 기계의 상태를 측정하고 분석하여 기계의 고장발생 여부 및 잔여 수명을 예측함에 있어서 다양한 센서로부터 가능한 많은 정보를 수집하여 상태진단의 신뢰성을 높이는 것은 매우 중요한 사항이다. 따라서 오일 모니터링의 경우에도 오일 시료의 물리/화학적 상태변화, 그 오염도 및 수분 함량을 실시간 및 통합적으로 평가할 수 있음과 동시에 이러한 통합형 오일 모니터링 시스템이 기계의 오일 순환 라인 내에 직접 구축될 수 있다면 산업현장에서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이 틀림없을 것이며, 현재 전세계적으로 이러한 방향으로 연구개발 노력이 집중되고 있다.

본 장에서는 상기 목적과 관련하여 본 저자들에 의하여 현재 진행되고 있는 인-라인형 오일 모니터링 스마트 센서의 주요 사항들과 실제 적용 예를 예시하고자 하며, 이를 통하여 향후 기계상태진단을 위한 유용한 툴로서의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

3-2-1. 센서의 구성

본 연구에서 보이는 통합형 오일 모니터링 센서는 오일의 성능과 관련되는 주요 파라미터인 오일의 화학적 열화, 오염도, 물의 오일에 대한 상대포화도 및 오일의 온도를 하나의 검출장치를 사용해 현장에서 모니터링 할 수 있는 통합형 인-라인 오일 모니터링 장치 [16]이다.

Fig. 1은 상기 오일 모니터링 장치의 개략적인 구성을 도시하는 블록도이다. 오일 모니터링 장치(10)는 총 4개의 파라미터(화학적 열화, 오염도, 수분함량 및 온도)들을 측정 및 연산하여 오일의 상태를 분석하는 모듈(100)과 오일의 열화와 물성을 검출하는 프로브(200, 300, 400)를 포함한다. 오일 모니터링 장치는 오일을 사용하는 장비(유압시스템, 변압기, 터빈, 압축기, 가솔린엔진, 디젤엔진 등)에 직접 설치되어 오일을 모니터링 하며, 상기 오일로는 유압유, 변압기유, 터빈유, 압축기유, 엔진오일, 각종 윤활유 등을 포함한다. 측정 프로브는 오일이 사용되는 장비에 구비되고 오일을 수용하는 오일 탱크(21)의 외벽에 장착된다. 상기 프로브

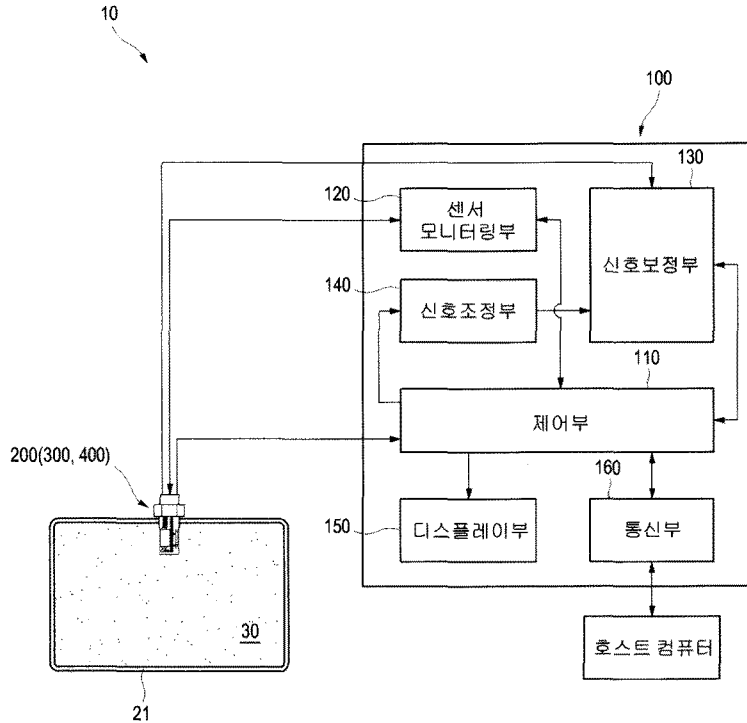


Fig. 1. A block diagram of an in-line oil monitoring smart sensor.

에는 오일의 상태를 검출하여 신호를 출력하는 측정 센서가 내장되어 있다. 센서에서 출력된 신호는 분석모듈(100)로 전송되어 처리되며, 분석모듈은 센서들로부터의 출력신호에 근거하여 오일의 열화 및 장비의 작동에 영향을 줄 수 있는 오일의 물성 변화를 실시간으로 모니터링 한다. Fig. 1에는 측정센서 프로브가 오일 탱크에 장착되는 것으로 도시되어 있지만, 센서를 분석될 오일이 사용되는 장비의 오일 순환 라인, 오일 순환 파이프 등에 설치될 수 있다.

Fig. 2는 상기 오일 모니터링 장치에 구비되는 측정 센서 프로브의 모습을 도시한다. 측정센서(200)는 센서들이 설치되는 하우징(210)과, 오일의 화학적 열화 및 총오염을 측정하기 위한 제1 센서(220)와, 오일의 수분함량을 측정하기 위한 제2 센서(230)와, 오일의 온도를 측정하기 위한 제3 센서(240)를 포함한다. 본 오일 모니터링 장치에 의하여 측정된 총 4개의 측정 파라미터로부터의 데이터는 프로브의 각 센서들에 의해 분석모듈로 출력된다. 분석모듈은 센서들로부터 출력된 신호에 근거하여 상기 4개의 파라미터를 연산하고 모니터링하여 사용자에게 오일의 현재 상태를 실시간으로 알려주며, 나아가 기 설정된 한계치와 비교함으

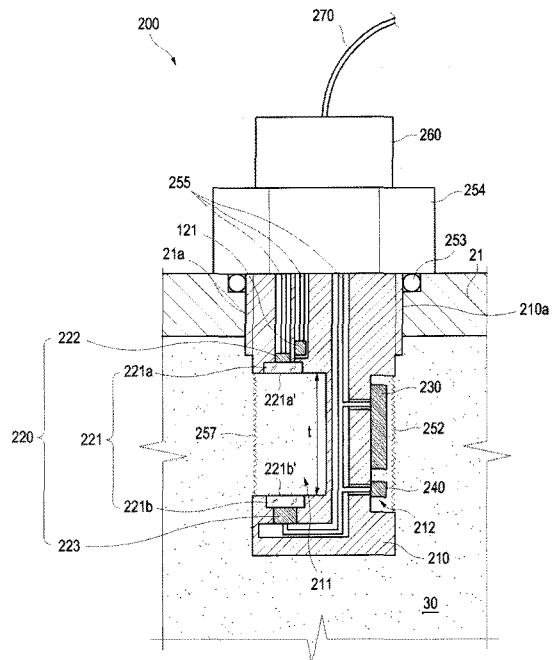


Fig. 2. Schematic view of an in-line oil monitoring smart sensor[referred to from ref. 16].

로써 오일의 최적 교환 시기를 알려주고 오일이 사용되는 장비의 작동 상태를 알려준다.

구체적으로 본 측정센서에서의 제1 파라미터는 오일 시료의 색채비(chromatic ratio; CR)로서 오일을 통과한 광의 적색 파장범위에서의 광학강도 대 오일을 통과한 광의 녹색 파장범위에서의 광학강도의 비율을 의미한다. 색채비는 수식 (1)과 같이 색상감지수단의 적색 파장범위에서의 출력(U_R)과 녹색 파장범위에서의 출력(U_G)을 이용하여 결정된다.

$$CR = \frac{U_R}{U_G} \quad (1)$$

이러한 색채비 파라미터는 오일의 사용 시간이 경과할수록 높아지는 것으로 이미 연구된 바 있다[17-19]. 즉, 오일의 화학적 열화가 진행되면서, 오일을 통과한 광의 적색 파장 범위의 광학강도가 녹색 파장 범위의 광학강도보다 커지면서, 이들에 대한 색상감지수단의 적색 파장 범위에서의 출력(U_R)이 녹색 파장 범위에서의 출력(U_G)보다 커지게 된다.

센서의 제2 파라미터는 총오염지수(total contamination index; TCI)로 정의된다. 오일의 총오염지수는 사용유(used oil) 내의 산화 및 산화생성물, 오염 먼지, 마모입자, 기포 등의 함량에 관련하여 나타나는 광학강도에서의 감소 변화를 신유와 비교함으로써 평가된다. 상기의 총오염지수(TCI)는 기본적으로 다음 수식 (2)에서와 같이 3개의 파장범위에서의 광학강도의 변화(적색(ΔD_R), 녹색(ΔD_G), 청색(ΔD_B))로서 각각 평가한다[16].

$$\begin{aligned} TCI_R &= \Delta D_R = D_{R,used} - D_{R,fresh} = \ln \frac{U_{R,fresh}}{U_{R,used}} \\ TCI_G &= \Delta D_G = D_{G,used} - D_{G,fresh} = \ln \frac{U_{G,fresh}}{U_{G,used}} \\ TCI_B &= \Delta D_B = D_{B,used} - D_{B,fresh} = \ln \frac{U_{B,fresh}}{U_{B,used}} \end{aligned} \quad (2)$$

상기 수식에서, $D_{R,fresh}$, $D_{G,fresh}$, $D_{B,fresh}$ 는 적색, 녹색 및 청색 파장범위에서 신유의 광학강도, $D_{R,used}$, $D_{G,used}$, $D_{B,used}$ 는 적색, 녹색 및 청색 파장범위에서 사용유의 광학강도, $U_{R,fresh}$, $U_{G,fresh}$, $U_{B,fresh}$ 는 적색, 녹색 및 청색 파장범위의 신유 시험에서의 출력신호, $U_{R,used}$, $U_{G,used}$, $U_{B,used}$ 는 적색, 녹색 및 청색 파장범위의 사용유 시험에서의 출력신호들이다.

프로브의 하우징에 장착되는 제2 센서(230)는 오일의 상대습도(물의 오일에 대한 상대포화도)를 측정할

수 있는 습도센서이다. 또한 프로브에 설치되는 제3 센서(240)는 오일의 온도를 측정할 수 있는 제3 센서(240)로서, 측정된 온도에 정비례하여 선형적인 전압이 발생하는 컨버터 형식의 온도센서가 사용되었다.

Fig. 1 및 3을 참조하여, 분석모듈(100)에 대해 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 분석모듈은 제어부(110), 센서 모니터링부(120), 신호보정부(130), 신호조정부(140), 디스플레이부(150) 및 통신부(160)를 포함한다. 오일 모니터링 장치의 일반적 작동 제어는 제어부에 의해 실행된다. 제어부는 프로세서(111), 메모리(112), ADC(113), DAC(114) 및 프로그램 가능한 게인증폭기(gain amplifier)(115)를 구비한다. 프로세서는 프로브의 작동을 제어하고 색채비(제1 파라미터), 총오염지수(제2 파라미터), 물의 오일에 대한 상대포화도(제3 파라미터) 및 오일 온도(제4 파라미터)를 연산하기 위해 센서들로부터의 출력신호를 처리하도록 프로그램 되어있다. 또한, 프로세서는 센서모니터링부, 신호조정부, 신호보정부를 제어하고, 하드웨어 인터페이스를 통해 디스플레이부(150)와 통신부(160)에 데이터를 보낸다.

메모리(112)는 프로세서에 의해 수행되는 오일 상태 측정을 실시간으로 수행하기 위한 프로그램 코드를 저장하는 기능을 한다. 또한 메모리는 신유에 관한 초기 정보 또는 신유의 오일 산화 및 총오염 파라미터와 같은 작동 파라미터, 수분함량, 오일 온도 등을 저장하는데 사용되며, 분석된 오일의 적합성을 결정하기 위해 연산된 파라미터의 한계값들을 저장한다.

센서 모니터링부(120)는 발광수단(222)의 광 조사 수준을 모니터링 한다. 센서 모니터링부는 피드백 포토다이오드(121), 증폭기(122) 및 전류드라이버(123)를 구비한다. 피드백 포토다이오드(5)는 프로브의 발광수단 부근에 설치된다. 피드백 포토다이오드는 발광수단의 광학출력을 안정시키기 위해 적용된다. 피드백 포토다이오드(121)에 의해 발광수단의 광학 조사가 측정된다. 상기 피드백 포토다이오드의 출력 신호는 증폭기(122)와 ADC(113)를 거쳐 프로세서로 들어간다. 프로세서는 이 출력 신호를 메모리에 저장된 초기값과 비교하고 그 결과 신호를 DAC를 거쳐 프로브의 발광수단의 전류 드라이버에 공급한다.

신호보정부(130)는 3개의 증폭기(131)와 3개의 프로그램 가능한 피드백 레귤레이터(132)를 구비한다. 신호보정부는 제1 센서(220, 320, 420)의 감도를 보정하여, 상이한 등급의 오일과 광범위한 오염 레벨을 가지는 오일의 테스트를 가능하게 한다. 보정 기술은 다음과

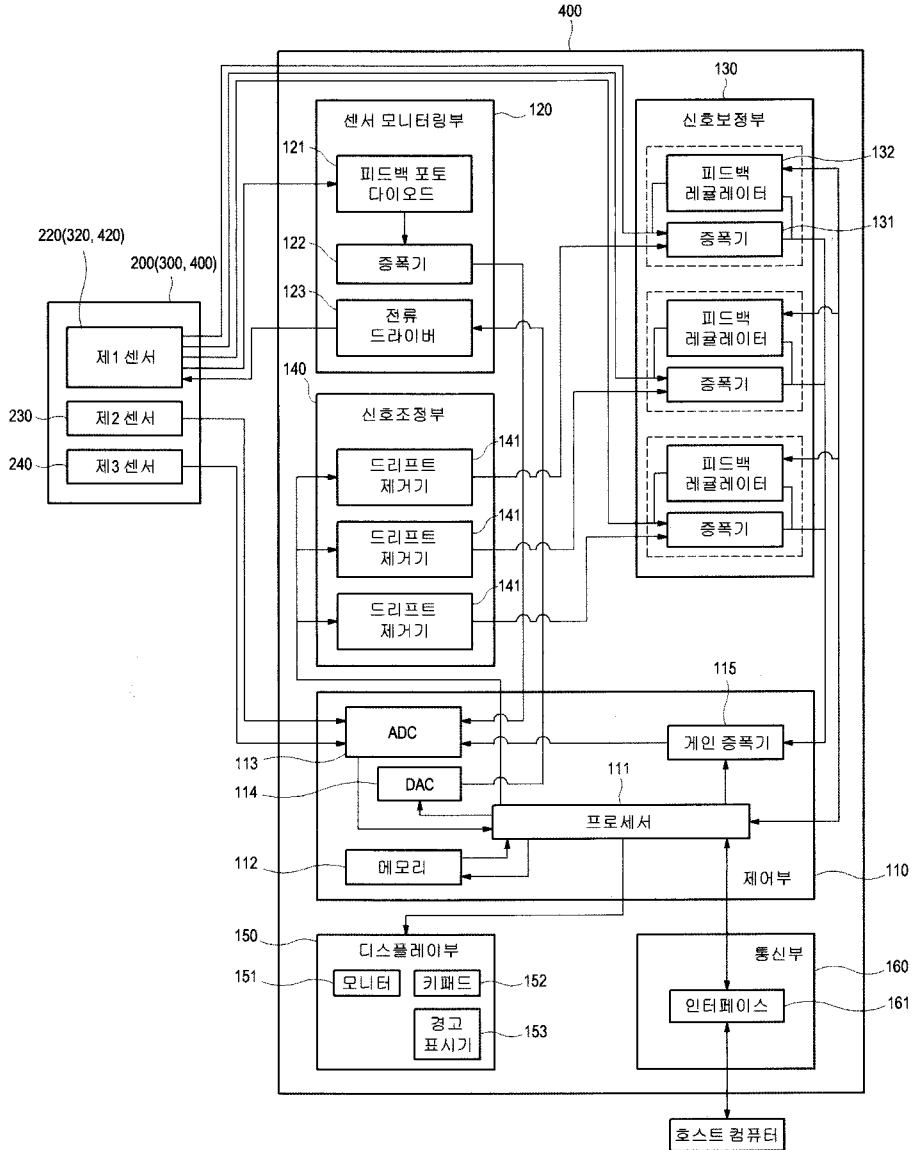


Fig. 3. A test block diagram of an oil monitoring smart sensor.

같다. 색상감지수단(223)의 출력신호가 발광수단(222)의 광 펄스 시점에 신호보정부(130)의 증폭기(131)로 들어간다. 증폭기(131)의 출력 신호가 프로그램 가능한 게인증폭기(115)와 ADC(113)를 거쳐 프로세서(111)에 들어가고, 프로세서에서 신호값이 기설정된 임계치의 최소 및 최대 레벨과 비교된다. 신호값이 임계치의 최소 및 최대 레벨보다 낮거나 높으면, 프로그램 가능한 게인증폭기의 게인이 상응하게 증가되거나 감소된다. 임계치의 레벨 사이의 범위 내로 출력 신호를 조정하

기 위해, 디지털 전위차계에 기반한 프로그램 가능한 피드백 레귤레이터(132)가 추가로 적용되며, 이는 프로세서에 의해 제어된다. 출력 신호가 임계치의 최소 및 최대 레벨 사이에 있으면, 색채비의 제1 파라미터 및 총오염지수의 제2 파라미터가 연산되고 그 결과가 출력된다.

신호조정부(140)는 3개의 편차(drift) 제거기(141)를 구비한다. 신호조정부는 온도 불안정, 주변 광 및 다른 원인에 의해 야기된 신호들의 zero level의 드리프트

(drift)를 제거하기 위해 출력을 조정한다. 조정은 다음과 같이 수행된다. 색상감지수단(223)의 적색, 녹색 및 청색 파장범위에서의 출력이 발광수단(222)의 광 펄스 사이의 시간주기에서 측정되고, 측정된 출력은 3개의 채널(적, 녹 및 청)의 기설정된 zero level과 비교되며, 그 차이가 드리프트 제거기(141)에 의해 널(null) 상태로 조정된다.

분석모듈은 오일의 상태에 관한 정보를 표시하기 위한 디스플레이부(150)와 호스트컴퓨터와의 통신을 위한 통신부(160)를 포함하고 있다. 통신부는 프로세서와 호스트컴퓨터 사이에서 명령 및 파라미터 정보를 통신하기 위한 인터페이스(161)를 구비한다. 인터페이스는 하드웨어 와이어 인터페이스(예컨대, RS-232 또는 표준 USB) 또는 하드웨어 와이어리스 인터페이스(예컨대, 무선 송신기, 무선 수신기 및 안테나를 포함하는 인터페이스)로 구성될 수 있다. 와이어리스 인터페이스는 와이어 인터페이스에 관련된 비용, 노이즈 및 다른 문제를 제거할 수 있다. 데이터가 호스트 컴퓨터에 전송되어 시간에 근거한 분석이 수행되고 오일 상태 및 전체 장비의 상태와 최적의 오일교환 간격이 결정될 수 있다. 한편, 분석모듈은 호스트 컴퓨터 없이 센서 자체적으로 구성될 수도 있으며, 이 경우 데이터 분석을 포함하는 모든 처리는 프로세서에 의해 수행되고 디스플레이부에 의해 독립적으로 표시될 수 있다.

3-2. 디젤엔진 오일 적용 예

디젤엔진 오일과 같이 광흡수가 상대적으로 높은 오일의 경우에는 광이 통과하는 측정두께가 크면 상당량의 조사된 광이 흡수되어 오일 매체를 통과하는 광학강도 차이를 정확하게 측정될 수 없는 문제점이 존재한다. 이러한 문제를 피하기 위해 측정두께를 작게 하는 것은 제조상 어렵고 작게 하여도 좁은 측정두께 내로 오일이 유동하기가 쉽지 않다. 따라서, 광흡수가 높은 오일을 모니터링 하는 경우, 측정 정확성을 높이기 위해서는 작은 측정두께를 연속적으로 구성할 필요가 있다. 이와 관련하여, 본 연구에서는, 가시광 파장범위에서 광흡수가 높은 오일을 모니터링하기 위하여 Fig. 1에서의 프로브(220)을 투명한 실린더형 광학봉 프로브(320)로 대체하여 사용하고 광학봉 내에서의 내부전반사(total internal reflection; TIR) 현상을 이용하였다. 상기 기술은 관련 참고문헌[16, 20]을 통하여 상세하게 설명한 바 있으므로, 이곳에서는 측정 결과만을 다루기로 한다.

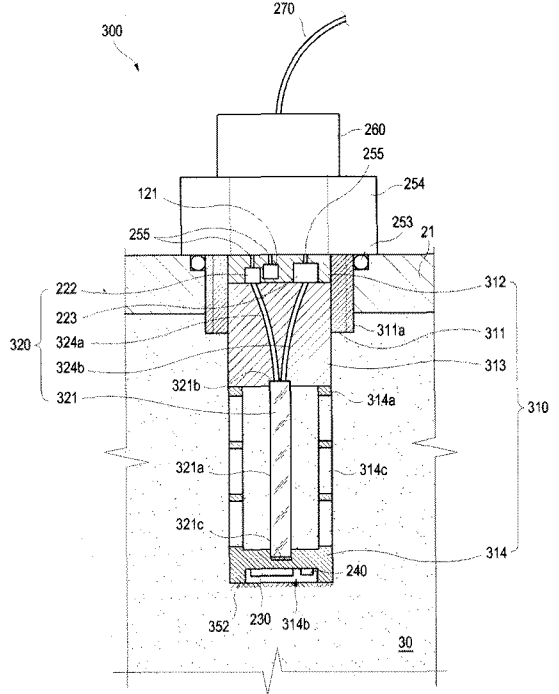


Fig. 4. Schematic view of an diesel E/G oil monitoring sensor[referred to from ref. 16].

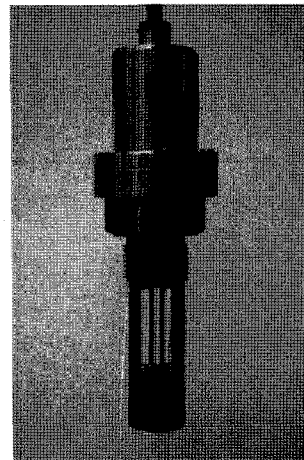


Fig. 5. Photography of diesel E/G oil monitoring sensor probe used in this study.

Fig. 4는 가시광 파장범위에서 광흡수가 높은 오일(예컨대, 디젤유)을 모니터링하기 위한 프로브(300)의 개략적인 단면도이며, Fig. 1에서 도시한 프로브(200)와 비교하여 동일한 구성요소에는 동일한 참조번호를 부여하였다. Fig. 5는 상기 프로브의 실제 모습이다. Fig. 6 및 7은 실제적으로 디젤 상용차(차종: 싼타페)

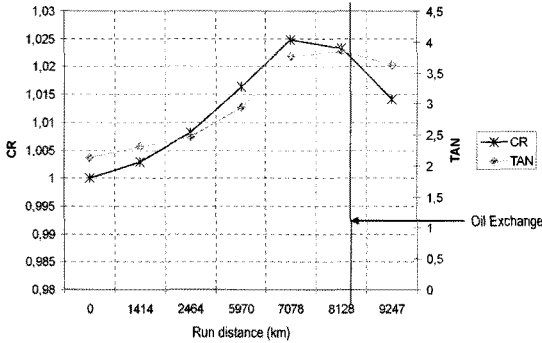


Fig. 6. Measured Chromatic Ratio(CR) versus Total Acidity Number (TAN).

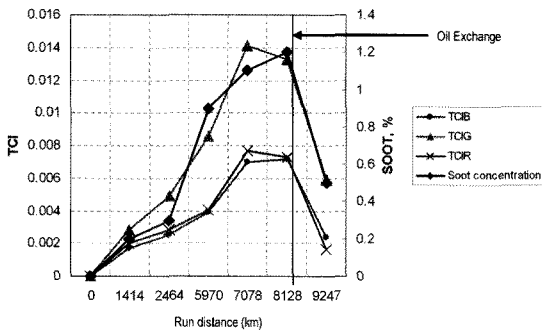


Fig. 7. Measured Total Contamination Indices(TCI) versus Soot concentration.

에서 주행거리별로 시료를 채취하여 상기 Fig. 4의 프로브를 사용하여 측정된 디젤엔진오일(API CH-4 10 W/30)의 로드테스트 결과를 실험실 분석결과(전산가 및 수트함량)과 비교하여 나타낸 그래프이다. 로드테스트 전 자동차의 주행 거리는 9750 km였다. 이 점은 도시된 그래프에서 0 km의 주행거리에 해당한다. 샘플링시, 동일한 체적(300 ml)의 신유가 크랭크케이스에 추가되었다. 실차시험 엔진 시험기간 동안 총 7회의 샘플링 후(9247 km), 오일이 교환되었다. 색채비의 제1 파라미터와 총오염지수의 제2 파라미터는 각 주행거리마다 샘플 채취된 오일 시료들을 비이커 용기에 담아 Fig. 4의 프로브를 채용한 오일 모니터링 장치에 의해 실험실에서 측정되었다. 본 논문의 2절에서 설명한 바와 같이, 적정(titration) 방법에 의해 결정되는 전산가(TAN)는 오일 내에 존재하는 산성 분해 생성물의 농도에 관련되므로 오일 열화가 진행됨에 따라 점차적으로 증가하는 것으로 예상할 수 있다. Fig. 6는 제1 파라미터 색채비 값(CR)이 전산가(TAN) 변화와 좋은 상관관계를 나타남을 보이고 있다. 따라서 본 연구에

서 자체개발하여 적용한 오일 열화도 측정센서가 오일의 화학적 열화를 신뢰성 있게 측정하였음을 예시하고 있다. Fig. 7은 총오염지수의 제2 파라미터(총 오염도)와 Soot Meter의 판독값(수트 농도) 간의 상관관계를 나타낸 것이며, 이 때 수트함량은 실험실 분석장비인 Wilks Enterprise Inc.사의 Infacal Soot Meter로 측정되었다. 따라서 본 연구에서의 센서가 디젤엔진 오일의 수트 함량을 역시 신뢰성 있게 측정할 수 있음을 나타내고 있다.

4. 결 론

윤활유 관리기법을 기반으로 하는 기계상태 진단기술이 국내의 산업체 현장에서 광범위하게 사용되고 있음에도 불구하고 타 기계상태 진단기술에 비하여 낙후된 이유는 그동안 상기 기술이 실험실 위주의 고가 분석장비에 의존했기 때문이라고 보인다. 윤활유를 분석하기 위해서는 첫 번째 사항으로 기계시스템 현장으로부터 오일 시료를 샘플링하나, 적은 용량의 오일 샘플링이 대상 기계의 윤활유 상태를 보편적으로 대변할 수 있는 지의 대표성 문제가 기본적으로 존재하며, 시료의 샘플링 자체에도 수많은 인적 에러 요인을 내포할 수 있을뿐더러 샘플링으로부터 실험실 분석/평가, 최종적으로 리포트 작업까지 소요되는 시간이 상대적으로 길어서 많은 기계시스템에 적용하기 어렵고 불시에 발생할 수 있는 기계파손을 사전에 예방 조치하기가 어려운 문제점들이 존재하고 있다.

그러나 전 세계적으로 반도체 센서기술 및 IT 신기술들이 비약적으로 발전함에 따라서 점차적으로 경제적이며 소형화된 측정센서들이 시장에 많이 선을 보이고 있는 실정에 있으며, 특히 상기 측정센서들을 측정하고자 하는 여러 기계요소 부위 on-site들에 직접 장착하고 측정센서 네트워크를 통하여 실시간적으로 관련된 정보들을 측정함으로써 과거의 문제점들이 획기적으로 개선될 수 있을 것으로 기대된다. 측정센서의 개발도 윤활유의 다양한 물리/화학적 물성 변화를 실시간적으로 측정할 수 있는 광범위한 수준으로 진행되고 있어서 과거의 실험실적 분석방법으로부터 현장 환경에 적합한 실시간 측정방법으로 전환될 것으로 보인다.

아울러 장래에는 본 연구에서 예시한 바와 같이 소형화된 다종의 측정센서들이 하나의 소형 유니트로서 병합되어 한 측정센서의 활용으로도 오일의 여러 가지 변화 특성을 측정하고 이들 결과를 근거로 오일 및 기

계 상태를 종합적으로 진단하는 이른바 스마트 센서가 활발하게 등장할 것으로 보여서 유험유 관리기법을 기반으로 하는 기계 상태진단기술에 획기적인 발전이 될 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 공호성, “유험유관리기법을 이용한 설비상태진단 및 진단기술”, *소음진동(Journal of kSNVE)*, 제17권 제3호, pp. 26-30, 2007.
2. US Pat. No.6151108, Kwon, Oh Kwan; Kong, Hosung; Han, Hung-Gu; Yoon, Eui-Sung; Myshkin, Nickolai K, Markova Lyubov V., Semeniouk, Mikhail S. ‘On-line measurement of contaminant level in lubricating oil’, Nov.21, 2000.
3. Kumar, S., Muherjee, P.S., Mishra, N.M., “Online Condition Monitoring of Engine Oil”, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 57 (6), pp. 260-267, 2005.
4. Turner, J.D., Austin, L., “Electrical Technique for Online Condition Monitoring”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 14 (10), pp. 1794-1800, 2003.
5. Lubrigard Corporations, Lubrigard oil condition sensors- on board oil condition monitoring brochure, 2005. p.1-, Available at [/www.lubrigard.com/products/literature/LG-OCS-1.pdf](http://www.lubrigard.com/products/literature/LG-OCS-1.pdf) [accessed 17 January 2006].
6. Delphi Corporations. Delphi diesel engine oil condition sensor brochure, September 2004. p. 1-, Available at [/www.delphi.com/pdf/ppd/sensors/et_oilcond.pdf](http://www.delphi.com/pdf/ppd/sensors/et_oilcond.pdf) [accessed 16 January 2006].
7. ISO/DIS 14830-1, “Condition Monitoring and Diagnostics of Machine - Tribology-Based Monitoring and Diagnostics-, Part 1: General Guidelines”, 2001.
8. Hidekazu TAI, Jyouji SEKI, Takuro KIDA and Tsutomu KOBAYASHI, “Vibration-type Viscometer Using a Triangular Bimorph Transducer -measurement of High Viscosity by Low-frequency Operation-”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 43, No. 5B, pp. 3088-3089, 2004.
9. KEREM DURDAG and JEFF ANDLE, “Real-time Viscosity Measurement for Condition-based Monitoring Using Solid-state Viscosity Sensor”, *Tribology Transactions*, 51, pp. 296-302, 2008.
10. SKF, “New Life Handbook”, June 1989.
11. Pall Corporation, WS04 Portable water sensor, <http://www.pall.com/pdf/WS04.pdf>, [accessed 24 June 2008].
12. Vaisala, Vaisala HUMICAP® Moisture and Temperature Transmitter Series for Oil MMT330’, <http://www.vaisala.com/instruments/products/moistureinoil/mmt330>, [accessed 24 June 2008].
13. HIAC PM4000 Online Liquid Particle Monitor, http://www.particle.com/index.php/hachultra/catalogue/hiac/hiac_pm4000, [accessed 24 June 2008].
14. 공호성 외, “분광분석법을 이용한 유험유 오염물 및 마모입자 분석에 있어서의 문제점 고찰”, *한국유험학회*, Vol. 15, No. 2, 1999.
15. 이대성, “마이크로 스마트 센서의 기술개요”, *C&I*, pp. 8-15. 2006 (10).
16. “오일 열화 실시간 모니터링 방법 및 장치”, 대한민국 특허출원 2006-0070869 (2006), USA patent application No. 11/640,012 (2006).
17. 공호성 외, “오일 열화 진행에 따른 오일의 색채 특성 변화”, *KSTLE*, Vol. 24, No. 1, pp. 7-13, 2008.
18. Ossia, C.V., Kong, H., Markova, L.V., and Myshkin, N.K., “On the Use of Intrinsic Fluorescence Emission Ratio in the Characterization of Hydraulic Oil Degradation”, *Tribology International*, 41, pp. 103-10, 2008.
19. Ossia, C.V., Kong, H., Han, H. G., Markova, L., and Makarenko, V., “Chromatic Parameters in the Condition Monitoring of Synthetic Hydraulic Oils”, *KSTLE International Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-6, June 2007.
20. 공호성 외, “디젤 엔진오일 내 Soot 함량 증가에 따른 오염도 측정에 관한 실험적 고찰”, *한국유험학회지*, Vol. 19, No. 5, pp. 251-258, 2003.