

통합형 인-라인 오일 모니터링 센서의 제철설비 현장 적용사례

공호성[†] · 한흥구 · 박진수* · 장원수* · 임경근*

한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터
*광양제철소 설비기술부

Case Study on Integrated In-line Oil Monitoring Sensor for Machine Condition Monitoring of Steel Making Industry

H. Kong[†], H.G. Han, J-S. Kwak*, W-S. Chang* and G-G. Im*

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

*Maintenance Technology Department, KwangYang POSCO, Korea

(Received November 23, 2009; Revised December 15, 2009; Accepted December 18, 2009)

Abstract – One of the important trends for condition monitoring in the 21st century is the development of smart sensors that will permit the cost-effective continuous monitoring of key machine equipments. In this study, an integrated in-line oil monitoring sensor assigned for continuous in situ monitoring multiple parameters of oil performance is presented. The sensor 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 density of oil in three optical wavebands (‘Red’, ‘Green’ and ‘Blue’) and water content is evaluated as relative saturation of oil by water. In order to evaluate the sensor's effectiveness, the sensor was applied to several used oil samples in steel making industry and the results were compared with those measured by standard test methods.

Keywords – integrated in-line oil monitoring sensor(통합 실시간 오일 모니터링 센서), oil deterioration(오일 열화), machine condition monitoring(기계상태진단)

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 측정기기를 활용하고자 함에 많은 관심을 가지고 있다[1].

기업의 설비자산 효율화를 위하여 기계 상태진단기

술이 국내외 산업계에 점진적으로 활용되고 있으나, 투자 대비 수익성(Return on investment) 측면에서 극복되고 개선되어야 할 사항들이 적지 않다. 21세기 기계설비 상태진단기술이 중요한 트렌드의 하나는 저가/실시간/통합형 실시간 모니터링 스마트 상태진단 센서를 활용한 상태진단 비용의 최소화라 할 수 있다. 본 논문에서는 KIST에서 연구개발하고 있는 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서 및 측정원리, 그리고 센서 calibration 시험결과를 소개하고, 최근 들어 광양제철소 설비기술부와 공동으로 수행하고 있는 센서 현장적용 시험 결과를 통하여 통합형 실시간 오일 모니터링 센서의 향후 산업체 적용 오일 모니터링 기술로서의 효용성과 활용 가능성을 논의하고자 한다.

[†]주저자 · 책임저자 : hkong@kist.re.kr

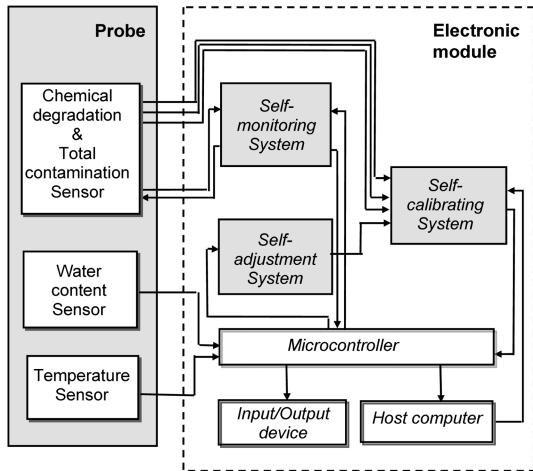


Fig. 1. Block diagram of an integrated oil monitoring sensor.

2. 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서

본 연구의 통합형 인-라인 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 오일 모니터링 센서[2]이다.

Fig. 1은 상기 오일 모니터링 센서 장치의 개략적인 구성을 도시하는 블록도이다. 오일 모니터링 장치는 총 4개의 파라미터(화학적 열화, 오염도, 수분함량 및 온도)들을 측정 및 연산하여 오일의 상태를 분석하는 모듈과 오일의 열화와 물성을 검출하는 프로브를 포함한다. 오일 모니터링 센서는 오일을 사용하는 장비에 직접 설치되어 오일을 모니터링 하며, 상기 오일로는 유압유, 변압기유, 터빈유, 압축기유, 엔진오일, 각종 윤활유 등을 포함한다. 측정 프로브는 오일이 사용되는 장비에 장착되거나 오일을 수용하는 오일 탱크의 외벽 혹은 오일 배관 내에 장착된다. 상기 프로브에는 오일의 상태를 검출하여 신호를 출력하는 측정센서가 내장되어 있다. 센서에서 출력된 신호는 분석모듈로 전송되어 처리되며, 분석모듈은 센서들로부터의 출력신호에 근거하여 오일의 열화 및 장비의 작동에 영향을 줄 수 있는 오일의 물성 변화를 실시간으로 모니터링 한다.

Fig. 2는 상기 오일 모니터링 장치의 측정센서 프로브의 모습이다. 프로브는 센서들이 설치되는 하우징과, 오일의 화학적 열화 및 총오염지수를 측정하기 위한

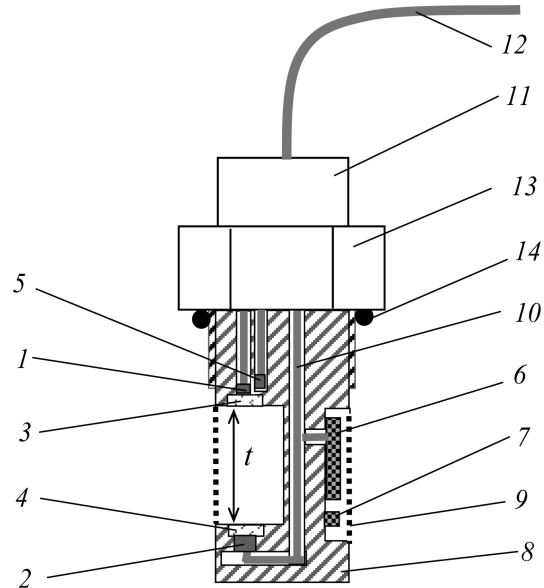


Fig. 2. General view of an integrated probe: 1-light emitting source; 2-measuring photodetector; 3,4-optical windows; 5-feedback photodetector; 6-water content sensor; 7-temperature sensor; 8-housing; 9-protective mesh; 10-wires; 11-cover; 12-electrical cable; 13-nut; 14-seal ring[2].

제1센서(1, 2), 오일의 수분함량을 측정하기 위한 제2센서(6), 오일의 온도를 측정하기 위한 제3센서(7)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 모니터링하고 연산하여 사용자에게 오일의 현재 상태를 실시간으로 알려주며, 나아가 사전에 설정된 한계치와 비교함으로써 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[2-5]. 즉, 오일의 화학적 열화가 진행되면서, 오일을 통과한 광의 적색 파장 범위의 광세기(optical intensity)가 녹색 파장 범위의 광세기보다 상대적으로 커지면서, 이들에 대한 색상감지수단의 적색 파장 범위에서의 출력(U_R)과 녹색 파장 범위에서의 출력(U_G)의 비(ratio)가 증가한다.

센서의 제2 파라미터는 총오염지수(total contamination index; TCI)로 정의된다. 오일의 총오염지수는 사용유(used oil) 내의 산화 및 산화생성물, 오염 먼지, 마모 입자 등의 함량에 관련하여 나타나는 광학밀도(optical density)의 감소 변화를 신유와 비교함으로써 평가된다. 상기의 총오염지수는 기본적으로 다음 수식 (2)에서와 같이 3개의 파장범위에서의 광학밀도의 변화(적색(ΔD_R), 녹색(ΔD_G), 청색(ΔD_B))로서 각각 평가한다[4].

$$TCI_R = \Delta D_R = D_{R,used} - D_{R,fresh} = \ln \frac{U_{R,fresh}}{U_{R,used}}$$

$$TCI_G = \Delta D_G = D_{G,used} - D_{G,fresh} = \ln \frac{U_{G,fresh}}{U_{G,used}}$$

$$TCI_B = \Delta D_B = D_{B,used} - D_{B,fresh} = \ln \frac{U_{B,fresh}}{U_{B,used}} \quad (2)$$

상기 수식 (2)에서, $D_{R,fresh}$, $D_{G,fresh}$, $D_{B,fresh}$ 는 적색, 녹색 및 청색 파장범위에서 신유의 광학밀도, $D_{R,used}$, $D_{G,used}$, $D_{B,used}$ 는 적색, 녹색 및 청색 파장범위에서 사용유의 광학밀도, $U_{R,fresh}$, $U_{G,fresh}$, $U_{B,fresh}$ 는 적색, 녹색 및 청색 파장범위의 신유 시험에서의 출력 광세기, $U_{R,used}$, $U_{G,used}$, $U_{B,used}$ 는 적색, 녹색 및 청색 파장범위의 사용유 시험에서의 출력 광세기이다.

프로브의 하우징에 장착되는 제2센서는 오일의 상대습도(물의 오일에 대한 상대포화도)를 측정할 수 있는 수분함량 측정센서이다. 또한 프로브에 설치되는 제3센서는 오일의 온도를 측정할 수 있는 센서로서, 측정된 온도에 정비례하여 선형적인 전압이 발생하는 컨버터 형식의 온도센서가 사용되었다.

3. 시험 결과 및 분석

3-1. 센서 Calibration 시험결과

Fig. 3은 T100(Teresstic T100 오일, 동점도: 100 cSt @40°C) 신유 시료에 표준 오염입자로 사용되고 있는 carbonyl iron powder (평균 입자크기: 7.6 μ m)

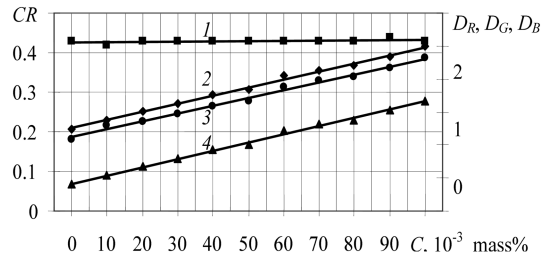


Fig. 3. Dependences of diagnostic parameters on concentration of mechanical impurities in oil: 1-chromatic ratio; 2~4- indices D_R , D_B , D_G respectively.

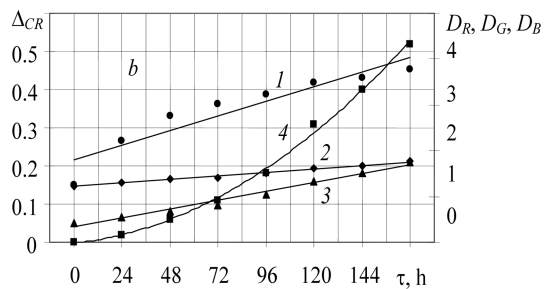


Fig. 4. Results of analysis of T100 mineral oil during artificial thermal aging: changes in diagnostic parameters of the sensor(1~3-indices D_R , D_B , D_G respectively; 4-chemical degradation parameter.

를 중량비 기준으로 (0~100) $\times 10^{-3}$ %까지 인위적으로 첨가하면서 본 연구에서의 센서에서 측정된 광학밀도 및 색채비 측정결과이다. 인위적인 오염 농도의 증가에 따라서 3개 파장범위에서의 광학밀도가 선형적으로 증가하는 반면에, 시료 오일의 색채비는 상기 광학밀도 값 변화와 상관없이 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 본 연구에서 정의한 오일의 색채비는 기본적으로 인위적인 오염농도 증가와 상관없이 없음을 잘 대변하고 있다.

Fig. 4는 T100 시료 오일을 ASTM D2070 시험방법 [6]에 의하여 135°C 고온 하에서 인위적으로 thermal aging을 시키며 매 24 시간마다 시료를 채취하여 상기 시료 오일들의 광학밀도 및 색채비를 측정된 결과이다.

시료 오일의 열화가 진행됨에 따라 오일의 색채비(4)가 급속하게 증가함과 아울러 3개 파장범위에서의 광학밀도 값들도 동시에 증가하는 모습이 나타났다. 오염 입자들이 인위적으로 첨가된 Fig. 3의 결과와 비교하여, 열화된 오일 시료에서의 광학밀도의 증가는 오일 시료 자체의 광학밀도의 증가와 오일이 열화됨에

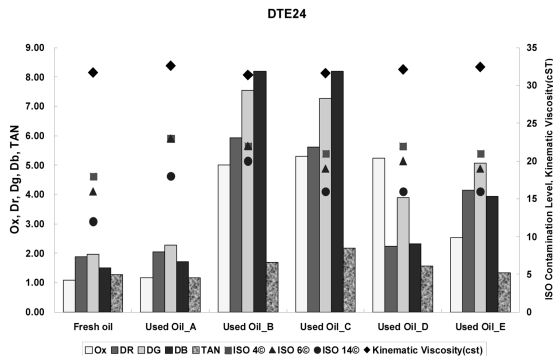


Fig. 5. Test results of DTE 24 oils.

따라 발생한 미소 크기의 오일 열화 생성물(산화물, 첨가제 분해물 등) 영향에 의한 것으로 사료된다.

3-2. 제철설비 사용유에의 적용 결과

본 연구에서 사용하고 있는 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서의 산업현장 적용 타당성을 평가하기 위하여 광양제철소 설비기술부와 공동으로 다양한 종류의 제철설비 사용유들을 대상으로 비교 평가 시험을 행하였다.

시험 대상 사용유는 주로 유압작동유, 터빈유들이었으며, 제철설비 산업현장에서 통상적으로 행하여지고 있는 표준 오일분석(동점도 측정, Karl Fisher 적정방법에 의한 전산가(TAN: Total Acidity Number) 및 수분함량(절대 수분량, ppm)측정, 입자계수기에 의한 ISO 오염등급 측정과 동시에 본 연구의 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서에서의 측정결과(시료의 3개 과장범위에서의 광학밀도 D_R , D_B , D_G ; 시료 오일의 색채비를 나타내는 O_x ; 상대습도(Relative Saturation, %)들을 상호 비교하였다.

Fig. 5는 유압작동유 DTE 24 오일을 사용하는 여러 종류 기계장비들에서 채취된 사용유 시료들을 대상으로 여러 가지 측정값들을 종합적으로 비교한 결과이다. 그래프의 좌측에 표기한 DTE 24 신유에 비하여 시험 대상의 오일들의 동점도(‘◆’) 변화는 별로 없었으나, 대부분 사용유의 전산가 및 오염도(ISO 오염등급; ‘■’ 4 $\mu\text{m}(c)$, ‘▲’ 6 $\mu\text{m}(c)$, ‘●’ 14 $\mu\text{m}(c)$)가 신유에 비하여 상대적으로 증가한 것으로 나타났다. 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서 측정결과에서도 상기 사용유의 물리/화학적 변화를 감지할 수 있는 의미 있는 측정결과를 얻을 수 있었다. 특히 시료 오일의 색채비(O_x) 측정값과 전산가 측정값 상호간의 상관계

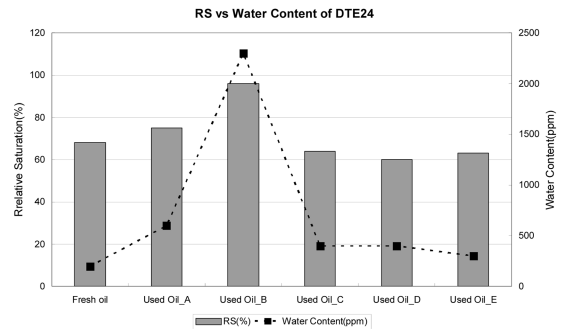


Fig. 6. Relative saturation(%) vs water content(ppm) of DTE 24 oils.

수(correlation coefficient)가 0.84로 나타나 두 측정값 상호간의 상관관계가 높았다. 또한 사용유의 상대습도(Relative Saturation) 측정 결과와 Karl Fisher 적정방법에 의한 절대 수분함량 측정결과 상호간의 상관계수도 0.94로 매우 높게 나타났다(Fig. 6 참조). 한편 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서의 오염도 관련지수(D_R , D_B , D_G) 측정값과 입자계수기에 의한 ISO 오염등급 측정 결과 상호간의 상관계수는 0.5 이하로 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 시험 대상 유압작동유 오일 내에 오염된 입자들이 solid particle 형태의 기계부품 마모입자 혹은 외부로부터 혼입된 dust 입자가 아니라 오일이 열화됨에 따라 발생한 미소 크기의 오일 열화 생성물이었기 때문인 것으로 사료된다. 오일 내 모든 오염입자가 구형의 오일 열화생성물(입자크기가 4 $\mu\text{m}(c)$, 밀도 0.9 g/cm^3)로 이루어졌다고 가정할 때, ISO 오염등급 20(5,000<입자 수<10,000)에 해당하는 오염도를 ppm 단위로 환산하면 약 0.2 ppm 정도로 매우 낮다. 따라서 Fig. 5에 나타난 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서의 오염도 관련지수 값(D_R , D_B , D_G)의 증가는 solid particle 형태의 기계적 오염입자에 의한 영향(Fig. 3 참조)에 의한 것이 아니라, 오일이 화학적으로 열화(Fig. 4 참조) 됨에 따라 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 7은 유압작동유 DTE 25 오일을 사용하는 기계장비들에서 채취된 사용유 시료의 측정 비교 결과이다. 상기 시험의 경우, 사용유 시료 E 및 F 오일에서 열화발생이 눈에 띄게 나타남을 알 수 있었다(사용유 시료 H의 경우도 이와 유사하였음). 상기 시료들 모두 육안으로 분명하게 확인할 수 있을 정도로 혼탁도도 높았으며, 시료의 냄새를 통하여 산화도가 높음을 직접 확인할 수 있었다. 오일 분석 결과에서 DTE 25

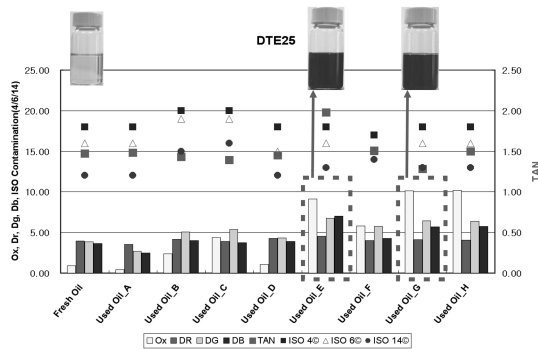


Fig. 7. Test results of DTE 25 oils.

오일 신유는 전산가가 1.47 mgKOH/g, ISO 오염등급은 18/16/12, 그리고 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서 측정에서는 O_x 가 0.88, 파장별 오염도 지수(D_R , D_B , D_G)가 각각 3.9, 3.8, 3.6로 측정된 반면에, 사용유 시료 E에서는 전산가가 1.98, ISO 오염등급은 18/16/13, O_x 가 9.1, D_R , D_B , D_G 가 각각 4.6, 6.8, 7.0으로 측정되었고, 사용유 시료 F에서는 전산가가 1.28, ISO 오염등급은 18/16/13, O_x 가 10.1, D_R , D_B , D_G 가 각각 4.1, 6.4, 5.8로 측정되었다. 따라서 현장 시험 분석자 경험으로 판단한 산화도 및 오염도 판정과 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서 측정결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. Karl Fisher 적정방법에 의한 전산가 측정에서 사용유 F 시료의 전산가(1.28)가 신유의 전산가(1.47) 보다 상대적으로 낮게 측정된 결과는 매우 주목할 만한 사항이다. 한편 상기 시료를 적외선 분광분석법에 의하여 별도로 측정한 결과, 신유의 전산가는 0.6, 사용유 F는 1.23으로 측정되었다. 이와 같이 오일이 산화됨에 따라서 전산가가 초기 값에 비하여 상대적으로 감소하는 현상은 내마모성 첨가제를 지니고 있는 작동유 시료에서 종종 나타나는데, 내마모성 첨가제가 접촉 운동을 하는 금속 표면과 화학 반응을 하면서 첨가제가 분해되어 발생한다고 알려져 있다. 이러한 현상이 발생했을 가능성 외에도, 화학 적정(chemical titration)에 의하여 전산가를 측정하는 방법을 사용하는 경우에는 적정에 사용하는 시약과 시료

오일의 첨가제와의 복잡한 화학반응 결과에 의하여 오일 기유의 산화안정성 판정에 자칫 오류가 발생할 수 있는 가능성도 있을 것으로 사료되었다.

5. 결론

1) 오일의 화학적 열화, 물리적 오염도, 수분 함량 및 온도를 동시에 효과적으로 측정할 수 있는 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서를 개발하였다.

2) 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서의 calibration 시험 및 산업현장 제철설비 사용유에 적용한 시험결과에서 본 연구에서 개발한 통합형 인-라인 오일 모니터링 센서 측정 결과의 효용성 및 신뢰성을 확인할 수 있었다.

3) 경제적이고 동시에 기계장비에 직접 장착할 수 있고, 오일 분석과 관련된 여러 가지 측정 파라미터를 통합하여 측정할 수 있는 스마트 오일 상태진단 장비로서 향후 활용이 기대된다.

참고문헌

1. 공호성 외, “기계 상태진단을 위한 인-라인형 오일 모니터링 스마트 센서”, 한국윤활학회, 제24권, 제3호, pp. 111-121, 2008.
2. “통합형 인라인 오일 모니터링 장치”, 대한민국 특허출원번호 10-2008-0015944 (2008), USA Patent application No. 12/389,942 (2009).
3. 공호성 외, “오일 열화 진행에 따른 오일의 색채 특성 변화”, 한국윤활학회, 제24권, 제1호, pp.7-13, 2008.
4. 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*, Vol. 41, pp. 103-110, 2008.
5. 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, 2007.
6. ASTM D2070-91, “Standard Test Method for Thermal Stability of Hydraulic Oils”.