

오일 열화 진행에 따른 오일의 색채 특성 변화

공호성[†] · 오씨아 빅터 · 한흥구 · 류보브 마르코바*

한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터
*MPRI 연구소, 고멜, 백러시아

Change in Chromatic Characteristics with the Oil Degradation

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

Tribology 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 – In this work, a simple and low cost sensor technique is proposed to test oil color in real time using in-line sensor. It is presented to use a ratio of intensity in red wavelength range to intensities of green and blue wavelength ranges (defined as a ‘chromatic ratio’) in order to estimate the oil color change. The proposed sensor technique is realized by irradiating a white LED as light source and a RGB color sensor as photoreceiver, and the chromatic ratio of various types of used oils are measured. The results show that chromatic ratio generally reflects chemical deterioration of oil, including oil oxidation and thermal degradation. It is concluded that the proposed sensor could be used for an effective oil monitoring technology.

Key words – chromatic ratio, oil monitoring, color sensor, oil degradation

1. 서 론

오일은 사용시간이 경과함에 따라서 접촉 경계면에서 하중을 지지하는 역할을 담당하는 동안 다양한 접촉운동과 관련된 응력들을 받아 변형되는 과정에서 열 에너지를 방출하며 상기의 결과로서 열적 부하가 누적되어 다양한 열화현상들이 발생한다. 이와 같은 열화는 오일의 물리화학적인 성상 변화를 초래하므로, 이들을 정성/정량적으로 측정함으로써 기계 경계면에서 발생하였던 접촉 이력의 정도를 직/간접적으로 평가함과 동시에 오일 수명을 판정하는 기계상태진단 목적에 활용되고 있다[1].

오일의 열화를 가장 손쉽게 분석할 수 있는 방법 중의 하나는 오일의 외관이나 색의 변화를 체크하는 것으로 산업계 현장에서 오래 전부터 사용하고 있다. 오일이 장시간에 걸친 열적 부하를 받으면 Fig. 1에서와

같이 오일 기유의 분자가 탄화, 질화 혹은 산화되면서 상기 열화생성물들에 의하여 오일의 색조가 점차 누렇게나 짙은 색조를 띠기 때문이다[2].

다음의 Fig. 2는 상기와 같은 오일의 열화발생을 푸리에 변환 적외선 분광분석기(Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR))을 이용하여 정량적으로 분석한 결과의 한 예이다. 보라색으로 표기된 신유 상태에서의 오일이 열화 진행됨에 따라서 특정한 주파수 대역의 피크치가 상대적으로 증가되는 특징들을 보여주고 있다. 특히 1740 cm^{-1} 영역의 주파수는 carbonyl 그룹의 형성과 직결된 사항으로서 오일 산화발생의 정도를 판단함에 매우 중요하게 사용되고 있다. 한편 $1600\sim 1640\text{ cm}^{-1}$ 주파수 영역은 nitration peaks로서 오일의 열분해(thermal degradation)와 관련된 오일 열화 발생을 판단하는데 사용되고 있다.

이와 같이 FTIR 분석방법이 오일의 열화를 판정하는 주요한 측정수단으로 사용되고 있으나, 고가의 장비이기 때문에 산업계 현장에서 폭 넓게 활용하기에는 제

[†]주저자 · 책임저자 : hkong@kist.re.kr

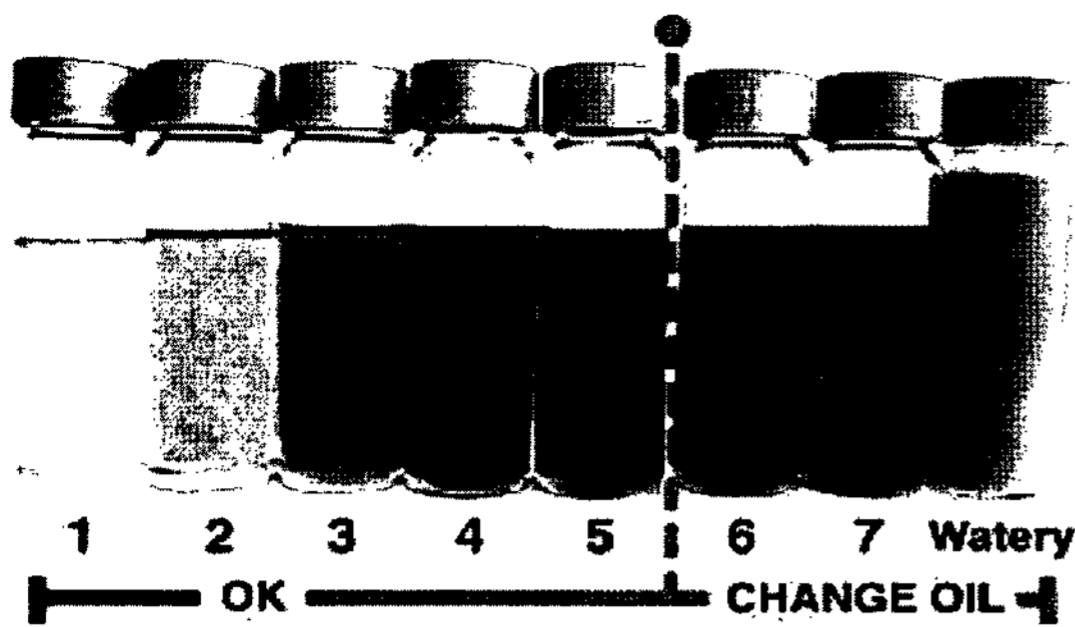


Fig. 1. Oil color change in the course of oil degradation.

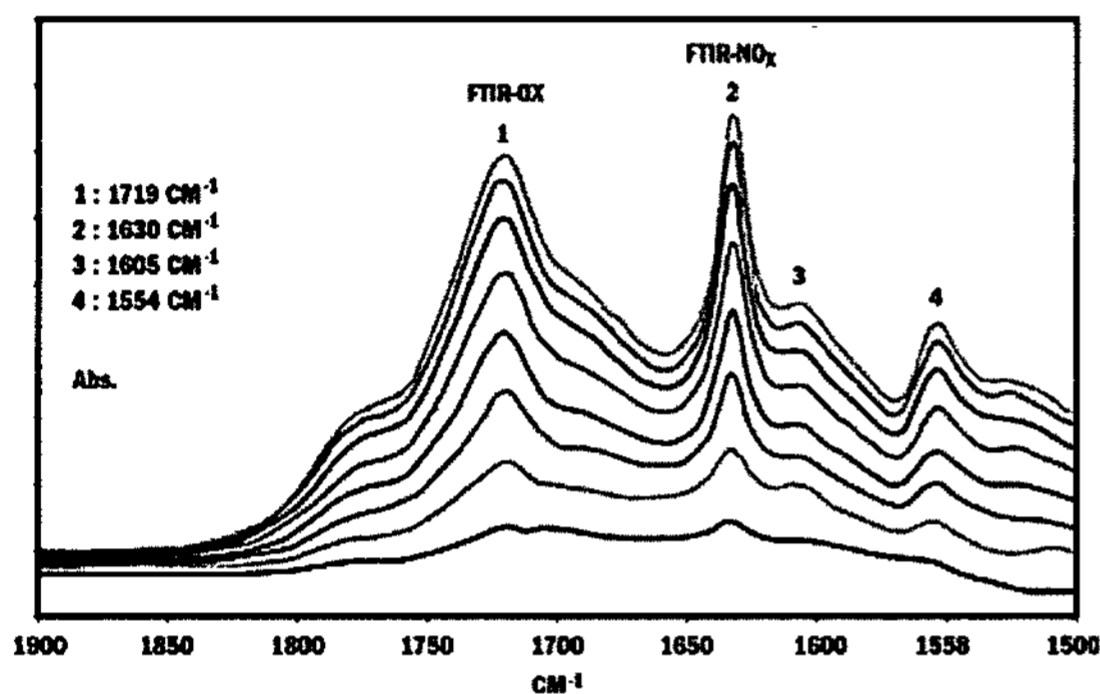


Fig. 2. FTIR Spectrum comparing oxidation and thermal degradation.

한이 있다. 또한 사용유의 열화 특성에 따라서는 점도의 변화나 FTIR-Ox 관련 주파수 변화를 동반하지 않는 상태로 오일의 색상만 변화하는 경우도 종종 발생한다[3].

사용유의 색상이 변화하는 형상은 일반적으로 오일 내에 불용성분의 탄화물 혹은 산화물이 형성되어 오일 내에 부유하기 때문이며, 'color body'라고 불리는 상기 물질들의 농도와 빛을 흡수하는 형태에 따라서 다른 색조를 띠는 것으로 알려져 있다. 따라서 사용유가 비정상적인 색으로 변화하면 오일 사용조건이 비정상적임을 의미하는 가능성이 높으므로 적당한 방법을 사용하여 오일의 색을 사용시간 동안 꾸준히 측정함이 필요하다.

현재 오일의 색을 측정하는 국제적인 표준방법으로 ASTM D 1500, D 1524, 및 D 2129 방법이 존재한다[4]. 상기의 방법은 색의 종류를 기본적으로 가장 밝은 0.5 등급에서 가장 어두운 8.0 등급까지 매 0.5 간격으로 분류하고 이 표준 등급에 해당하도록 제작된 칼라 유리들과 오일의 색을 일일이 수동적으로 대조하여 가장 일치하는 색 등급을 찾아낸다. 그러나 상기의

실험실적 분석 방법을 현장에서 사용하기에는 적당하지 않으므로, 오일의 색 변화를 사용주기에 걸쳐 간편하면서도 실시간적으로 측정할 수 있는 방법을 개발하고자 하는 필요성이 매우 높은 상태이다. 오일의 색상 자체가 오일 물성의 변화를 의미하는 결정적인 지표라고 할 수는 없으나, 상기 변화가 발생할 경우에 이차적인 세부분석을 행해야 할 시점임을 사전에 경고하는 중요한 지표로서의 활용도가 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 목적으로 오일의 색을 정량적으로 측정할 수 있는 실시간 측정센서 개발하고자 하였다. 오일의 사용 시간에 따라 나타나는 주파수 특성 변화를 정량적으로 파악하기 위하여 사용유의 색채비(chromatic ratio)로서 정의하였으며, 이를 오일 열화 판정을 위한 변수로서 활용하고자 하였다. 또한 여러 가지 산업체 사용유 샘플들에 적용하여 본 연구에서 얻은 결과의 타당성을 실험적으로 증명하고자 하였다.

2. 이론적 배경 및 측정센서의 제작

오일은 사용시간이 길어짐에 따라서 초기의 투명한 색으로부터 점차적으로 갈색의 색으로 변화하는 현상은 널리 알려진 경험적인 사실이다. 즉 가시광선 영역에서 점차적으로 높은 주파수 대역의 빛을 방출하는 방향으로 특성이 변화한다. 따라서 오일 매체를 투과한 빛을 주파수 크기가 크고 작은 대역에서 각각 측정하고 상대적으로 비교하면 이들 특성을 파악할 수 있다.

오일을 투과한 임의 주파수(λ)의 출력광이 광검출기(photodetector) 소자에서 전기적인 신호로서 측정되는 유효광세기(effective spectral light intensity, I_{eff})는 해당 주파수에서의 광세기와 광검출기의 상대감도(relative spectral sensitivity, S)의 곱으로 다음과 같이 표시된다 [1].

$$I_{eff}(\lambda) = I(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (1)$$

따라서 신유와 사용유 내부를 통과한 출력광을 주파수가 각기 다른 두 종류(λ_1, λ_2)의 광검출기들에서 각각 측정하였을 때의 유효광세기(I_{eff}^1, I_{eff}^2) 들은 다음의 Fig. 3에서와 같이 나타난다.

오일 매체를 투과하는 광의 세기를 청색(blue), 녹색(green), 적색(red) 세 가지 종류 색으로 분리하여 측정할 수 있는 RGB 칼라센서로 측정하면 상기 3가지 색 성분들의 출력광 세기들을 세분화하여 측정할 수 있으며, 2종류의 가시광선 주파수 대역에서만 한정하여 측

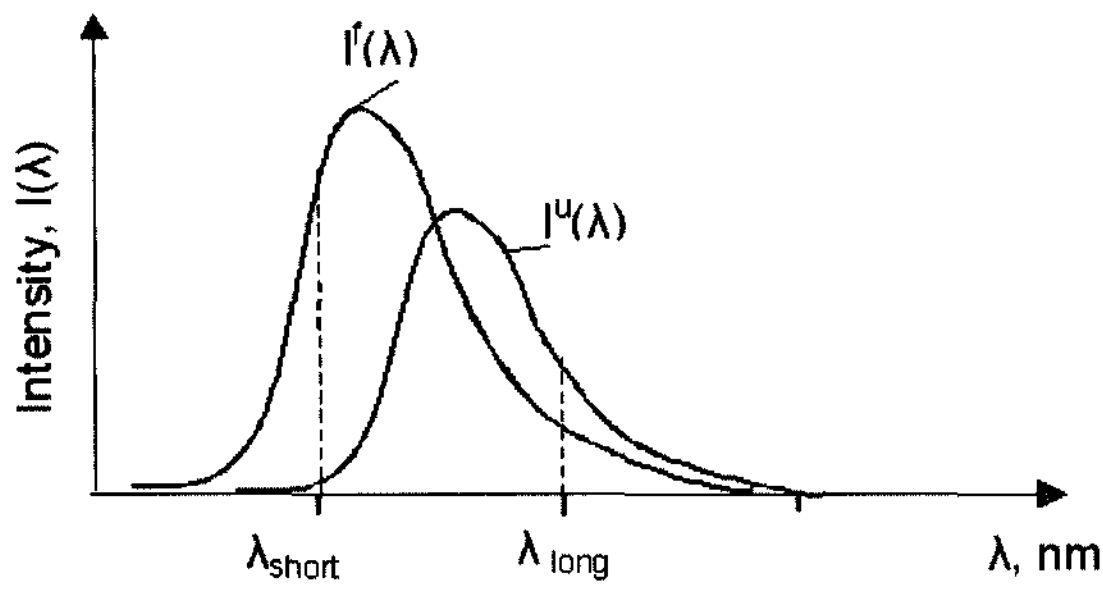


Fig. 3-1. Light transmittance spectra of fresh $I^f(\lambda)$ and used $I^u(\lambda)$ oil.

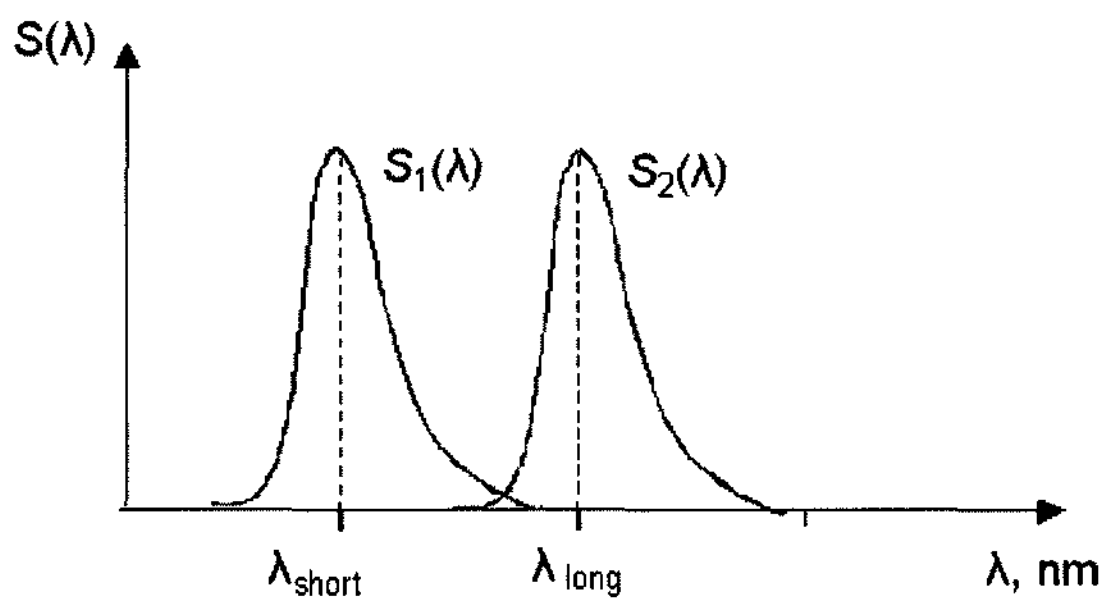


Fig. 3-2. Relative spectral sensitivity of photodetector PhD1, $S_1(\lambda)$ (with maximum at λ_{short}) and photodetector PhD2, $S_2(\lambda)$ (with maximum at λ_{long}).

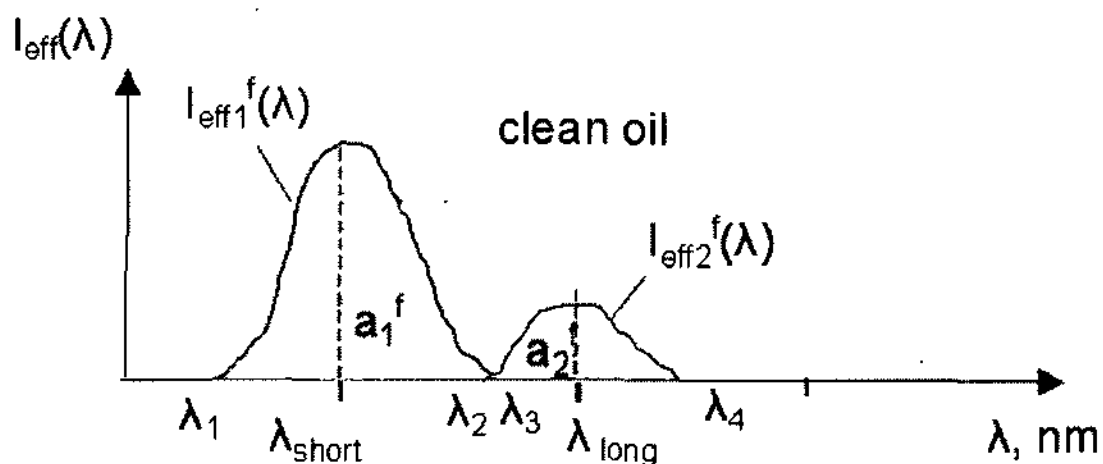


Fig. 3-3. Effective spectral light intensity of fresh oil received by PhD1 ($I_{eff}^f(\lambda)$) and PhD2 ($I_{eff}^f(\lambda)$).

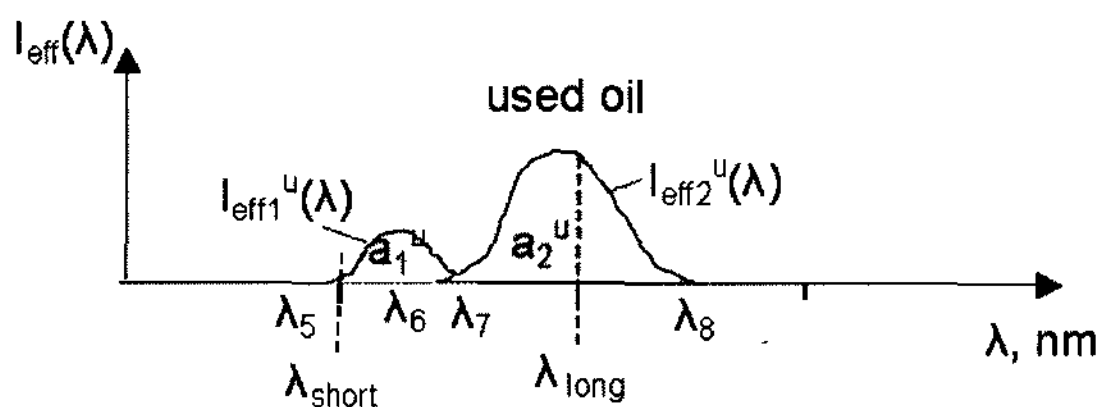


Fig. 3-4. Effective spectral light intensity of used oil received by PhD1 ($I_{eff}^u(\lambda)$) and PhD2 ($I_{eff}^u(\lambda)$).

정하는 결과에 비하여 주파수 천이 특성을 보다 세밀하게 평가할 수 있다.

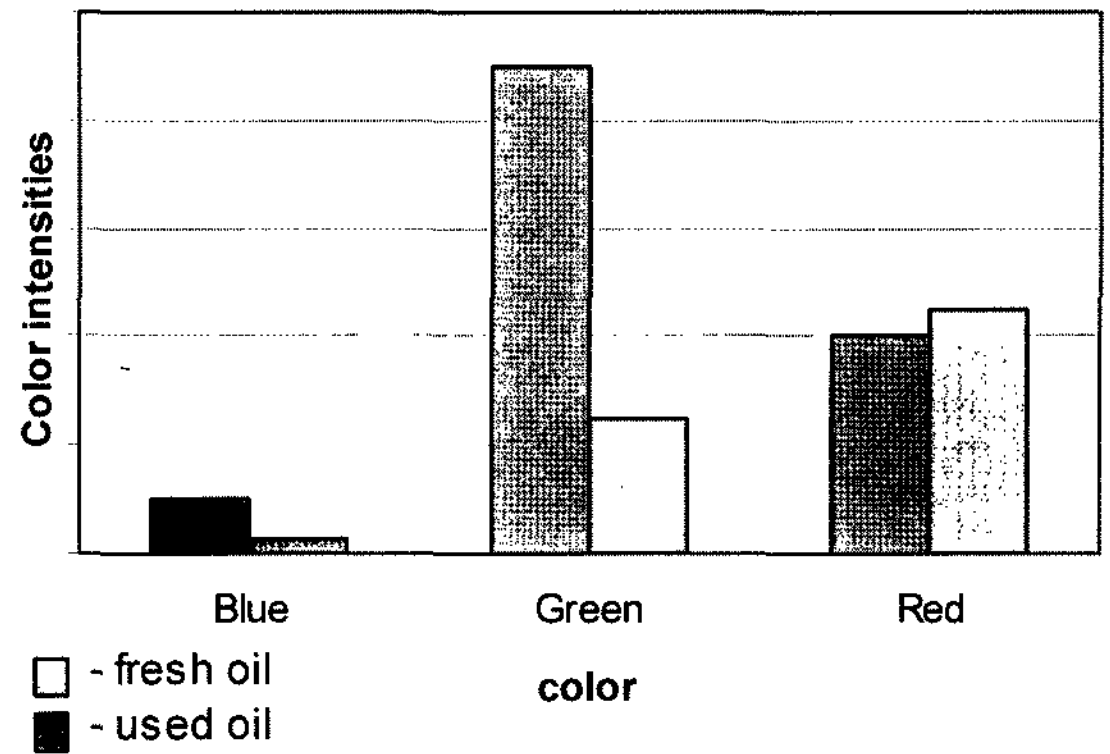


Fig. 4. Change in light intensities of RGB color ranges of fresh and used oil.

Fig. 4는 상기와 같이 RGB 칼라센서를 사용하여 본 연구에서 사용한 한 가지 종류의 오일 샘플에서 측정 한 신유와 사용유 상태에의 측정값들을 3가지 색상 영역에서 각각 비교한 결과의 예이다. 신유에 비하여 사용유의 경우, 오일을 통과하는 광세기가 전반적으로 감소하였고, 특히 주파수가 짧은 영역에서의 광세기 감소 현상이 상대적으로 증가함을 측정결과에서 확인할 수 있었다.

따라서 오일의 가시광선 주파수 대역에서의 천이 특성은 다음과 같은 두 가지 종류의 색채비(chromatic ratio)에 의하여 정량화 할 수 있을 것으로 사료된다.

$$CR_{blue} = \frac{\Delta I_{red}}{\Delta I_{blue}}$$

$$CR_{green} = \frac{\Delta I_{red}}{\Delta I_{green}}$$

Fig. 5는 적색 주파수 영역에서의 광세기 감소를 청색 및 녹색에 해당하는 주파수 영역에서의 광세기 감소로 각기 나누는 색채비 산출 결과로서, 주파수가 상대적으로 짧은 청색 영역에서의 색채비에서 신유와 사용유 차이가 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

따라서 상기의 결과와 같이 사용유의 가시광선 영역에서의 색채비가 변화하는 특성을 신유 상태와 비교하여 측정하면 오일의 열화가 현재 얼마나 진행되었는지를 평가할 수 있음을 알 수 있다. 또한 대상 샘플 오일의 수명에 해당하는 색채비 기준이 사전 설정되었을 경우에는 오일 사용주기 동안 사용유의 색채비를 정량적으로 측정하고 이와 비교함으로써 오일 개유를 위한 일차적인 정량적 지표로서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

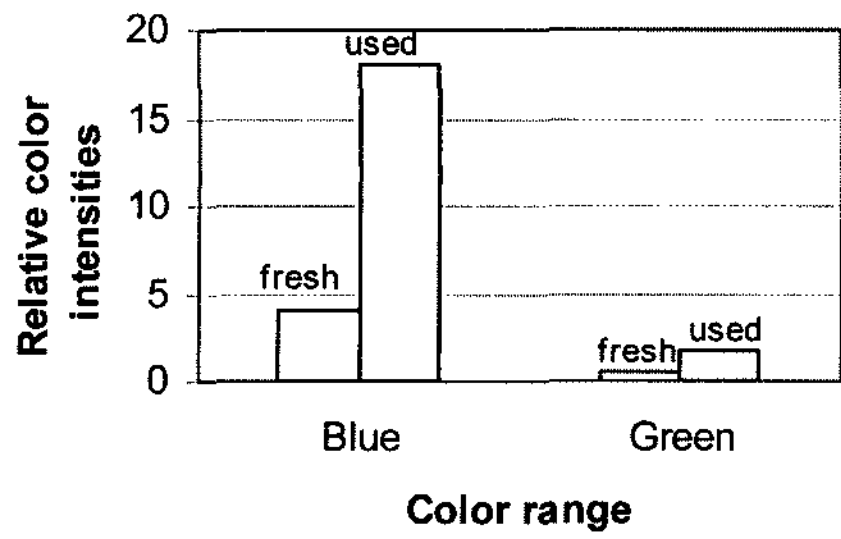


Fig. 5. Change in relative color intensities for fresh and used oils.

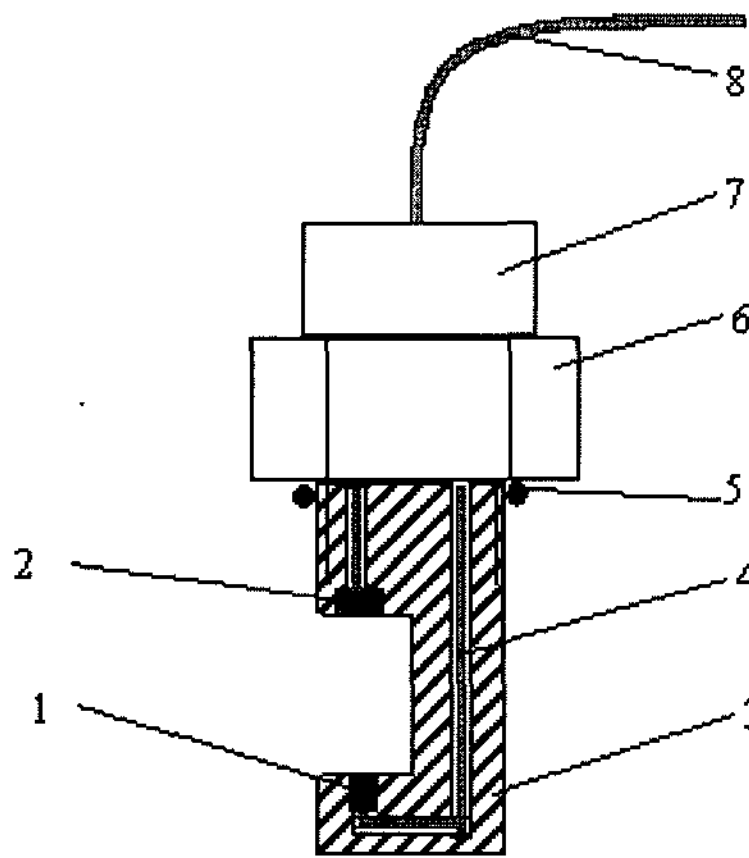


Fig. 6. CR(Chromatic ratio) detector design: 1-LED, 2-RGB sensor, 3-housing, 4-electric wire, 5-O-ring, 6-nut, 7-PCB, 8 electric cable.

Fig. 6은 본 연구 수행을 위하여 제작된 오일 색채비 측정센서의 모습을 개괄적으로 도시하고 있다. 측정하고자 하는 샘플 오일 속에 센서장치(3)를 담그면, 센서의 white LED 광원(1)으로부터의 빛이 오일 내부를 통과하여 RGB photosensor(2)에서 측정되고 센서 PCB 내의 PCB(7) 및 전선(8)를 거쳐 외부의 별도 신호처리장치 내에서 색채비를 연산하고 출력하도록 고안되어 있다[5].

3. 측정센서의 적용 결과 및 고찰

오일의 사용시간이 증가하여 열화현상이 진행되는 변화 모습이 정량적으로 잘 나타내는 지를 확인하기 위하여 제철소 현장에서 사용되고 있는 유압작동유 오일(DTE-24 oil) 샘플을 일차적으로 선정하고 사용 시간이 각기 다른 두 가지(A, B) 사용유 샘플을 채취하여 이들에 대한 색채비 값을 측정하고 비교하였다.

센서에 사용된 RGB 칼라센서 및 white LED 광원

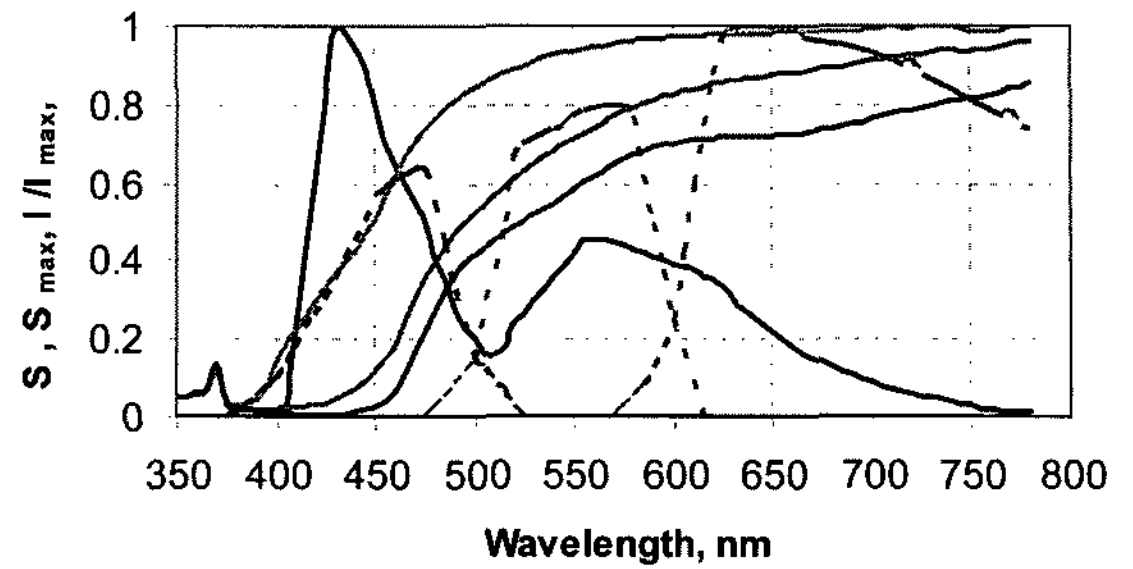


Fig. 7. Relative spectral sensitivity of RGB sensor $S_i/S_{i,max}$ (dotted line), relative spectral intensity of white LED $I_i/I_{i,max}$ (firm dark blue line) and spectral transmittance t_i of fresh hydraulic oil (yellow curve) and two oil samples A (orange curve) and B (brown curve).

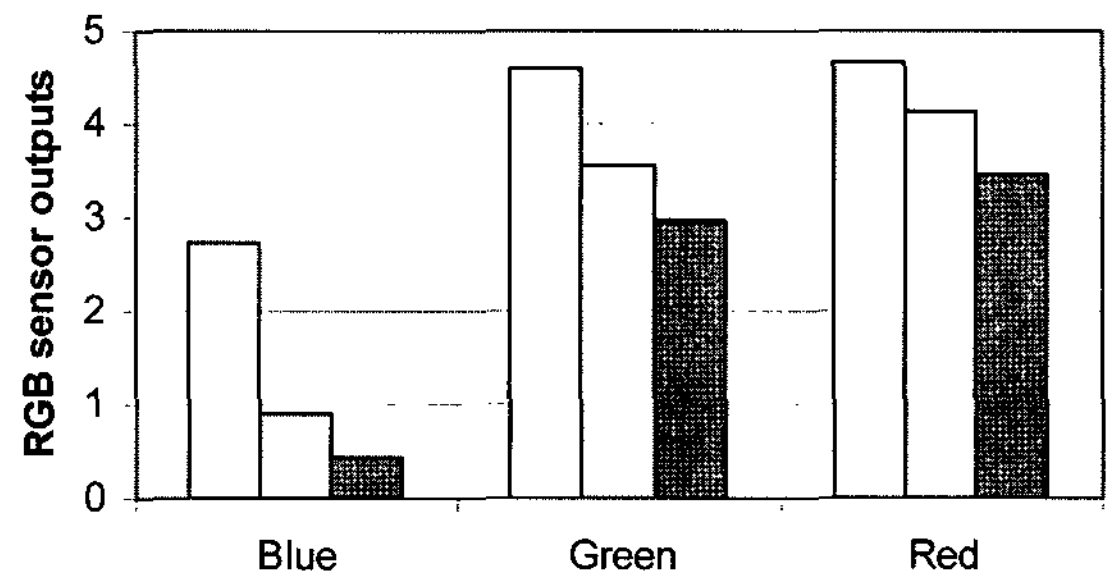


Fig. 8. Relative outputs of RGB sensor at white LED illuminating hydraulic fresh oil (yellow bar), sample A (orange bar) and Sample B (brown bar) of used oil.

의 주파수에 따른 광학적 특성과 시험 오일 샘플의 분광 투과특성들은 Fig. 7에서 나타난 바와 같다.

다음의 Fig. 8은 상기 오일 시험 샘플들을 통과하여 RGB 칼라센서에서 측정된 청색, 녹색, 적색 3가지 주파수 영역에서의 출력값들을 비교한 결과이다.

상기 측정결과로부터 오일 샘플들의 색채비 변화를 도시하면 다음 Fig. 9와 10과 같으며, 두 가지 결과 모두에서 오일의 사용시간이 증가함에 따라 본 연구에서 정의한 오일의 색채비가 비례하여 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

산업용 오일들은 사용 용도에 따라 넓은 범위의 점도를 갖는 외에도 윤활유내의 각종 첨가제들의 영향 등으로 다양한 색을 띠고 있다. 따라서 이와 같이 다양한 종류의 산업용 사용유 시료들에 본 연구 결과를 확대하여 적용하고자 하였다. 상기 시험에 적용한 오일 시료들은 제철소에서 사용되고 있는 3가지 종류의 광유계 유압작동유(T-100, Rando 32, DTE-24 oil)와

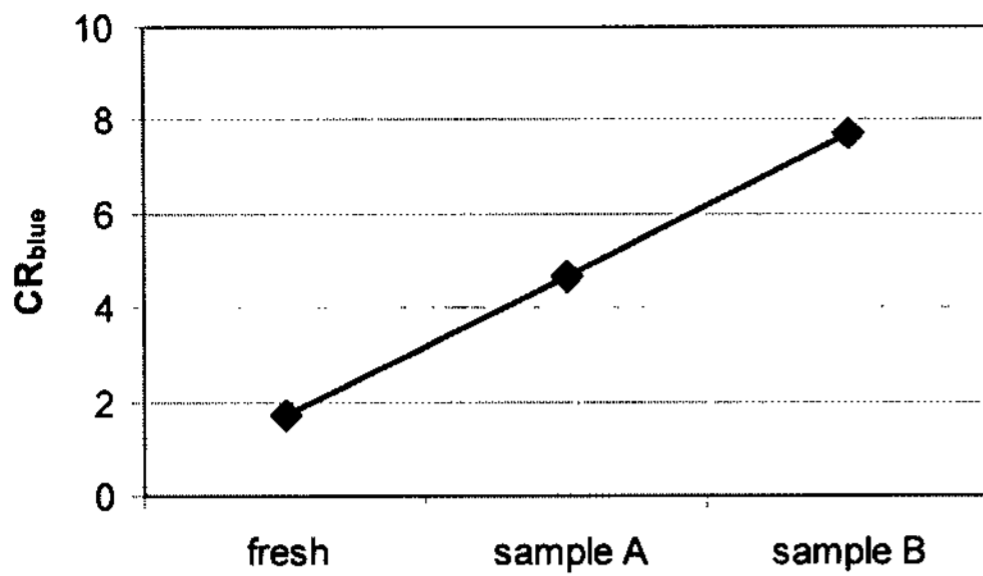


Fig. 9. Change of CR_{blue} in the course of oil degradation.

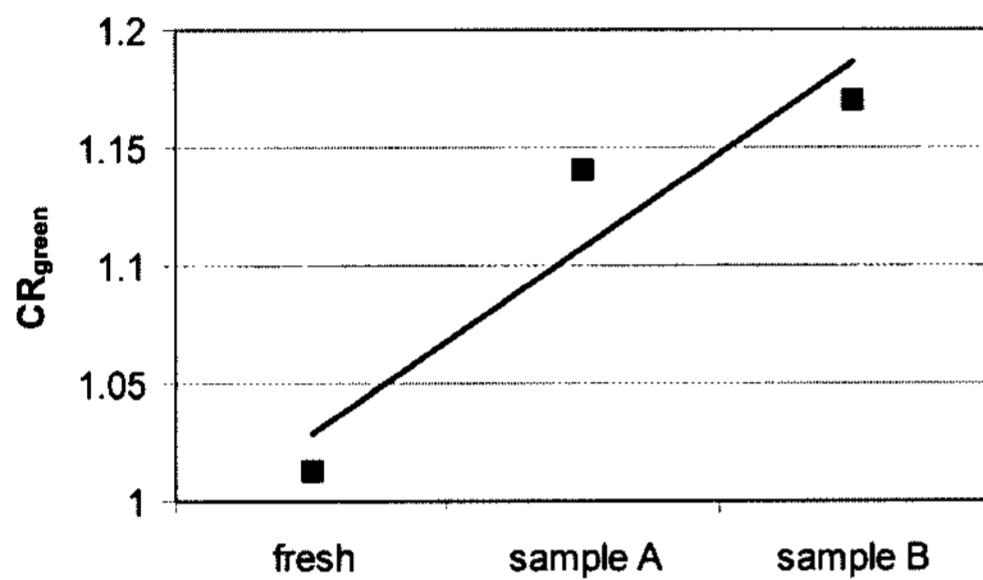


Fig. 10. Change of CR_{green} in the course of oil degradation.

합성유(HF-130) 신유 및 현장에서 일정 시간 사용 후에 시료를 채취한 사용유들이었다.

Fig. 11은 시험 오일들에의 색채비 측정결과(CR_{green})로서 오일 샘플 시료들의 전산가(TAN, Total Acid Number)를 각각 측정하여 비교하여 나타낸 결과이다. 시험 결과 모두에서 오일의 색채비와 전산가 측정값 변화 상호간에 상호 연관성이 매우 큼을 발견할 수 있어서, 오일의 색채비 변화가 오일의 열화를 판정함에 유효함을 확인할 수 있었다. 특히 Rando-32 오일 시료의 경우에는 색채비의 변화가 전산가 변화보다 상대적으로 민감하게 측정되었는데, 측정결과로부터 상기 오일의 주된 열화가 산화에 의하여 발생하였다라기 보다는 고온 열분해에 의해 발생한 가능성이 높았던 것으로 추정할 수 있었다.

실제로 상기 오일의 사용유 시료를 FTIR 분광분석기(Avadar 370)로 분석한 결과(Fig. 12)에서, 1640 cm⁻¹ 주파수 대역에서 주목할만한 peak가 발생함을 볼 수 있어서 상기 추정 결과가 타당했음을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서의 오일 색채비 측정이 기존 산업체에서 광범위하게 사용되고 있는 전산가 측정에 비하여 상대적인 장점을 갖는 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서 정의하였던 오일의 색채비가 사용유의 열

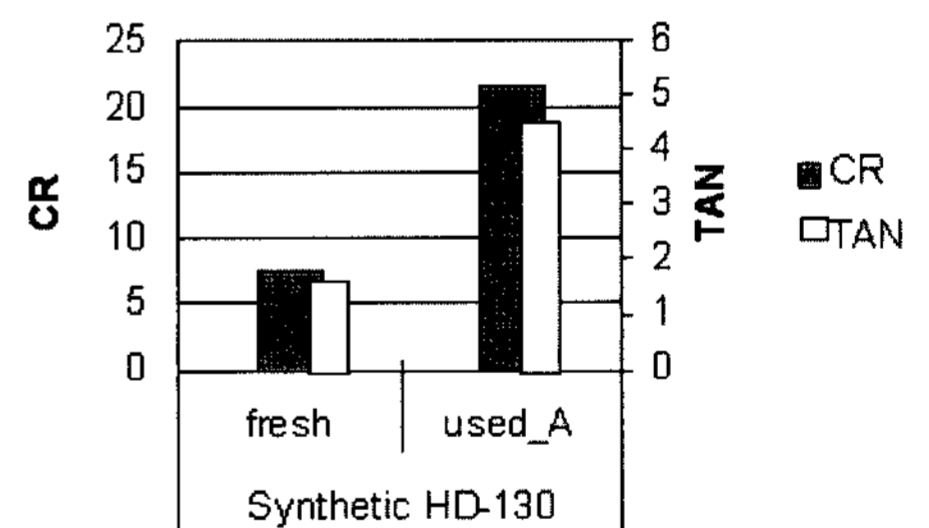
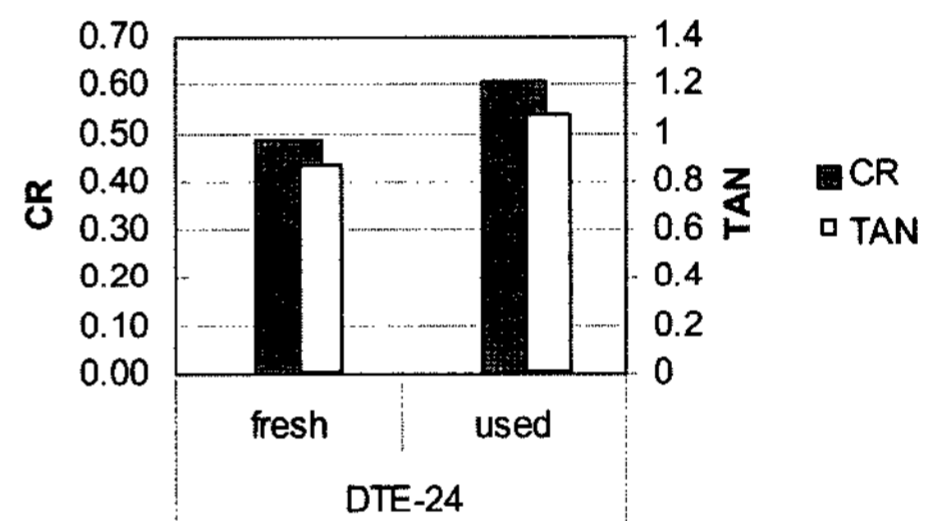
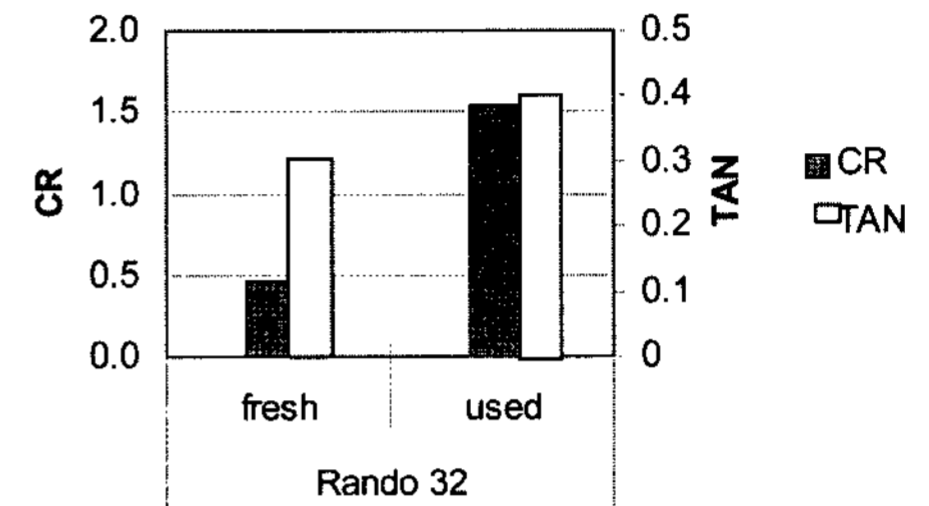
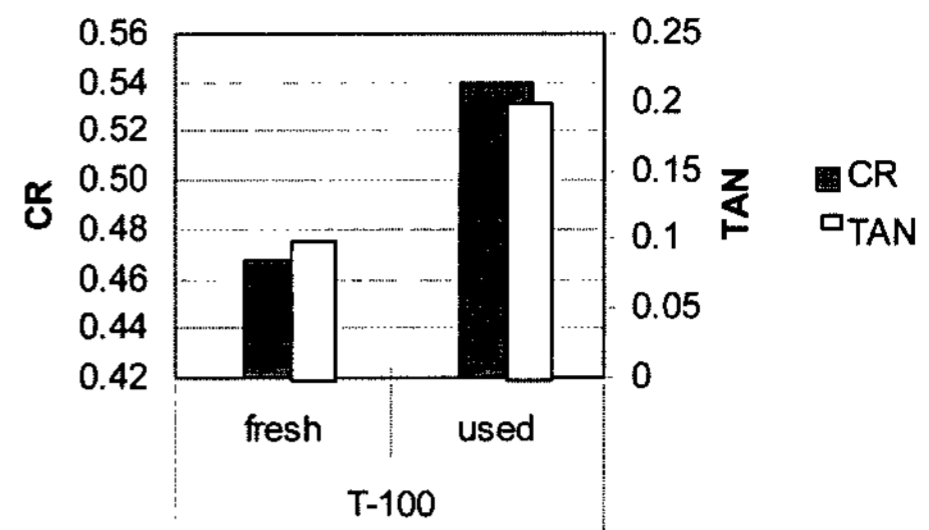


Fig. 11. Correlation between CR and TAN parameters.

화도를 판정하는 상태진단변수로서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

오일 시료의 색 변화는 위에서 언급한 바 있는 오일의 열적 열화 요인 외에도 마모발생 등에 의하여 오일에 혼입되는 물리적인 오염물에 의하여 발생할 가능성 [6]이 존재한다. 상기 요인을 다음과 같은 시험들을 통하여 실험적으로 확인하고자 하였다. 상기 시험에는 T-100 오일의 신유 및 사용유 그리고 신유와 사용유를 각각 50%씩 혼합한 3종류의 오일을 사용하였으며, 상기 오일 시료들에 ACMTD 100 ppm 및 200 ppm을

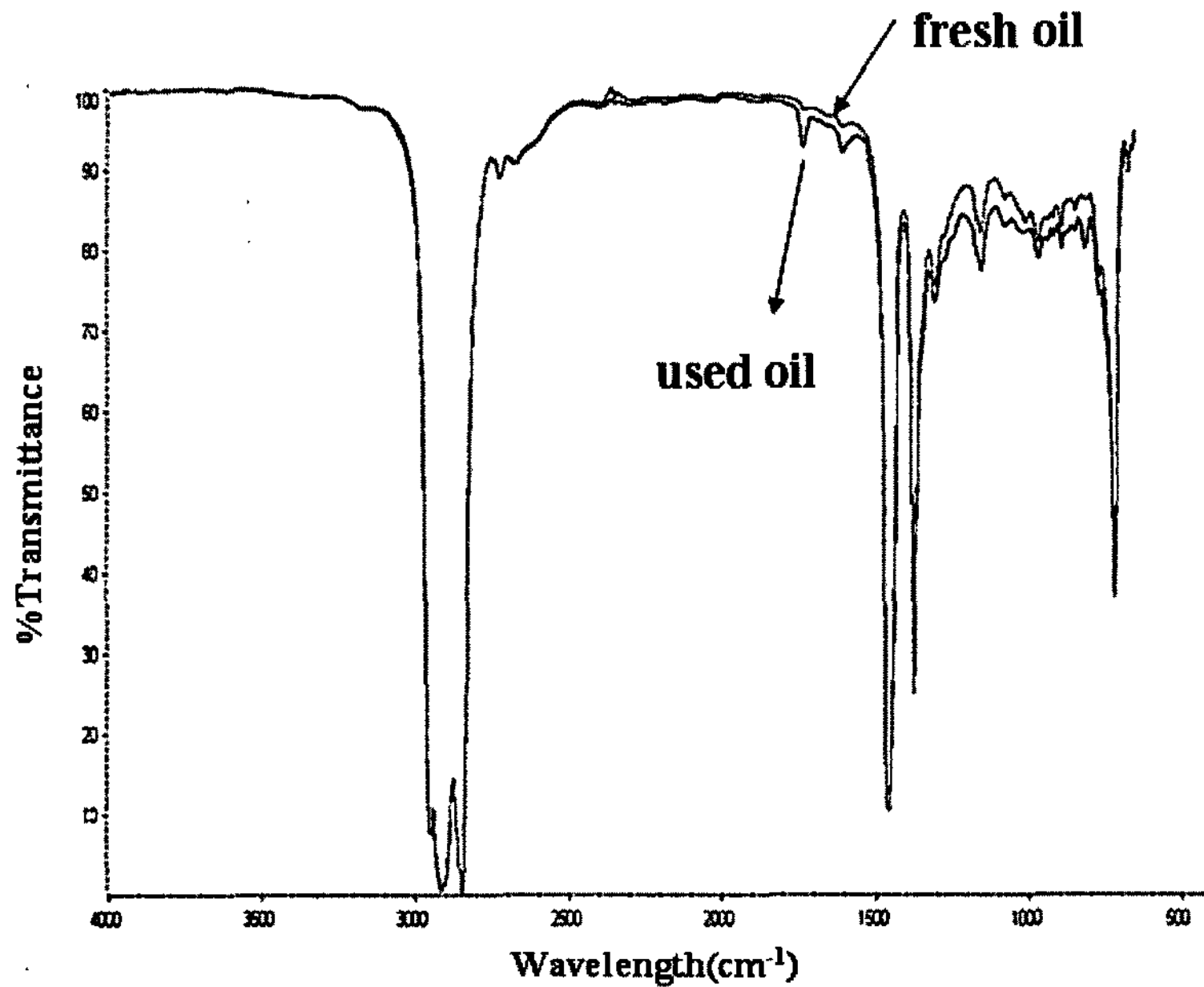


Fig. 12. FTIR transmittance spectrums of fresh(in red color plotted) and used((in blue color plotted)) hydraulic oil Rando 32.

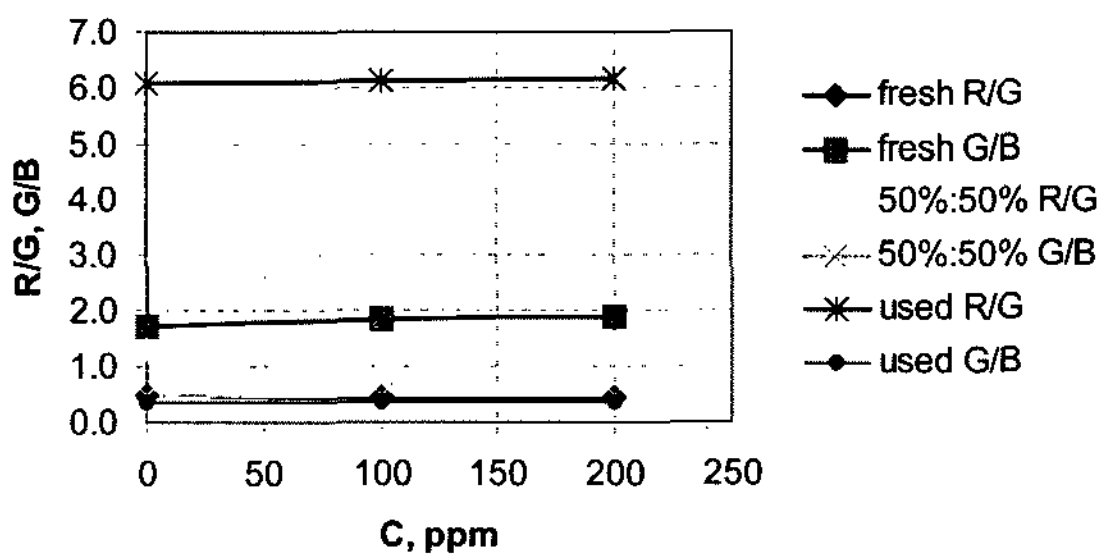


Fig. 13. Ratios of R/G (CR) and G/B in dependence on particle concentration.

혼입하여 시험 샘플을 준비하였다. Fig. 13은 상기의 시험 샘플들을 대상으로 각 시료에서의 색채비를 측정 한 결과이다.

Fig. 13에서 R/G와 G/B 색채비는 각각 적색, 녹색 및 청색 상호간의 색채비로서 이들 모두 오일에 혼입 된 물리적 오염도 조건과는 상관관계가 매우 적게 나타났다. 따라서 본 연구에서 정의한 오일의 색채비는 사용 오일의 열적인 열화요인들에 의하여 주로 변화하는 값을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 오일의 색을 광학적으로 측정하여

오일 오일의 열화 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다. 오일의 사용 시간에 따라 나타나는 주파수 특성 변화를 정량적으로 파악하기 위하여 사용유의 색채비 (chromatic ratio)로서 정의하였으며, 이를 오일 열화 판정을 위한 변수로서 활용하고자 하였다. 상기 목적을 위하여 오일의 색채비를 정량적으로 평가할 수 있는 실시간 측정센서를 개발하고자 하였으며, 이를 여러 가지 산업체 사용유 샘플들에 적용하여 실험에서 다음과 같은 주요 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 신유에 비하여 사용유의 경우, 오일을 통과하는 광세기가 전반적으로 감소하였고, 특히 주파수가 짧은 영역에서의 광세기 감소 현상이 상대적으로 증가하였다.
- 2) 오일 열화 진행에 따른 사용유의 가시광선 주파수 대역에서의 천이 특성을 RGB 칼라센서를 사용하여 청색, 녹색 및 적색 영역 상호간의 색채비(chromatic ratio) 측정에 의하여 정량화 할 수 있었다.
- 3) 다양한 사용유에 적용한 시험 결과에서 오일의 색채비와 전산가 측정값 변화 상호간에 상호 연관성이 높게 나타났다. 특히 전산가 측정으로만은 평가가 불가능했던 고온 열분해에 의하여 오일 열화가 진행될 경우에 있어서도 매우 유용한

결과를 얻을 수 있었다.

- 4) 오일의 색채비는 오일에 혼입된 물리적 오염도 조건과는 상관관계가 매우 적게 나타났으며, 사용 오일의 열적인 열화요인들에 의하여 주로 변화하는 값을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. KIST 연구보고서, 지능형 트리보 센서 및 액츄에이터 기술개발, UCE918-8243-2 (2006).
2. "Using Oil Color as a Field Test", *Practicing Oil Analysis Magazine*, November 1998.
3. Mark Barnes and Noria Corporation, "The Lowdown on Oil Breakdown", *Practicing Oil Analysis Magazine*, May2003.
4. ASTM D 1500-07 ('Standard test method for ASTM color of petroleum product (ASTM color scale)', ASTM D 1524-94 ('Standard test method for visual examination of used electrical insulating oils of petroleum origin in the field') and ASTM D 2129-05 ('Standard test method for color of clear electrical insulating liquids (Platinum-Cobalt scale).
5. '오일 열화 실시간 모니터링 방법 및 장치', 대한민국 특허출원 2006-0070869 (2006), USA patent application No. 11/640,012 (2006).
6. 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.