

흡광 광도 분석법을 이용한 기름의 두께 측정 연구

오상우[†] · 이문진

한국해양과학기술원 해양안전기술연구부

Oil Thickness Measurement by Light Absorption Analysis

Sangwoo Oh[†] and Moonjin Lee

Maritime Safety Research Division, KIOST, Daejeon, Korea

요 약

본 연구에서는 단일 파장의 빛이 기름과 해수로 구성된 혼합물을 투과하는 과정에서 굴절과 산란으로 인해 감쇠되는 빛의 세기를 평가하는 방법을 통해, 물위에 존재하는 기름의 두께를 측정할 수 있는 새로운 광학적 기름 탐지 방법론을 제시한다. 단일 파장의 광원으로 직진성이 좋고 단색광의 빛을 발산할 수 있는 레이저를 이용하였으며, 기름-물 혼합물을 투과한 빛의 세기를 정량적으로 측정하기 위해서 광 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있는 광전자소자인 포토다이오드를 선택하였다. 기름의 두께가 증가함에 따라서 투과된 빛의 크기가 점차적으로 감쇠되는 성질을 가진 광원의 파장대역을 실험적으로 도출하기 위해서, 3개의 서로 다른 파장대역을 갖는 레이저를 이용하여 기름의 두께별로 투과된 광량을 측정하여 감쇠되는 경향을 비교하는 실험을 진행하였다. 해당 실험을 통해서 470 nm 파장을 갖는 청색 레이저를 이용하였을 경우, 기름의 두께가 증가함에 따라 투과된 광량의 세기가 점차적으로 감쇠되는 현상을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 수행한 실험 결과를 통해서 레이저 광원에 대한 기름의 흡광 광도를 분석하는 방법으로 해수위에 존재하는 기름의 두께를 정량적으로 측정할 수 있는 가능성을 제시하였다.

Abstract – In this research, a novel optical measuring methodology for the measurement of oil thickness in seawater is suggested by evaluating the light absorption which is occurred in the process of penetrating through oil layer on seawater. Laser having monochromatic wave is used as a light source and photodiode which can convert the intensity of the light into an electrical signal is applied to measure the intensity of the penetrating light through the oil-water mixtures. In the experiment, bunker C and lubricating oil are used, and three different lasers having different wavelengths are applied and compared for the selection of an optimal light source. As a result, it is observed that in the case of blue laser, the intensity of the light on the optical sensor decreases with an increase in the oil thickness. Through this relation, both the presence of oil and the thickness of oil can be determined.

Keywords: Oil Thickness Measurement(기름두께측정), Light Absorption Analysis(흡광광도분석법), Blue Laser(청색레이저), Photodiode(포토다이오드)

1. 서 론

해양에서 발생한 기름 유출 사고의 확산 방지를 위해서는 기름이 유출된 위치와 기름의 종류 및 양태와 관련된 정보를 신속히 아는 것이 필수적이다. 따라서 해양에서는 정유시설 근처와 같이 기름이 유출될 가능성이 높은 지역이나 양식장 근처와 같이 기름이 유출될

경우 그 피해 규모가 큰 지역에 유출유 탐지 센서를 설치하고 이를 통하여 지속적으로 기름의 유출 여부를 모니터링 하는 방법이 사용된다. 이러한 목적으로 현재까지 다양한 방법을 이용한 유출유 탐지 센서가 개발되어 왔으며, 그 중 일부는 상용화 되어 현재 실제 해역에 배치되어 사용되고 있다. 초기 개발단계의 유출유 탐지 센서는 대규모, 고가의 시료분석 장비인 질량분석기기를 소형화하는 방법으로 개발이 진행되었다(Reeves[2000], Griffiths[2005]). 그 후 소형화를 위해서 기름에 대한 형광형상(UV Fluorescence)을 탐지원리로 하는 센서와 해수와 기름의 정전용량 차이를 탐지원리로 하는 센서

[†]Corresponding author: swoh@kiost.ac

¹⁾본 논문은 2013년에 개최된 SENSORDEVICES 2013 국제학술대회에서 발표된 논문을 근거로 하고 있음을 밝힙니다.

들이 개발되어 왔다(Henry[2001], Andrew[1997], Denkilian[2009]). 이러한 탐지방법을 기반으로 한 센서들은 기름의 농도와 성분을 분석할 수 있는 장점을 갖고 있으나, 탐지센서 내부에 장착되는 고가의 부품들(자외선 소스, 주파수 발생기, 스펙트럼 분석기 등)이 필요하므로 전체 센서의 단가가 높아지는 경제적 한계점을 갖고 있어 유실 가능성이 높은 해양 환경에 여러 곳에 설치하기에는 적합하지 않다. 또한 기름의 탐지방법에 있어 다수 개의 부품으로 구성된 센서의 경우, 해당 시스템을 구동하기 위해 필요한 전력 요구량이 크므로, 유선의 전력 공급원이 존재하지 않는 해양 환경에 단독적으로 운용되는 센서 플랫폼의 형태로 기름 탐지 센서를 구현하기에는 어려운 측면이 많다. 이러한 센서들이 갖고 있는 경제적 한계점을 극복하고자, 폴리머 물질이 기름과 접촉하였을 경우 발생하는 물리적인 변화량을 탐지원리로 하는 유출유 탐지 센서에 대한 연구 결과가 발표되었으나(MacLean[2003], Oh[2011]), 이러한 접촉식 방법의 경우, 반복적 탐지 성능 부분에 문제가 있고, 기름의 종류와 두께 등 상세한 정보를 탐지할 수 없어 실제 해양 환경에 적용하기에는 부분적인 한계점을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존에 제안된 유출유 탐지 방법의 한계점들을 극복하기 위해서, 반복적 탐지가 가능하고, 저전력으로 구동되며 저가의 탐지 부품들로 구성된 유출유 탐지 방법을 제안하였다. 반복적 탐지를 위해서 탐지 대상물인 기름과는 비접촉되는 형태로 센서를 구성하였으며, 저전력으로 구동되는 광전자소자인 레이저 광원과 포토다이오드 센서를 주요 탐지 부품으로 선정하였다. 본 연구의 이전 단계 연구로 동일한 탐지 대상인 기름을 측정하는 방법으로 LED 광원을 이용하여 기름층 아래로부터 투과된 빛의 세기를 CCD 센서로부터 획득한 이미지를 분석하는 방법이 제시되었다(Oh[2012]). 그러나 해당 연구에서 사용한 LED 광원은 빛이 분산되는 성질이 있으며 광량의 크기가 제한적이기 때문에 중유와 같이 불투명한 기름의 경우, 빛이 기름층을 투과할 수 없어, 탐지할 수 없는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기름에 대한 빛의 투과도를 높이고자 광량이 LED와 비교하였을 경우, 더 큰 광원인 레이저를 이용하였고, 투과된 기름의 광량을 측정하기 위해서 별도의 영상 분석 과정이 요구되지 않는 포토다이오드 센서를 선택하였다. 본 연구에서는 세 개의 서로 다른 파장대역을 갖는 단일파장의 레이저 광원에 대해 기름의 두께에 따른 흡수도의 차이를 실험을 통해서 분석하여, 빛의 흡수량(흡광도)을 기준으로 변별도가 있는 최적의 광원을 도출하였고, 이를 통해 본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 측정 방법론

본 연구에서 기름의 두께 측정을 위해서 도입한 방법은 성분이 다른 매질은 동일한 파장을 갖는 빛에 대해 서로 다른 흡수도를 갖고, 동일한 매질에서라도 빛이 매질을 통과하는 길이에 따라서도 흡수되는 정도에 차이가 있다는 것이다.

즉 서로 다른 매질인 해수와 기름은 특정 파장의 빛에 대해서 서로 다른 흡수도를 갖고 있고, 이 차이가 크다면 이러한 흡광도의 차이를 이용하여 기름의 존재 유무를 확인할 수 있으며, 기름을 통과하는 길이(기름의 두께에 비례)에 따라 흡수도의 변화량이 크게 발생할 경우, 이러한 관계를 이용하여 기름의 두께를 빛의 흡광도 차이를 통해서 측정할 수 있다는 것이다. 이와 같이 빛이 통과하는 길이에 따라 빛의 세기의 감소되는 관계를 설명한 것이 Beer의 법칙이다(Friedman[2003]).

$$I = I_0 e^{-az} \quad (1)$$

여기서 z = 빛의 이동거리(optical path length)

I_0 = 빛의 초기 세기(initial intensity of light)

a = 빛의 감쇠 계수(light absorption coefficient)

위의 관계식에서 빛의 감쇠 계수는 매질의 종류와 빛의 파장에 따라 달라진다. 즉 앞서 설명한 것과 같이 빛이 다른 종류의 매질을 통과할 경우, 빛의 진행함에 따라 감쇠되는 양상이 달라진다는 것이다. 또한 동일한 매질을 통과하더라도 빛의 파장에 따라 감쇠되는 양상의 차이가 난다는 것이다. 이러한 관계에 근거하여 만일 서로 다른 매질인 기름과 물에 대해서 차이가 큰 감쇠 양상을 갖는 광원을 이용할 경우 물과 기름의 존재를 구분할 수 있으며, 빛이 통과하는 길이에 따라 감쇠의 변화 정도가 큰 광원을 선택할 경우, 기름의 두께를 통과한 빛의 세기를 측정함으로써 두께를 추정할 수 있다는 것이다.

위와 제시한 탐지원리를 센서로 구현하기 위해서, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 수표면 아래 부분에 레이저 광원을 위치시키고 해수와 기름층을 통과한 빛의 광량을 광전자 센서인 포토다이오드를 통해 측정할 수 있도록 해당 소자를 수표면에 배치하였다. 이러한 탐지장치에서 기름에 대해서 높은 흡수도를 갖고 있으며, 기름층에 따라서 흡수되는 양상이 선형적인 특징을 갖고 있는 파장대역의 레이저를 사용할 경우, 기름의 두께가 증감됨에 따라서, 포토다이오드에 입사되는 빛의 세기가 점차적으로 감소될 것이다. 따라서 기름의 두께에 따라 달라지는 포토다이오드의 출력신호를 측정함으로써, 해수 위에 존재하는 기름의 두께 정보를 측정할 수 있다.

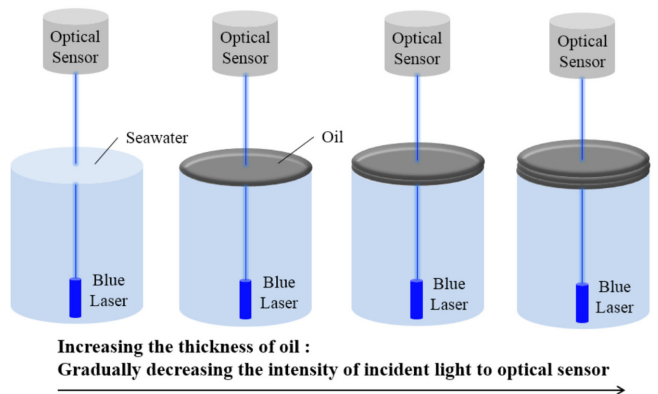


Fig. 1. Schematics to describe a sensing mechanism.

2.2 서로 다른 파장을 갖는 레이저 광원의 기름에 대한 흡수도 비교 실험

해수와 물에 대해서 흡수되는 광도의 차이가 크며, 기름층의 두께가 증가함에 따라서 흡수되는 정도가 선형적으로 변화하는 파장 대역의 레이저를 실험적으로 도출하기 위해서, 본 실험에서는 Fig. 2에서 제시한 것과 같이, 파장이 다른 세 가지의 레이저 광원을 이용하여, 각각의 광원에 대해서 기름의 두께를 증가하면서 투과된 레이저 빛의 세기를 포토다이오드를 통해서 측정하는 방법으로 실험을 진행하였다. 본 실험에 사용한 레이저 광원으로는 가시광선 대역의 레이저 중 대표적인 세 가지 파장대역인 파란색, 녹색, 빨간색 대역을 갖는 레이저를 선택하였고, 이들 레이저가 갖는 주 파장은 청색 레이저 473 nm, 녹색 레이저 532 nm, 적색 레이저 650 nm 이다. 레이저 광원의 빛에 대한 흡광 광도만을 포토다이오드로 측정하기 위해서, 본 실험은 자연광과 인공광과 같은 외부로부터 입사되는 빛의 영향을 배제하기 위해서 암실에서 진행되었다. 물은 해수를 사용하였으며, 기름은 두 종류인 윤활유와 병커 C유(type A)를 선택하였다. 본 실험에서 사용된 두 기름은 해상에서 선박 사고로 인해서 유출될 가능성이 크며, 유출될 경우 해양 환경에 미치는 영향이 큰 종류이다. 기름의 종류에 따라 빛의 세기 측정에는 두 종류의 포토다이오드가 사용되었다.

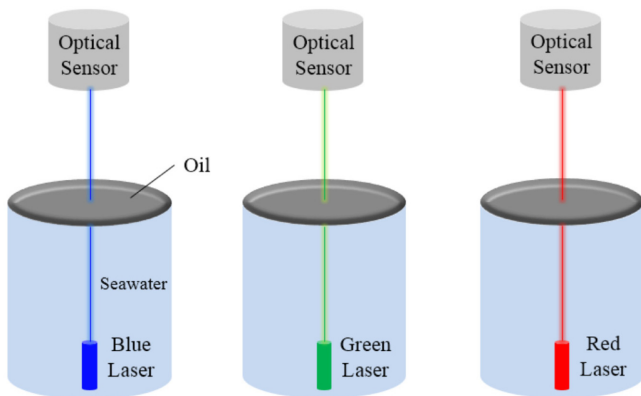


Fig. 2. Experimental setup for select a laser as an optimal wavelength light source for oil spill detection.

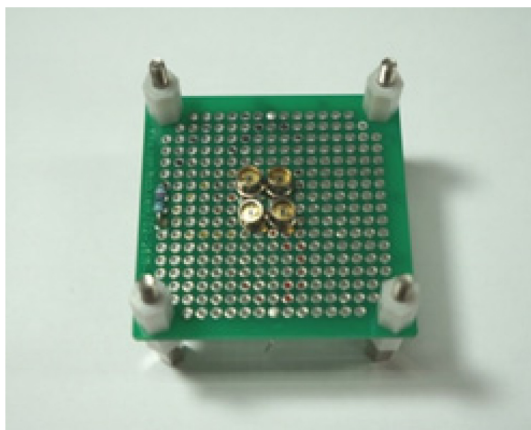


Fig. 3. Optical sensor used in the bunker C oil measurement.

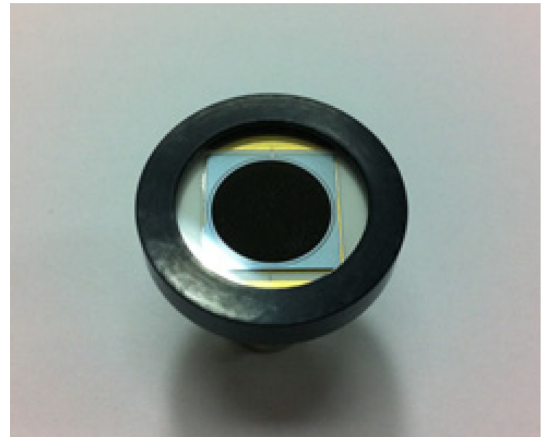


Fig. 4. Optical sensor used in the lubricating oil measurement.

병커 C유를 대상으로 한 실험에 사용된 광센서는 2×2 포토다이오드 어레이(Fig. 3)로 4개의 포토다이오드를 이용하여 감광면적을 넓히기 위한 목적으로 본 실험을 위해서 제작되었다. 병커 C유를 통과한 빛은 투명한 종류의 기름을 통과한 빛에 비해 빛이 회절되는 정도가 크다. 따라서 본 연구에서는 투과한 빛의 회절성질을 고려하여 광센서의 감광면적을 넓히고자 하였다. 해당 센서는 빛의 세기에 비례하여 전압을 0.8 V에서 5.0 V 범위까지 출력으로 내보내며, 작동을 위한 공급전압은 5.0 V 이다. 해당 실험은 레이저 광원을 컨상 상태에서 1) 물만 존재할 경우, 2) 물위에 기름이 0.5 mm 존재할 경우, 3) 물위에 기름이 1 mm 존재할 경우, 4) 물위에 기름이 1.5 mm 존재할 경우, 5) 물위에 기름이 2.0 mm 존재할 경우로 구분하여, 각각의 경우에 대해서 투과된 빛의 세기를 2×2 포토다이오드 어레이 센서를 통해 측정하였다. 광원과 물의 상층부(물-기름 분리층)와의 거리는 5 cm를 유지하였고, 동일한 조건에서 총 5번을 측정하여 그 결과를 기록하였다.

두 번째 실험인 윤활유를 대상으로 한 실험에서는 단일 소자로 구성된 광기전성 포토다이오드(Fig. 4)를 이용하여 액체를 투과한 빛의 세기를 측정하였다. 윤활유는 병커 C유에 비해 기름 층의 두께가 두꺼워짐에 따라 감소되는 빛의 세기 변화량이 작다. 따라서 병커 C유 측정 실험에서 사용한 광센서를 이용할 경우 분해능에 한계가 있어 빛의 세기 변화량을 측정할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 고분해능을 갖고 있는 광센서인 광기전성 포토다이오드를 선택하였다. 해당 센서는 공급전압이 없는 조건에서 구동하며, 전류형태의 출력을 내보낸다. 실험에서의 기름 두께의 증분은 1 mm로 하여, 0 mm 부터 4 mm 두께까지 총 5가지의 샘플에 대해서 5번 측정하여 그 결과를 기록하였다. 실험은 첫 번째 실험과 동일한 조건인 암실에서 진행되었으며, 물의 상층부와 광원과의 거리는 5 cm, 물의 상층부와 광센서와의 거리는 5 cm로 설정하였다.

2.3 실험 결과

병커 C유의 두께 변화량에 따라 서로 다른 파장을 갖는 세 개의 레이저 광원의 투과된 광량 측정 실험 결과는 Fig. 5, 6, 7과 같다.

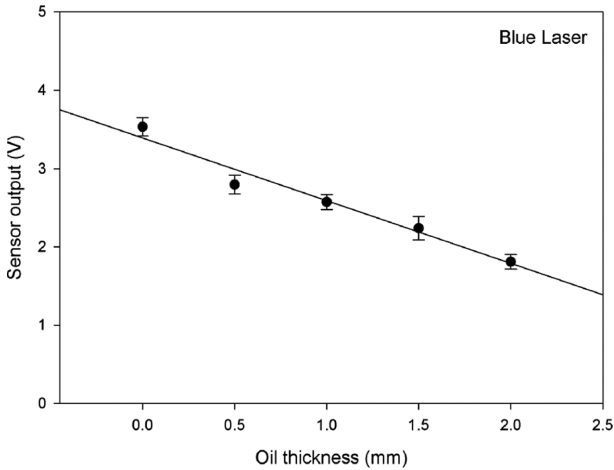


Fig. 5. Sensor output results using a blue laser in bunker C oil.

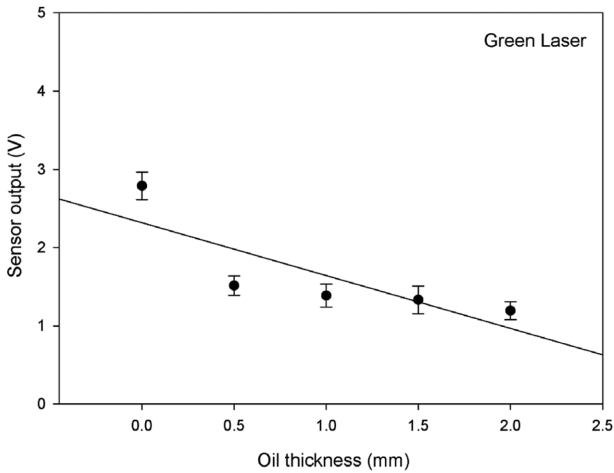


Fig. 6. Sensor output results using a green laser in bunker C oil.

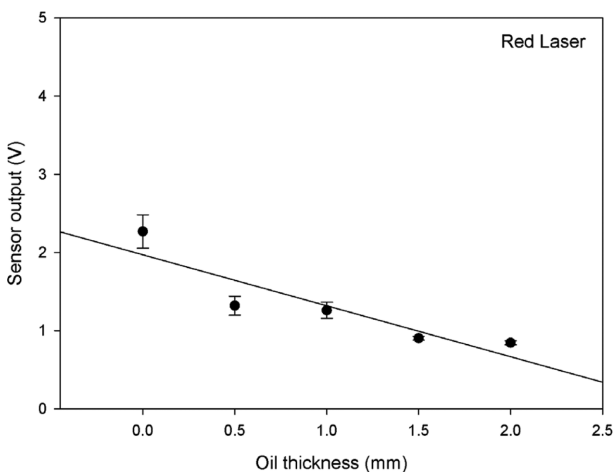


Fig. 7. Sensor output results using a red laser in bunker C oil.

세 개의 레이저 광원의 경우, 모두 해수만 존재할 경우 투과된 빛의 광량과 기름이 0.5 mm 두께로 존재할 경우 투과된 빛의 광량의 차이가 큰 것으로 나타났다. 하지만 녹색 레이저와 적색 레이저를 이

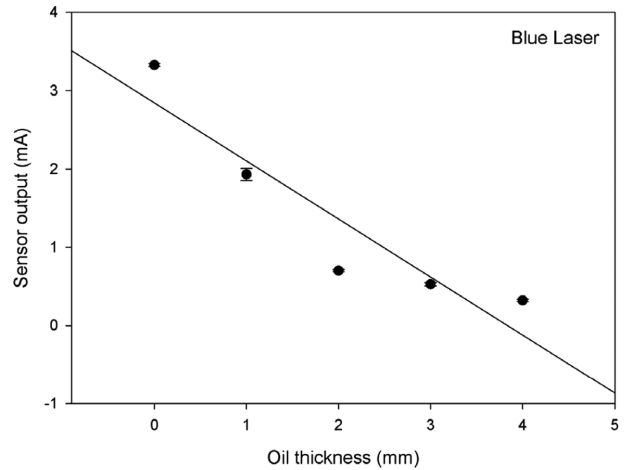


Fig. 8. Sensor output results using a blue laser in lubricating oil.

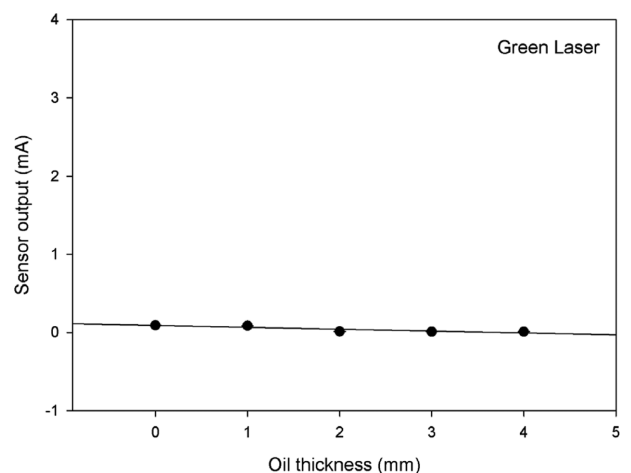


Fig. 9. Sensor output results using a green laser in lubricating oil.

용한 실험에서는 기름층의 두께가 증가함에 따라 감소되는 정도의 차이가 크지 않고 관계가 선형적이지 않으므로 빛의 세기를 이용하여 기름의 두께를 측정할 수는 없었다. 그러나 이들 두 광원과는 다르게, 청색 레이저의 경우, 기름의 두께가 점차적으로 증가함에 따라 투과된 빛의 세기가 점차적이며 선형적으로 감소되는 경향을 보였다. 따라서 병커 C유의 경우, 청색 레이저를 이용하여 투과된 빛의 세기를 측정함으로써 기름의 존재 뿐 만 아니라 기름의 두께도 측정할 수 있다고 판단된다.

두 번째 실험인 윤활유를 이용하여 두께가 변함에 따라 세 개의 레이저 광원의 투과된 광량 측정 실험 결과는 Fig. 8, 9, 10과 같다. 해당 실험 결과는 병커 C유를 이용한 실험 결과와 다르게 녹색 레이저와 적색 레이저의 실험에서는 모든 구간에서 투과된 빛의 세기가 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만 청색 레이저의 경우, 첫 번째 실험결과와 동일하게 기름의 두께가 점차적으로 증가함에 따라 투과된 빛의 세기가 점차적이며 선형적으로 감소되는 경향을 보였다. 따라서 윤활유의 경우에도 청색 레이저를 이용하여 투과된 빛의 세기를 측정함으로써 기름의 존재 뿐 만 아니라 기름의 두께도 측

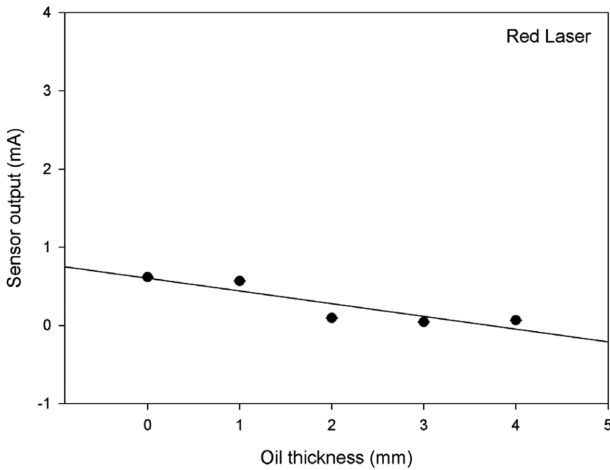


Fig. 10. Sensor output results using a red laser in lubricating oil.

정할 수 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서 수행한 실험을 통해서 473 nm 파장대역을 갖는 청색 레이저를 이용하면 기름의 두께에 따라 선형적으로 변하는 빛의 흡수도 차이를 이용하여, 기름의 존재 여부와 기름의 두께 측정할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 해양에 유출된 기름의 두께를 측정하기 위한 탐지 센서를 개발하기 위해서, 기름의 두께에 따라 변하는 특정 파장대역의 빛의 흡수도의 차이를 측정원리로 한 탐지방법을 제안하였다. 기름의 두께 증가에 따라 흡광도가 점차적이고 선형적으로 변화하는 광원을 실험적으로 도출하기 위해 세 개의 다른 파장대역을 갖는 레이저 광원을 이용하여 기름의 두께 변화에 따른 흡광도를 두 종류의 기름에 대해서 각각 측정하였고 이를 평가하였다. 본 연구에서 수행한 실험을 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 제시한 기름에 대한 선택적 흡광도의 차이를 이용한 방법을 적용하면, 기름의 두께가 변함에 따라서 기름층에 흡수되는 광원의 흡수도가 차이가 나며, 이를 포토다이오드를 통해서 전기적 신호로 측정할 수 있으므로, 기름의 두께 정보를 확인할 수 있다.

(2) 세 가지의 서로 다른 파장대역을 갖는 광원들을 이용한 비교 실험을 통해서, 청색 레이저를 이용할 경우, 본 연구에서 선택한 두 개의 기름(벙커 C유, 윤활유)에 대해서 기름의 두께가 증가함에 따라 기름층에 흡수되는 빛의 양이 가장 선형적으로 변함을 확인할 수 있다.

(3) 다양한 해양환경 조건을 고려한 추가적인 실험과 본 연구에서 제안한 실험방법을 구현할 수 있는 센서 플랫폼을 추가적으로 연구한다면, 제안된 탐지방법을 실제 해양환경에서 유출유 탐지 센서로 활용할 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원에서 주요연구사업으로 수행하고 있는 “3차원 유출유 확산예측 기반 해양유류오염 방제 지원기술 개발”과제와 “주요 위험유해물질(HNS) 유출 거동예측 및 대응정보 지원기술 개발”과제의 연구결과 중 일부임을 밝힌다.

참고문헌

- [1] A. MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, P. Parker, 2003, “Detection of hydrocarbon fuel spills using a distributed fibre optic sensor”, *Sensors and Actuators A*, vol. 109, 60-67.
- [2] C. Henry, P.O. Roberts, 2001, “Background fluorescence values and matrix effects observed using smart protocols in the Atlantic ocean and Gulf of Mexico”, *International Oil Spill Conference*, Florida, 1203-1207.
- [3] E. Friedman, J. Miller, 2003, *Photonics Rules of Thumb*, 1st ed., SPIE Press, McGraw Hill, 220-240.
- [4] G. Griffiths, 2005, “Review of oceanographic equipment and sensors for the detection and measurement of pollutants”, *Southampton Oceanography Center Research and Consultancy Report*, No. 99, 1-24.
- [5] G. Reeves, 2000, “Introduction to hydrocarbons and monitoring”, Arjay Engineering Ltd., *Common HydroSense Questions and General Information Guide*, 2-8.
- [6] H. Denkilkian, R. Ohannessian, M. Joujou, A. Chehab, I. Elhadj, 2009, “Wireless Sensor for Continuous Real-Time Oil Spill Thickness and Location Measurement”, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 12, 4001-4011.
- [7] J. Andrews, 1997, “Automated marine oil spill detection system development update”, *Marine Environmental Update*, 97(1), US Navy SPARWAR Systems Centre.
- [8] Oh, S., Lee, M., Choi, H., 2011, “Development of Hydrocarbon Oil Detection Sensor using the Swelling Property of Silicone Rubber”, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 14, No. 4, 280-286.
- [9] Oh, S., Lee, M. 2012, “Oil Spill Detection Mechanism using Single-wavelength LED and CCD”, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 15, No. 4, 323-329.

2013년 11월 6일 원고접수

2013년 11월 18일 심사수정일자

2013년 11월 20일 게재확정일자