

기름에 대한 실리콘의 부피 변화 성질을 이용한 유출유 탐지 센서 개발

오상우[†] · 이문진 · 최혁진
한국해양연구원 해양안전·방제기술연구부

Development of Hydrocarbon Oil Detection Sensor using the Swelling Property of Silicone Rubber

Sangwoo Oh[†], Moonjin Lee and Hyeukjin Choi

Korea Ocean Research and Development Institute,
32 1312beon-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

요 약

본 연구에서는 기름에 대한 실리콘의 선택적 반응 현상을 이용하여 해상에 유출된 기름을 탐지하는 방법과 이를 적용한 센서의 특성을 실험적으로 분석한 결과를 제시한다. 기름을 탐지하기 위한 방법으로는 기름과 접촉시 실리콘 고무의 부피가 변화되는 성질을 이용하였으며 이를 정량적으로 측정하기 위해서 스트레인 게이지와 실리콘 고무가 결합된 새로운 형태의 센서 코어를 제안하였다. 기름의 종류별 센서 코어의 특성 실험을 통해 유출유 탐지 센서로 사용이 가능함을 확인하였고, 해당 센서의 실해역 적용을 위해서 부이형태의 센서 플랫폼을 센서 코어 및 스트레인 게이지와 통합시켜, 기름 유출이 모사된 조건에서 기름을 탐지하는 실험을 통해 여러 종류의 기름의 존재 유무를 탐지할 수 있는 센서로 활용할 수 있음을 보였다.

Abstract – In this research, the oil detection method and the characteristic of sensor using the selective reaction of silicone rubber in response to hydrocarbon oil will be described. As a sensing principle, the swelling property of silicone rubber in response to hydrocarbon fuel is used, also a strain gauge is used to transduce the volume change to an electrical signal. The sensor core is manufactured with a strain gauge embedded in silicone rubber by the curing process and experiments for characteristics of sensor core with various oils were carried out. It is shown that the sensor core can be used as an oil spill detection sensor. Also, for the application to the sea area, a buoy type sensor platform is integrated with a sensor core and a strain amplifier and it is tested in the simulated oil spill condition. In this study, it is proven that the integrated sensor can be used for the detection of various oils.

Keywords: Oil Spill Detection Sensor(유출유 탐지 센서), Silicone Rubber(실리콘 고무), Strain Gauge(스트레인 게이지), Buoy Type Sensor(부이 형태 센서), Hydrocarbon Oil(유류계 탄화수소)

1. 서 론

해상에서의 기름 유출 사고는 해양에서 서식하는 모든 생태계와 해양수산자원을 이용하는 인간에게 직접적인 피해를 주며, 원래의 상태로 회복되는데 오랜 시간을 요구하는 치명적인 사고이다. 기름의 유출로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 사고 시점을 정확히 파악하고 신속히 대처하는 것이 중요하다. 따라서 해양에

서 유출유의 존재 유무를 지속적으로 모니터링할 수 있는 기술 및 방법의 개발이 요구되며, 이를 위해 다양한 탐지 원리가 적용된 센서가 개발되고 있다. 해상에 유출된 기름을 탐지하는 방법으로는 크게 원거리에서 전자기파를 방출하여 특정 파장대역에 대한 기름의 반사·흡수 특성을 탐지 원리로 하는 원격탐지기술(Remote sensing technology)과 기름이 유출된 장소에서의 물리적 변화를 감지하여 기름의 존재를 확인하는 현장탐지기술(In situ sensing technology)로 구분할 수 있다(Jha *et al.*[2008]; Griffiths[2005]). 원격탐지기술은 한 번에 넓은 지역의 기름 존재 유무를 파악할 수

[†]Corresponding author: swoh@moeri.re.kr

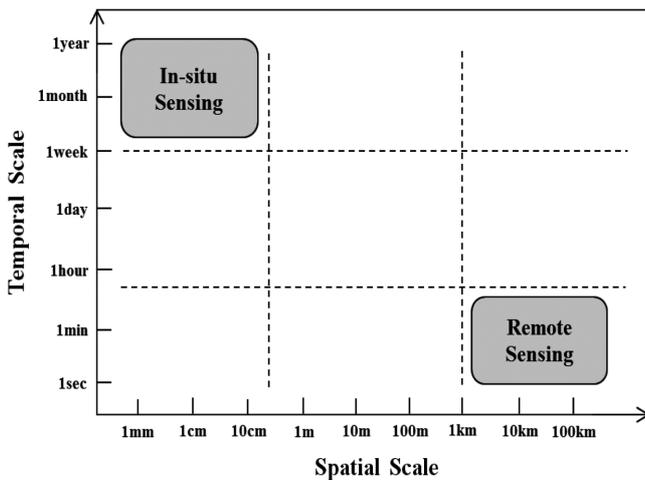


Fig. 1. Comparison of in-situ and remote sensing technologies.

있는 장점을 갖고 있으나, 주로 센서가 위성, 비행기 등에 탑재되므로 시간적으로 연속성이 있는 정보를 확보하기 어려우며 유출 시점을 실시간으로 파악하기에는 한계가 있다(Fig. 1). 이와 반대로 현장탐지기술은 탐지할 수 있는 영역은 제한적이거나, 시간적으로 연속성이 있는 정보를 확보할 수 있으며 유출 시점을 지속적으로 탐지(Online sensing)할 수 있는 장점을 갖고 있다(Prien[2007]). 이와 같은 이유로 원격탐지기술은 해양에서 기름이 유출된 지역을 알고 있는 상태에서, 해상에 존재하는 기름의 전체적인 형태 및 양상을 파악하는 데 주로 이용되며, 현장탐지기술은 원유 정제 시설과 같이 기름 유출 가능성이 큰 지역이나, 양식 어장과 같이 기름이 유출될 경우 피해가 상대적으로 큰 지역에서 지속적으로 유출여부를 모니터링하는 용도로 구분되어 적용된다.

유출유 현장탐지기술의 개발과 관련하여 초기에는 실험실에서 기름 분석에 사용되는 질량분석기법을 이용한 센서의 개발이 시도되었으나, 이러한 탐지방법은 물과 기름을 분리하는 전처리 과정이 요구되며 결과를 도출하는데 까지 걸리는 시간이 오래 걸리는 단점이 있어 신속한 결과 도출이 요구되는 분야에는 사용에 한계를 갖고 있다(Reeves[2000]). 이러한 단점을 보완하기 위해서 전처리 과정이 필요 없는 방법으로 자외선 형광 분석법(UV fluorescence)을 이용한 유출유 탐지 센서가 제안되어, 수중 및 수상에서의 기름 탐지가 가능한 플랫폼 형태로 제안되었다(Andrew [1997]; Henry and Roberts[2001]). 그러나 이러한 방법 역시 자외선 발광 소스와 스펙트럼 분석기 등 여러 부품들이 필요하며, 이에 소비되는 전력이 커서 단독 플랫폼 형태로 해상에서 오랜 시간동안 유지되기 어렵고, 고가의 제작 비용이 요구되어 분실 등의 우려가 있는 해상에 다수의 센서 플랫폼을 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 현재까지 제안된 유출유 탐지 센서의 단점을 보완하기 위해 유수 분리 등의 전처리 과정을 요구하지 않고, 센서 구성에 필요한 부품이 상대적으로 저렴하며 저전력의 소비 특성을 갖는 탐지 방법이 적용된 유출유 탐지 센서를 제안한다.

본 연구에서는 해당 센서의 탐지 메커니즘에서 중요 역할을 하

는 실리콘 고무(Silicone rubber) 재질의 센서 코어(Sensor core)를 제작하였으며, 센서 코어의 기름의 종류에 따른 부피 변화 정도를 실험을 통해 측정하였다. 또한 실험역 적용을 위해서 부이 형태의 센서 플랫폼을 설계·제작하였으며 센서 플랫폼에 센서 코어와 계측기를 통합시켜, 기름 유출이 모사된 조건에서 기름을 탐지하는 실험을 수행하였다. 수행한 실험 결과를 통해서 제안된 센서의 유출유 탐지 센서로의 적용 가능성을 알 수 있다.

2. 센서 코어

본 연구에서 제안하는 유출유 탐지 센서는 실리콘 고무와 기름(유류계 탄화수소)이 접촉할 때 부피가 팽창하는 성질을 탐지원리로 이용한다(ShinEtsu[2005]). 유사한 탐지원리를 적용한 연구로는 광섬유에 폴리머를 코팅하고 그 위에 나선형 줄을 감아, 폴리머 재질이 기름과 접촉할 때 발생하는 부피 팽창으로 인해 유발되는 마이크로벤드 현상(Microbend effect)을 OTDR(Optical time domain reflectometer)로 측정하는 사례가 있다(MacLean *et al.* [2003]). 해당 연구는 육상 송유관의 긴 영역에 대한 유출유 탐지에 적용하기 위한 것으로, 이를 해양의 현장탐지센서로 이용하기에는 그 형태 및 측정 방법 등이 적합하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 해상에 기름이 유출될 경우 해수 위에 형성되는 미량의 기름도 탐지할 수 있도록, 실리콘 고무와 기름의 접촉으로 인한 작은 부피 변화를 효과적으로 탐지할 수 있는 실리콘 고무 내부에 스트레인 게이지가 포함되어 경화된 새로운 형태의 트랜스듀서인 센서 코어를 개발하였다. 기름에 의한 부피 변화를 전기적인 신호로 변환하는 역할의 센서 코어에는 금속계통 구조물의 미세 변형률을 측정하는데 주로 사용되는 금속박막 스트레인 게이지(Metal-foil strain gauge)를 사용하였으며, 이는 측정 대상물 길이의 0.01%에서 0.001%의 변형 까지 측정할 수 있어 미량의 기름 접촉에 의한 작은 부피 변화도 감지해 낼 수 있는 장점이 있다. 또한 스트레인 게이지의 변화량(전기저항 변화)을 측정하는 스트레인 계측기는 증폭기와 브리지 회로(Bridge circuit)가 집적된 형태로 소형화 할 수 있으므로, 해상에서 현장탐지형태로 적용하기에 적합하며 전력소비가 작아 기존에 제안된 현장탐지센서에 비해서 긴 작동시간을 갖는 장점이 있다.

센서 코어의 변환(부피변화→저항변화) 효율을 높이기 위해서 실리콘 고무의 부피 변화를 스트레인 게이지에 효과적으로 전달되는 구조가 필요하며, 이를 위해서는 두 물질 간에 물리적으로 잘 결합되어야 한다. 이러한 조건을 구현하기 위해서 본 연구에서는 센서 코어 형상의 틀에 액상의 실리콘을 스트레인 게이지와 함께 붓고 이를 경화시키는 방법을 사용하였다. 센서 코어의 틀로는 원통형태의 지름 2.5 cm, 높이 4 cm를 갖는 폴리에틸렌 계열의 플라스틱 용기를 사용하였으며, 액상의 실리콘은 ShinEtsu사의 KE-1606을 사용하였다. 스트레인 게이지는 Hottinger Baldwin Messtechnik사의 저항 350 Ω, 그리드 길이 6 mm의 제품을 이용하였고, 스트레인 게이지의 길이방향을 원통형 틀의 상·하 방향으

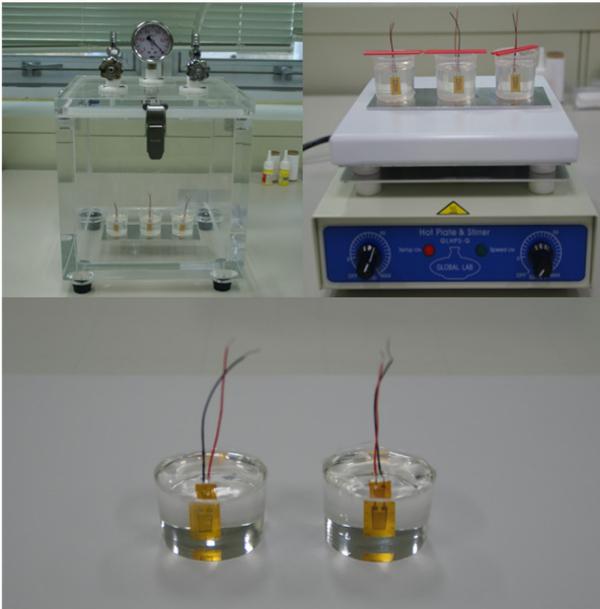


Fig. 2. Manufacturing process of sensor core. Top left: Curing process in vacuum desiccator, Top right: Curing process in hot plate, Bottom: Cured sensor cores.

로 향하게 하고 원통의 중심에 위치한 후 고정된 상태에서 경화시켜, 실리콘 부피 변화의 전달 효율을 높일 수 있는 구조로 제작하였다. 실리콘의 효과적인 경화를 위해서, 액상 실리콘(ShinEtsu KE-1606)과 경화제를 부피 기준 10대 1의 비율로 혼합한 후, 진공 데시케이터(Vacuum desiccator)를 이용하여 0.05 bar와 0.5 bar 사이의 진공 압력을 1분 간격으로 20회 가·감압의 변화를 주어 실리콘의 경화과정에서 발생하는 기포를 제거하였다. 그 후 가열판에서 50 °C로 10분간 가열한 후 상온에서 5시간 동안 자연 경화시키는 과정을 거치는 것으로 센서 코어의 제작을 완료하였다(Fig. 2).

이와 같은 과정을 통해서 제작된 실리콘-스트레인 게이지의 결합체인 센서 코어는 기름과의 접촉을 통해 실리콘의 부피가 변할 경우, 원통의 길이 방향 또는 반지름 방향으로의 변형이 생기게 되어 스트레인 게이지에는 인장 또는 압축 변형이 발생되므로 스트레인 값의 측정을 통해 센서 코어와 기름의 접촉 여부를 판단할 수 있다.

3. 센서 코어의 기름에 대한 반응 실험

제작된 센서 코어의 기름 종류에 따른 부피 변화 정도를 실험적으로 판단하기 위해서 본 연구에서는 정제된 기름 중 일반적으로 사용량이 많은 종류인 휘발유, 디젤유, 윤활유를 이용하여 실험을 진행하였다. 이 세 종류의 기름은 선박의 엔진기관에 주로 사용되는 것으로 선박 사고에 의한 기름 유출 시, 유출될 가능성이 큰 기름의 종류이다.

해당 실험은 세 종류의 기름이 담긴 100 mL 부피의 용기에 센서 코어를 넣고 30분 동안 변화되는 스트레인의 변화량을 측정하

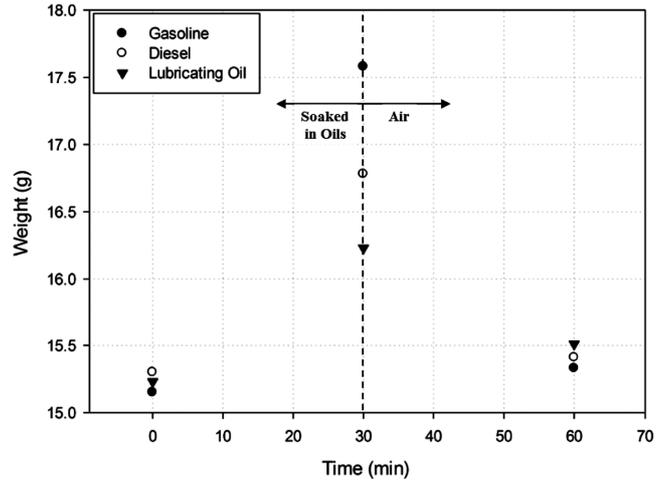


Fig. 3. Weight changes of silicone cores soaked in different kinds of oils.

는 실험과 기름 접촉전과 30분 경과후의 무게 변화를 측정하는 실험으로 진행되었다. 실험에 사용된 휘발유와 디젤유는 SK에너지의 제품을 이용하였고, 윤활유는 Total Quartz의 5W30 제품을 사용하였다. 스트레인의 측정에는 Hottinger Baldwin Messtechnik사의 MGCPLUS의 ML801 계측모듈을 이용하여, 4와이어 - 폴 브리지의 연결방식으로 샘플링 속도는 초당 10번으로 설정하였다. 센서 코어의 기름 접촉 전과 접촉 30분 후의 무게 변화를 측정하기 위해서 분해능이 0.01 g인 AND사의 CB-200 저울을 이용하였고, 접촉 30분 후의 무게 측정 시점은 저울에 올린 뒤 10초 후의 값을 기록하였다.

센서 코어의 무게 변화는 Fig. 3과 같으며, 휘발유와 접촉한 센서 코어는 약 2.6 g의 무게 변화가 발생하였고, 디젤유, 윤활유 순으로 무게 변화 크기의 차이가 발생하였다. 30분 동안 접촉된 후의 무게가 증가된 센서 코어는 시간이 지남에 따라 무게가 감소되는 경향을 보였으며 접촉한 기름의 종류에 따라 차이가 있지만, 3종류의 기름과 접촉한 센서 코어 모두, 측정 시작점을 기준으로 약 1시간 후에는 접촉전의 무게로 복귀되었다. 이는 실리콘 고무 안에 침투했던 기름이 시간이 지남에 따라 다시 밖으로 배출되어 발생된 결과로 판단된다.

센서 코어가 기름과 접촉한 상태에서의 30분 동안 스트레인 변화를 측정한 실험의 결과는 Fig. 4와 같다. 해당 실험에서는 3종류의 기름 접촉 시 발생하는 스트레인 변화에 대한 비교를 위해서, 기름과 같은 부피의 청수(수돗물)가 담긴 용기에 센서 코어를 넣고 동일한 시간과 측정 방법으로 스트레인 변화량을 측정하였다. 그 결과 청수에 담긴 센서 코어는 30분 동안 최대 ±30 μm/m의 스트레인 변화량을 보였으나 시간에 따른 증가·감소의 경향을 나타내진 않았다. 그 외 3종류 기름에 담긴 센서 코어 모두 시간이 지남에 따라 음의 스트레인 값이 지속적으로 증가되는 경향을 보였으며, 이는 센서 코어가 원통의 높이 방향으로는 응축되고, 반지름 방향으로 팽창하는 성질을 공통적으로 나타냄을 알 수 있다. 무게 변화 실험에서 가장 큰 변화량을 발생시킨 휘발유에

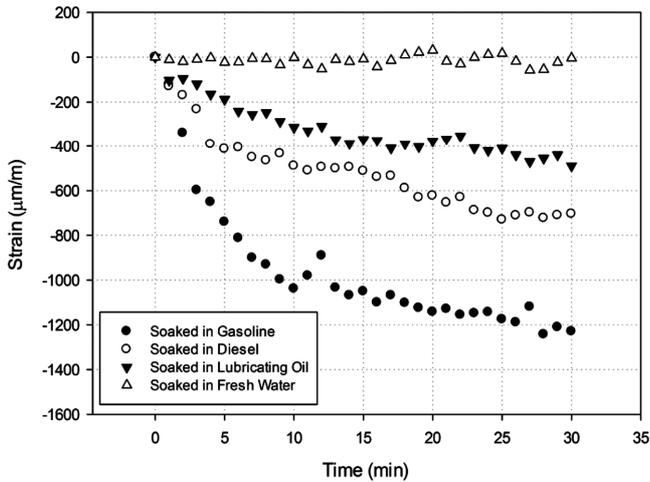


Fig. 4. Strain changes of sensor cores soaked in different kinds of oils.

담긴 센서 코어의 스트레인 값이 접촉 시작 후 약 10분 동안 급격한 변화량(-1050 $\mu\text{m}/\text{m}$)을 보였고, 그 후 20분 동안에는 변화의 속도는 줄었으나 지속적으로 스트레인 값이 변화되어 30분 후에는 스트레인 값이 약 -1200 $\mu\text{m}/\text{m}$ 까지 나타남을 확인하였다. 디젤유와 윤활유에 담긴 센서 코어들의 스트레인 값 역시 지속적으로 변화되는 양상을 보였으며, 30분이 경과된 후 이들의 스트레인 변화량은 시작점 대비 각각 -700 $\mu\text{m}/\text{m}$, -480 $\mu\text{m}/\text{m}$ 으로 휘발유에 비해서는 변화된 값이 작지만, 청수에 담긴 센서 코어의 스트레인 변화량과는 확연히 구분됨을 확인하였다.

앞서 제시한 실험의 결과를 통해, 실리콘 고무로 구성된 센서 코어가 3종류의 기름에 대해 물리적으로 반응하는 것을 알 수 있었으며, 이러한 반응의 정도는 실리콘 고무 내부에 결합된 스트레인 게이지를 통해 정량적으로 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한 기름의 종류에 따라 실리콘 고무에 흡수되는 기름의 무게에 차이가 있으며, 이와 함께 변화되는 부피의 변화 정도도 접촉하는 기름의 종류에 따라 다르다는 것을 알 수 있었다.

기름 탐지를 위한 센서의 여러 성능 중에 중요한 항목 중 하나가 재사용성(Reusability)이다. 기존에 제안된 일부 센서의 경우 기름을 탐지한 후 다시 탐지하기 위해서는 센서 일부에 대한 기름 제거 공정이나 부품 교체와 같은 추가적인 작업을 요구하는 경우가 있다. 이러한 과정은 센서의 지속성을 저하시키고 유지관리에 대한 부담을 가중시켜, 기름 탐지를 위해 해당 센서를 선택하는데 있어 제약을 받게 된다. 따라서 본 연구에서 제안된 센서 코어의 기름 탐지 센서로의 재사용 가능성을 평가하기 위해서 기름의 반복적인 접촉에 대한 반응을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 해당 실험은 휘발유 100 mL와 청수 100 mL가 담긴 용기가 준비된 상태에서 휘발유가 담긴 용기에 5분 동안 센서 코어를 담그고 그 후 15분 동안에는 청수가 담긴 용기에 센서 코어를 옮겨 담그는 과정을 2회 반복하면서 센서 코어의 스트레인 값을 측정하는 방법으로 진행되었다. 스트레인 측정에는 Hottinger Baldwin Messtechnik사의 MGCPLUS의 ML801 계측모듈이 사용되었고, 4와이어-폴

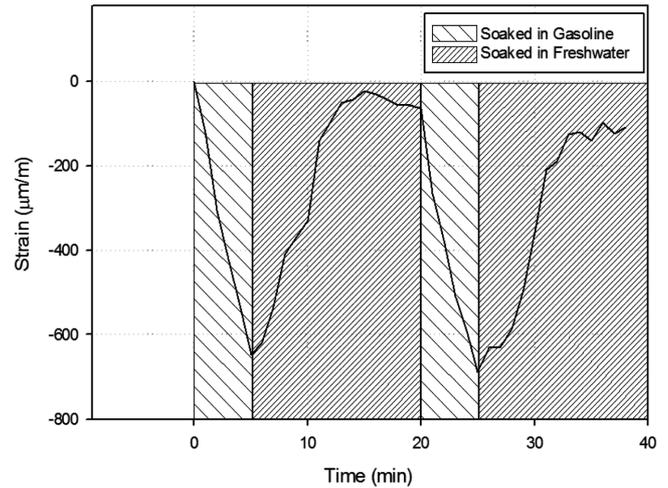


Fig. 5. Strain change in a sensor core soaked in gasoline and freshwater in turn.

브리지의 연결방식으로 샘플링 속도는 초당 1번으로 설정하였다. Fig. 5에서 제시된 해당 실험의 결과에서 알 수 있듯이, 첫 번째의 휘발유 접촉 시 5분 동안에 최대 -650 $\mu\text{m}/\text{m}$ 의 스트레인 값이 기록되었으며 그 후 청수로 옮겨진 후 부터 곧바로 스트레인 값이 증가하기 시작하여 15분 후 -56 $\mu\text{m}/\text{m}$ 까지 변하는 것을 확인하였다. 실험 시작 후 20분에 다시 휘발유가 담긴 용기로 옮겨진 센서 코어의 스트레인 값은 다시 감소하기 시작하여 5분 후 -690 $\mu\text{m}/\text{m}$ 를 기록하였다. 두 번째의 휘발유 접촉 시 발생한 스트레인 값은 1차의 경우에 비해 최대값 기준으로 약 40 $\mu\text{m}/\text{m}$ 정도 차이를 보였으며, 시간 당 변화율은 각각 -130 $\mu\text{m}/\text{min}$ 과 -126.8 $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 유사한 값을 나타냈다. 첫 번째와 두 번째 실험의 스트레인 차이는 첫 번째 휘발유 접촉시 발생한 실리콘 내부의 잔류 응력이 완전히 제거되지 않아 발생한 것으로 판단된다. 실험 시작 후 25분 되는 시점에서 다시 청수가 담긴 용기로 옮겨진 센서 코어의 스트레인 값은 감소하기 시작하여 15분 후, 약 -100 $\mu\text{m}/\text{m}$ 의 값을 기록하였다. 해당 실험을 통해 센서 코어가 기름과 접촉한 후 다시 기름이 없는 환경으로 변화될 경우 센서 코어의 스트레인 값이 다시 0으로 회귀되는 양상을 확인할 수 있었으며, 약 15~20분 정도의 시간이 유지된 후 다시 기름과 접촉할 경우에도 스트레인 값을 통해 선택적으로 해당 환경의 차이를 구분할 수 있었다(Fig. 5).

따라서 본 연구에서 제안된 센서 코어에 대한 여러 조건의 기초 실험을 통해, 해당 센서 코어가 기름에 대해서 선택적으로 반응하며, 이를 정량적인 스트레인 값을 통해서 구별할 수 있음을 확인하였으며, 일부 기름에 대해서 수행된 반복적 기름 접촉 실험을 통해 일정한 회복시간이 유지될 경우 센서 코어가 재사용될 수 있음을 알 수 있었다.

4. 센서 플랫폼

앞에서 제시한 센서 코어의 제작 및 기름에 대한 특성실험 결

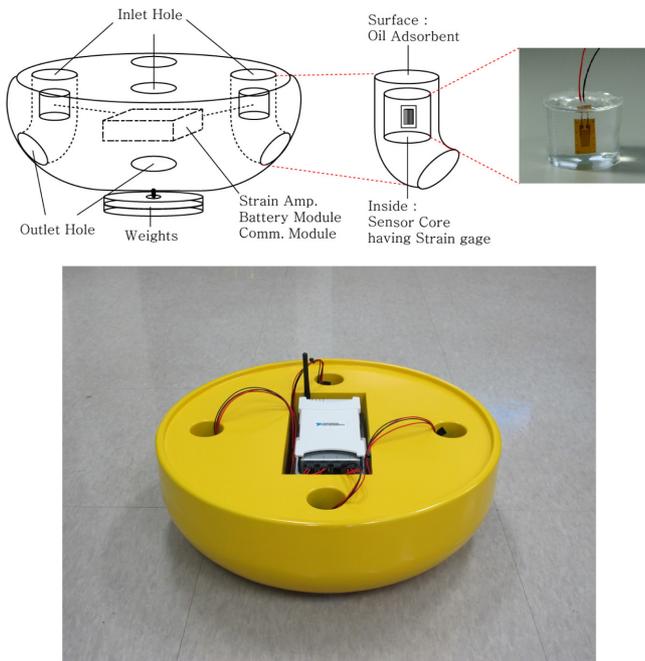


Fig. 6. Sensor platform of hydrocarbon detection sensor (Top: Schematics, Bottom: Manufactured sensor platform).

과를 바탕으로 본 연구에서는 센서 코어를 효과적으로 해양의 현장 탐지 센서의 형태로 적용시킬 수 있는 센서 플랫폼을 Fig. 6과 같이 설계·제작하였다. 제안된 센서 플랫폼은 전체적으로는 반구 형태로, 상단면을 기준으로 대칭되는 4곳에 상·하로 관통하는 센서 코어 삽입 홀이 뚫려 있다. 또한 플랫폼의 중앙 부분에는 직육면체 형태의 빈 공간이 존재하여 이곳에 스트레인 계측기와 전원 공급을 위한 배터리를 설치하게 된다. 센서 플랫폼의 상단면의 지름은 500 mm, 높이는 150 mm이며, 하단면의 중앙에는 센서 플랫폼의 부력 조절을 위한 웨이트를 설치할 수 있도록 4 mm의 탭 홀이 가공되어 있다. 해당 센서 플랫폼을 해양에 적용할 경우, 해수면 위에 존재하는 기름이 효과적으로 센서 플랫폼의 상단으로 이동할 수 있도록 센서 플랫폼의 웨이트를 조절하여, 해수면과 센서 플랫폼의 상단면이 일치하는 형태로 설치된다. 센서 코어의 겉 표면에는 친유성·소수성 성질을 갖고 있는 폴리프로필렌 재질의 유 흡착제로 감싼 후, 이를 센서 삽입 홀에 설치하여 센서 플랫폼의 상단에 존재하는 기름이 센서 코어와 효과적으로 접촉할 수 있도록 하였다. 또한 센서 삽입 홀은 플랫폼의 하단면으로 관통되어 기름이나 해수 유입에 따른 삽입 홀 내부의 압력 증가를 최소화

할 수 있도록 하였다. 센서 플랫폼의 프로토타입은 목재(합판)로 가공된 후, 수밀을 위해 겉 표면을 FRP로 코팅한 후 페인트로 도색하였다. Fig. 6의 실제 제작된 모습을 통해 제작된 센서 플랫폼과 스트레인 계측기가 결합된 센서의 형태를 볼 수 있다. 해당 센서에 사용되는 스트레인 계측기는 National instrument사의 NI-9219 모델로 무선 신호 전송을 위해 NI WLS-9163 wireless carrier가 결합된 형태로 적용된다. 이 제품은 총 4채널의 스트레인을 독립적으로 100 Hz의 샘플링 속도로 측정할 수 있으며, IEEE 802.11b/g 무선 네트워크를 기반으로 작동된다. 이 계측기는 설정된 샘플링 속도에 따라 4개의 센서 코어의 스트레인을 측정하고, 무선 네트워크를 이용하여 계측 콘솔에 데이터를 실시간으로 전송한다. 계측 콘솔에서는 스트레인 계측기로 부터 수신한 스트레인 데이터를 기록하는 역할을 한다.

Fig. 7은 본 연구에서 제안한 센서 플랫폼이 실제 해상에서 응용될 수 있는 형태를 모식도로 표현한 것이다. Fig. 7의 좌측 그림은 센서가 특정 해역에 기름 탐지를 위해서 계류되어 부이 형태로 적용되는 것으로 해수면 위에 기름이 존재할 경우, 센서 코어의 스트레인 변화를 센서 플랫폼 내부에 존재하는 스트레인 계측기를 통해 감지되며 이를 원격으로 선상이나 육상의 관제실에서 모니터링하는 형태이다. 부이 형태의 센서 플랫폼의 경우, 원유 정제 시설 근처의 해역과 같이 기름 유출 가능성이 큰 지역이나, 양식 어장 주변과 같이 기름이 유출될 경우 피해가 상대적으로 큰 지역에서 센서 여러 개를 배치하여 지속적으로 기름 존재 여부를 감시하는 형태로 적용될 수 있다. Fig. 7의 우측 그림은 선박이 기름 유출 가능성이 있는 해역을 센서 플랫폼을 끌고 다니면서 이동하는 형태의 응용 예로써, 유출 여부에 대해서 직접적으로 접근을 하여 확인할 수 있는 장점을 갖고 있는 방법이다.

5. 센서 플랫폼을 적용한 기름 탐지 실험

제안된 센서 코어와 센서 플랫폼이 통합된 형태에서의 기름 탐지 성능을 실험적으로 확인하기 위해서, 본 연구에서는 기름이 유출된 상황을 인공적으로 모사하여 센서 플랫폼에 센서 코어가 결합된 형태로 기름을 탐지하는 실험을 수행하였다. 해당 센서의 실제 탐지 성능을 확인하기 위해서는 실험해역에서 기름을 인위적으로 유출시킨 후 이를 탐지하는 방법으로 실험을 진행해야 하지만, 우리나라에서는 해양환경관리법으로 실험해역에서 기름을 이용한 실험을 금하고 있으므로 본 연구에서는 실험실에서 간이 수조를 이용하여 기름 유출이 모사된 조건에서 실험을 진행하였다.

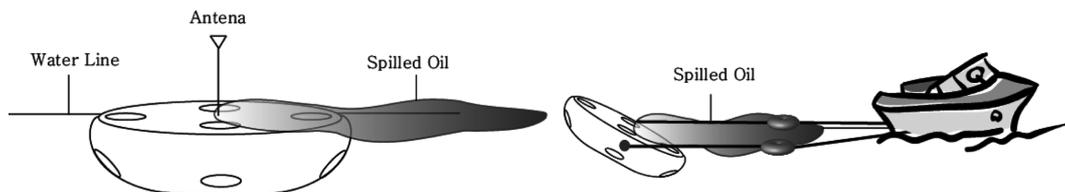


Fig. 7. Schematics of sensor applications (Left: mooring-buoy type, Right: towing type).

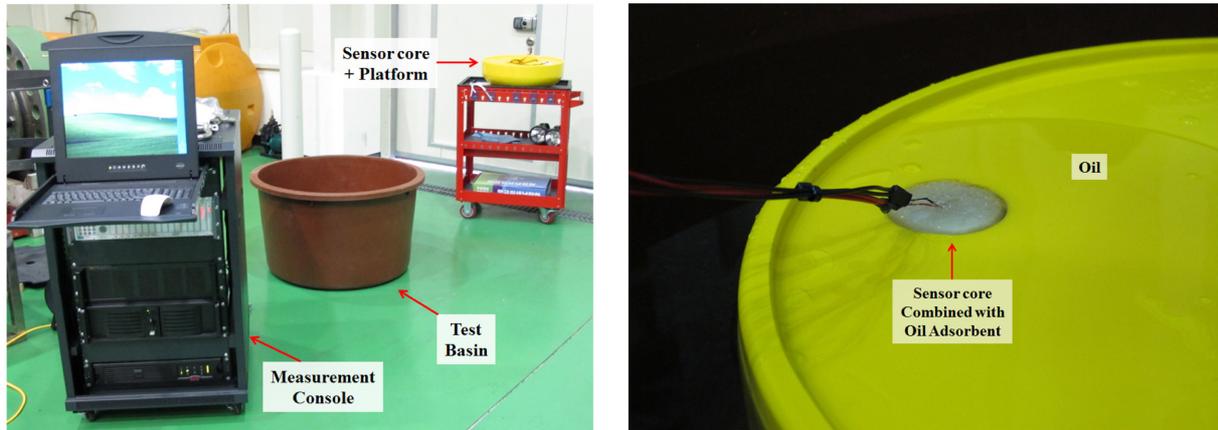


Fig. 8. Oil detection test in the simulated condition (Left: Experimental setup, Right: Sensor platform covered by a lubricating oil).

실험 조건으로 본 연구에서 개발된 센서 코어 1기와 플랫폼이 결합된 유출유 탐지 센서가 사용되었고, 이와 연결된 스트레인 계측기(NI-9219)를 통해 측정된 스트레인 값이 무선으로 전송되어 계측 콘솔에서 초당 10개의 값을 기록되었다(Fig. 8). 센서 플랫폼의 상단면이 수조 안의 수면과 일치되도록 웨이트 4기와 고정용 줄을 이용하였고, 일치된 상태에서 기름을 센서 플랫폼과 수조 벽 사이의 공간의 물 위에 0.3 l 씩 부은 후 이에 반응하는 센서 코어의 스트레인 변화량을 모니터링하는 형태로 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 기름은 휘발유, 디젤유, 윤활유로써 순차적으로 일정한 시간적 간격을 두고 한 번씩, 0.3 l 의 양을 수조 내부의 물 위에 붙는 방법으로 실험을 진행하였다. 기름을 수표면에 부은 후, 기름이 퍼지는 과정을 통해 실험 과정에서 기름이 Fig. 8의 우측 사진과 같이 센서 플랫폼의 센서 코어 삽입 홀 상단을 덮어, 결국 유흡착체 내부로 기름이 스며들어 내부의 센서 코어와 기름이 접촉하게 되었다. 또한 외부의 힘에 의한 센서 코어의 스트레인 변화 정도를 파악하기 위해서, 디젤유와 윤활유 투입실험 사이에 센서 플랫폼이 수표면과 약 $\pm 30^\circ$ 의 각도로 흔들릴 정도로 외력을 인가하는 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 스트레인 계측기에서 측정·전송되어 계측 콘솔에서 저장된 시간대비 스트레인 값을 나타낸다. 그래프에 표시된 바와 같이 왼쪽부터 차례로 ‘휘발유 0.3 L 투입’·‘디젤유 0.3 L 투입’·‘외력 인가’·‘윤활유 0.3 L 투입’된 상태에서의 스트레인 변화량을 나타낸다. 처음으로 휘발유가 투입된 후 370초 만에 $-300 \mu\text{m/m}$ 까지 스트레인 값이 감소되었으며 그 후 약 330초 동안 0으로 회귀되는 양상을 보였다. 회귀되는 과정에서 실험 시작 후 약 700초 지난 시점에서 디젤유 0.3 L를 투입하였고, 곧 스트레인 변화는 다시 감소되는 경향으로 바뀌어 약 $-190 \mu\text{m/m}$ 까지 감소된 후 다시 0으로 회귀되는 양상을 보였다. 그 후 스트레인 값이 0으로 된 시점에서 센서 플랫폼에 외력을 인가하였고, 이를 스트레인의 변동을 통해 알 수 있다. 센서 플랫폼이 수표면과 약 $\pm 30^\circ$ 의 각도로 흔들릴 정도의 외력을 통해 스트레인은 최대 $\pm 20 \mu\text{m/m}$ 의 변동량을 보였다. 마지막으로 윤활유 0.3 L를 투입한 직후, 250초 동안

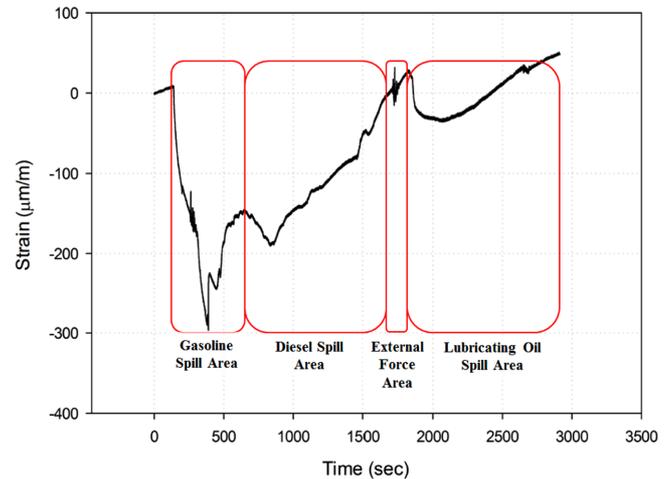


Fig. 9. Strain changes of sensor core in sensor platform by contact with gasoline, diesel and lubricating oil.

스트레인 값이 약 $-80 \mu\text{m/m}$ 까지 감소된 후에 다시 회귀되는 양상으로 전환되었다. 세 차례의 기름 투입과 한 차례의 외력 인가 실험과정에서 다른 종류의 기름에도 센서 코어가 연속적으로 빠르게 반응하는 것을 확인 할 수 있었으며, 미량의 기름에도 센서 플랫폼이 수표면에 위치하는 구조와 유흡착체를 통해서 센서 코어에 효과적으로 전달되는 것을 스트레인 값의 변화를 통해 확인할 수 있었다.

외력에 의한 스트레인 값의 변화는 약 $\pm 20 \mu\text{m/m}$ 정도 변동되는 형태로 진행되므로, 지속적으로 외력이 인가되는 경우를 제외한다면, 기름에 의한 스트레인의 전체적인 변화 양상과는 구분할 수 있다. 또한 약 50분 동안 여러 종류의 기름과의 접촉 및 외력 인가를 통해, 센서 코어의 스트레인 영점이 약 $+60 \mu\text{m/m}$ 정도 이동되는 양상을 보여, 실제 환경에서 기름과 외력에 수차례 노출될 경우, 효과적인 계측을 위해서는 시간이 경과함에 따라 일정 시점에서 스트레인 계측기의 영점 조절이 필요함을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 해상에서 유출된 기름을 현장에서 탐지하는 방법으로 실리콘 고무의 기름에 대한 부피 변화 성질을 탐지 원리로 하는 스트레인 게이지와 실리콘 고무가 결합된 새로운 형태의 센서 코어를 제안하였다. 또한 이를 해상에 적용할 수 있는 센서 플랫폼과 통합된 형태의 유출유 탐지 센서를 개발하였고, 제안된 센서를 통해서 기름에 종류에 따라 스트레인 값이 선택적으로 변화되는 양상을 실험을 통해 해석하고자 하였다. 본 연구를 통해 획득한 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 제안된 유출유 탐지 센서 코어를 이용하면, 기름에 종류에 따라 차별적으로 변화되는 스트레인의 값을 통해서 정량적으로 유출유의 존재 유무를 탐지할 수 있으며, 일부 기름에 대해서 수행된 반복적 기름 접촉 실험을 통해 일정한 회복시간이 유지될 경우 센서 코어가 재사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 제안된 유출유 탐지 센서 플랫폼은 해상에 적용되는 용도에 따라 부이 또는 선박에 설치되는 형태로 선택적으로 사용될 수 있으며, 부이 형태로 사용될 경우 배터리와 무선 플랫폼 형태의 스트레인 계측기를 통해서 한 곳의 관제실에서 다수의 지역을 원격으로 감시할 수 있는 장점을 갖고 있다.

3. 기름 유출 상황이 모사된 실험을 통해서 유출유 탐지 센서가 이종의 기름에 대해서도 연속적인 탐지가 가능함을 확인하였고, 단발적인 외력에 의한 스트레인 변화량도 기름에 의한 변화와 구분할 수 있음을 확인하였다. 기름의 종류에 대한 추가적인 탐지성능 확인과정과 다양한 해상상태에서의 장시간 유지실험을 추가적으로 진행한다면, 본 연구에서 제안된 센서를 연안 부근의 양식장이나 원유 정제 시설 부근에 적용하여 유출유 탐지센서로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원에서 기본연구사업으로 수행하고 있는 “해양 유출사고 대응지원 시스템 구축”사업과 기초기술연구회

의 지원을 받아 수행하고 있는 “오염물질의 해양 유출사고 대응 지원 기술개발” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝힌다.

참고문헌

- [1] MacLean, A., Moran, C., Johnstone, W., Culshaw, B., Marsh, D., Parker, P., 2003, “Detection of hydrocarbon fuel spills using a distributed fibre optic sensor”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 109, 60-67.
- [2] Henry, C., Roberts, P.O., 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] Griffiths, G., 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.
- [4] Reeves, G., 2000, “Introduction to hydrocarbons and monitoring”, *Arjay Engineering Ltd., Common HydroSense Questions and General Information Guide*, 2-8.
- [5] Andrews, J., 1997, “Automated marine oil spill detection system development update”, *Marine Environmental Update*, 97(1), US Navy SPARWAR Systems Centre.
- [6] Jha, M.N., Levy, J., Gao, Y. 2008, “Advances in remote sensing for oil spill disaster management : state-of-the-art sensors technology for oil spill surveillance”, *Sensors*, Vol. 8, 236-255.
- [7] Prien, R., 2007, “Technologies for new in situ chemical sensors”, *Oceans’07 IEEE*, Aberdeen, 1-6.
- [8] Shin-Etsu Chemical Co. Ltd., 2005, “Characteristic properties of Silicone Rubber Compounds”.

2011년 10월 13일 원고접수

2011년 11월 1일 심사수정일자

2011년 11월 14일 게재확정일자