

실시간 기름유출 모니터링 기술에 관한 연구

염우정, 홍연찬*
인천대학교 전자공학과

A Study on the Real-Time Oil-Spill Monitoring Technology

Woo-jung Yeom, Yeon-Chan Hong*

Department of Electronics Engineering, Incheon National University

요약 기름 유출로 인한 피해는 수질환경 및 생태계를 단시간에 파괴할 뿐만 아니라 한번 오염이 되면 회복하는데 상당한 시간이 걸리고 회복이 어려우며, 지속적으로 나타난다. 때문에 해양이나 하천, 담수 등의 기름유출을 모니터링할 수 있는 오일 검출기의 필요성이 매우 높다. 오일을 검출할 수 있는 기술로는 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있으며, 접촉식으로는 Conductivity, Capacitance, Microwave 등이 있고 비접촉식으로는 Infrared, UV, Laser, Optic, Radar 등으로 구분할 수 있다. 수면 위에 있는 오일을 측정하기 위해서는 파고 및 너울, 빛의 산란, 온도, 염도 등 여러 가지 관측의 장애가 존재하기에 측정하고자 하는 환경에 맞는 오일 검출기를 선택하여 사용해야 한다. 본 논문에서는 접촉식 방식으로 정유회사 및 유화회사, 발전소 등의 오일 관련 업종에서 사용할 수 있는 오일 검출기를 구현하였다. 장비의 구성은 수면 위에 띄워 놓는 센서 모듈과 센서 모듈에서 들어오는 신호를 가공하여 표시하는 제어기로 구분하며, 센서를 통하여 오일의 유무를 판별하고 더 나아가 오일의 양과 오일의 종류에 따른 유전율의 변화를 관측하였다.

Abstract Oil spills cause a lot of damage to the environment. Oil destroys the water environment and ecosystem in a very short period of time once they are contaminated by it, it takes a lot of time to recover from the contamination and the cleaning process is very difficult. Therefore, oil detectors are greatly needed as they can monitor any oil spills over the sea, rivers, and lakes. There are two kinds of technology available for detecting oil, viz. the contact and non-contact types. The former is based on the use of the conductivity, capacitance and microwaves, while the latter employs infrared, UV, laser, optic and radar technologies. As there are also various hurdles in the measuring of oil on water, such as the presence of waves, refraction of light, temperature and saltness, it is imperative to select the right oil detector which is appropriate for the specific environment. In this study, a contact type oil detector is developed, which can be used in oil related industries, such as refineries, petrochemical companies, and power generation stations. The detector is made up of the sensor module, which floats on the water, and the controller which processes the signal coming from the sensor module and displays it. It is designed in such a way that the existence of oil is detected through the sensor and the change in the permittivity is observed to determine the volume and type of spilled oil.

Keywords : Real-Time monitoring, Oil detector, Oil-spill, Permittivity, Water pollution

1. 서론

멕시코 만의 송유관 기름유출 사고와 태안반도의 기

름유출 사고 등에서 알 수 있듯이 해양이나 하천, 담수 등에 기름 유출로 인한 피해는 수질환경 및 생태계를 단 시간에 파괴할 뿐만 아니라 농업, 어업, 요식업, 관광업

본 논문은 인천대학교 2016년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Yeon-Chan Hong(Incheon National Univ.)

Tel: +82-32-835-8449 email: ychong@inu.ac.kr

Received December 29, 2016

Revised February 2, 2017

Accepted February 3, 2017

Published February 28, 2017

등 관련 업종에 종사하는 지역민의 생존을 위협하는 재앙을 초래한다. 특히, 기름 유출로 인한 수질오염은 짧은 시간에 피해지역이 급속도로 확산되어 피해 규모가 광범위하고 피해복구에도 엄청난 인력과 재원이 소요되며, 복구하는데 수십 년의 세월이 필요하다[1-2]. 이러한 피해를 줄이기 위해서는 실시간 기름 유출에 대한 모니터링할 수 있는 기술이 필요하다.

오일을 검출할 수 있는 기술로는 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있으며, 접촉식으로는 Conductivity, Capacitance, Microwave 등이 있고 비접촉식으로는 Infra red, UV, Laser, Optic, Radar 등으로 구분할 수 있다. 비접촉식 방식인 적외선 센서의 경우 정확도가 높고 회로가 간단하지만 표면의 정보만 측정 가능하며, 광원이 있는 주간에만 측정이 가능하고 대기의 수증기나 구름이 존재할 경우 측정이 곤란하다. 능동형 센서인 레이더의 경우 전파 대역을 사용함으로 전천후로 관측 대상을 측정 가능하지만 송신부와 수신부가 있어 회로가 복잡하며, 관측 대상의 반사파를 수신하므로 표면의 정보만을 얻을 수 있다. 이에 반하여 접촉식 방식인 Capacitance나 Microwave 방식은 관측 대상의 표면 정보뿐만 아니라 기름 층의 두께를 측정할 수 있어 수면에 유출된 기름의 양을 알 수 있어서 수면 기름 유출 원격 탐사용 센서로 적합하다[3-4].

실제 수면 위에 있는 오일을 측정하기 위해서는 파고 및 너울, 빛의 산란, 수증기, 안개, 온도, 염도 등 여러 가지 관측의 장애가 존재하기에 측정하고자 하는 환경에 맞는 오일 검출기를 선택하여 사용해야 한다[5-7].

본 논문에서는 Microwave와 같은 접촉식 방식으로 오일의 유전율을 측정하여 수면 위에 오일의 유무를 판별하고 용량에 따른 유전율의 변화를 측정하였으며, 휘발유, 경유, 등유, 솔벤트 오일의 종류에 따른 유전율의 변화가 있는지를 측정하였다.

2. 오일 검출기의 설계

2.1 유전율(permittivity)의 이론

물질의 유전율은 전기장이 얼마나 그 매질에 영향을 받고 미치는지를 나타내는 물리적 단위로서 매질이 저장할 수 있는 전하량으로 나타낼 수 있다. 같은 양의 물질이라도 유전율이 더 높으면 더 많은 전하를 저장할 수

있으며 유전율이 높은 매질은 전기장을 감소시킨다. 그래서 높은 유전율을 가진 물질을 축전기에 넣는 축전체로 사용하면 축전기의 전기용량이 커지게 된다. 전자기학에서는 물질에 가해진 전기장 \vec{E} 가 얼마나 물질의 구성에 영향을 미치는지 나타내는 정도를 전기변위장 (electric displacement field) \vec{D} 로 정의한다. 이 전기변위장 \vec{D} 와 유전율과의 관계는 다음과 같다.

$$\vec{D} = \epsilon \circ \vec{E} \tag{2.1}$$

유전율 ϵ 은 매질이 등방성(isotropy)을 가질 때에는 스칼라이지만, 그렇지 않은 경우에는 행렬로 표현된다. 물질의 유전율은 보통 상대 유전율, 즉 진공의 유전율에 대한 상대적인 값 ϵ_r 로 나타내며, 이 값을 유전상수라고 한다. 유전율은 상대 유전율과 진공의 유전율 ϵ_0 를 곱해서 구할 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \tag{2.2}$$

등방성을 가진 매질의 경우에는 \vec{D} 와 \vec{E} 가 평행 벡터이기에 ϵ 은 스칼라가 되지만 일반적으로 매질이 등방성을 갖지 않는 경우에 ϵ 은 2차 텐서이고, 이로 인해 복굴절 현상이 일어난다. 매질 속에서 전자기파의 위상속도 v 는 물질의 유전율 ϵ 과 자기 투과율 μ 에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$v^2 = \frac{1}{\epsilon\mu} \tag{2.3}$$

매질에 전기장이 가해지게 되면 전류가 흐르고 매질을 통해 흐르는 전체 전류는 전도전류와 변위전류로 구성된다. 전도전류는 하전입자가 직접 전하를 전달하여 생기는 전류이고 변위전류는 물질이 전기장에 용수철처럼 탄성반응을 하는 것이라고 생각할 수 있다. 물질에 가하는 전기장을 세게 하면 물질에 저장된 변위전류는 증가하고 전기장을 약하게 하면 물질에 저장된 변위전류가 줄어든다. 전기적 변위는 다음 식처럼 진공에 의한 항과 물질에 의한 항으로 나눌 수 있다.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} (1 + \chi) \tag{2.4}$$

\vec{P} 는 매질의 분극이고 χ 는 전기적 감수율로 물질의 상대 유전율과 감수율은 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$\epsilon_r = \chi + 1 \quad (2.5)$$

물질이 외부 장에 반응할 때는 그 장의 주파수도 중요하게 작용한다. 이 현상은 물질이 가해진 장 자체에 반응하는 것이 아니라 장이 가해진 이후 그에 따라 발생하는 변화에 따른 반응을 의미한다. 따라서 유전율은 단순한 상수가 아니라 외부 장의 주파수에 대한 복소함수 $\hat{\epsilon}(\omega)$ 로 나타나게 된다.

$$D_0 e^{i\omega t} = \hat{\epsilon}(\omega) E_0 e^{i\omega t} \quad (2.6)$$

여기서 D_0 와 E_0 는 각각 변위장과 전기장의 크기를 나타내고 $i = \sqrt{-1}$ 은 허수 단위이다. 정적인 전기장에 대한 매질의 반응은 위의 유전율에서 주파수를 0으로 극한을 취하여 표현할 수 있으며 이 유전율을 정적 유전율 또는 유전 상수 ϵ_s 라 한다.

$$\epsilon_s = \lim_{\omega \rightarrow 0} \hat{\epsilon}(\omega) \quad (2.7)$$

주파수가 매우 큰 경우의 복소 유전율은 ϵ_∞ 로 표기한다. 정적 유전율(주파수 0)과 낮은 주파수로 진동하는 장에서의 유전율은 비슷한 값이고 주파수가 높아지면 \vec{D} 와 \vec{E} 사이의 위상차 δ 가 커지기 시작한다. 이 차이가 눈에 띄도록 나타나는 주파수는 온도와 물성에 따라 달라진다. 평균적인 장의 세기 E_0 에서 \vec{D} 와 \vec{E} 는 비례하고 다음과 같은 공식이 성립된다.

$$\hat{\epsilon} = \frac{D_0}{E_0} e^{i\delta} = |\epsilon| e^{i\delta} \quad (2.8)$$

이렇게 장의 세기가 계속 변하는 경우 유전율은 복소 유전율이므로 다음과 같이 실수부와 허수부로 나눌 수 있다.

$$\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega) = \frac{D_0}{E_0} (\cos\delta - i\sin\delta) \quad (2.9)$$

위 식에서 ϵ' 은 유전율의 실수부이고 ϵ'' 은 유전율의 허수부이다. 이 허수부는 매질에 의한 에너지 흡수 속도와 연관되어 있다. 복소 유전율은 주파수 ω 에 대한 복잡한 함수로 유전체가 주파수에 따라 다양하게 장을 흡수하기 때문이다. 하지만 주파수 영역이 좁다면 유전율은 주파수에 무관하거나 간단한 모델 함수로 근사할 수 있다.

2.2 오일 검출기의 설계

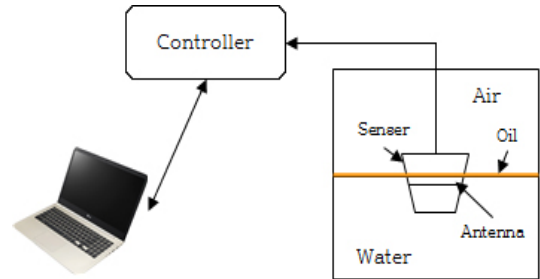


Fig. 1. Structure of oil detector

모든 분자들은 그 분자의 전기적 성질에 따라서 극성 분자와 무극성 분자로 나눈고 분자가 극성결합으로 이루어지면 분자내의 전자 분포가 달라지며, 분자 내에서 (+) 전하를 띠는 부분과 (-) 전하를 띠는 부분으로 갈라지면 극성분자라 부르고 분자 내의 원자들이 무극성 결합으로만 이루어졌거나 극성결합에 의해서 만들어졌더라도 전자의 분포가 분자 전체에 골고루 퍼져 분자가 전체적으로 같은 전기적 성질을 띠면 무극성 분자라 한다.

극성분자인 경우 분자 내에 (+) 전하를 띠고 있는 부분과 다른 분자의 (-) 전하를 띠는 부분은 정전기적 힘에 의해 비교적 강한 분자간 인력이 작용하며, 무극성 분자는 분자 내에 이동하고 있는 전자들의 움직임에 의해 순간적으로 나타나는 쌍극자에 의한 반데르발스 힘이 분자들 사이의 인력으로 작용한다.

물(H_2O)이 대표적인 극성 분자로 물은 산소가 음극(-) 성이며 양쪽에 위치한 수소가 양극성(+)을 가지기 때문에 평소에도 분자 자체가 극성을 가지고 있다. 극성 분자는 평소에는 무질서하게 배열되어 있어서 전체적으로 봤을 때는 서로 상쇄되어 버린다. 그러나 양극에서 전압을 가하면 일정하게 배열되어 버린다.

극성물질과 무극성 물질은 서로 잘 섞이지 않으며, 극성물질은 극성물질과 무극성 물질은 무극성 물질과 잘 어울리는데 즉 무극성 물질인 벤젠, 기름, 석유 등과 같은 물질은 서로 잘 녹지만 물과 같은 극성물질과는 섞이

지 않는다. 또한 물은 비중이 1이고 오일은 물에 비하여 비중이 낮기에 물위에 떠있게 된다.

이러한 물과 오일의 특성을 반영하여 설계한 오일 검출기는 오일의 유무와 두께를 측정하는 센서와 센서를 통해서 들어오는 신호를 가공하여 디스플레이에 표시하고 기준치가 넘어서면 경보를 알리는 제어기로 구성되어 있다. 동작원리는 동작원리는 [Fig. 1]과 같이는 안테나를 통하여 주파수를 방사하면 물을 통과하여 센서부로 수신되게 된다. 물만 있을 경우에는 유전율 즉, 전류의 소비는 일정하지만 물에 오일이 투여되면 오일은 물의 에너지와 흡수를 방해하여 안테나의 전류 소비량에 변화가 일어난다. 안테나의 전류 소비량은 오일의 농도에 반비례하기에 연속적으로 오일층의 두께 또는 %를 측정할 수 있다.

2.3 오일 검출기 제어기

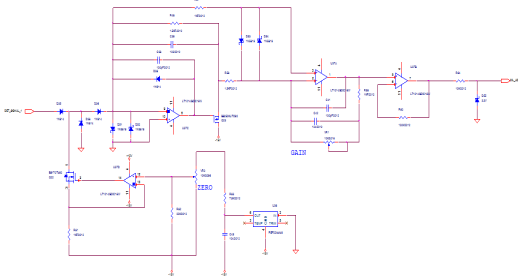


Fig. 2. Oil signal detection circuit

오일 검출기 제어부는 오일 신호 검출부와 신호처리부, 오일 센서 단선 확인부, 디지털 입출력부, 통신부, LCD 구동회로로 구성하였으며, 제어기에 사용한 마이크로프로세서는 주파수 방사와 수신되는 신호의 처리, 외부 환경 변수 값을 고속 처리해야 하므로 고속의 마이크로프로세서(STM32F Series)를 사용하였다. 오일 센서로부터 +15V의 전원과 GND 전원, 검출 센서 신호가 수신되며, 센서의 전류신호를 전압신호로 변환시키는 회로를 거쳐 이를 마이크로프로세서의 A/D 컨버터로 입력되도록 구성하였다.

전압으로 변환된 센서의 신호는 소프트웨어 상에서 설정된 AIR, WATER, OIL 레벨과의 비교를 통해 현재 상태를 표시하게 된다.

센서 또는 컨트롤러부의 검출회로 오류로 인한 오일의 오인식을 방지하기 위하여 오일 검출 시 출력되는 동

일한 레벨의 가상의 센서 신호를 발생시켜 회로의 이상 유무를 검토하는 회로부도 추가하였다.

2.4 오일 검출기 센서

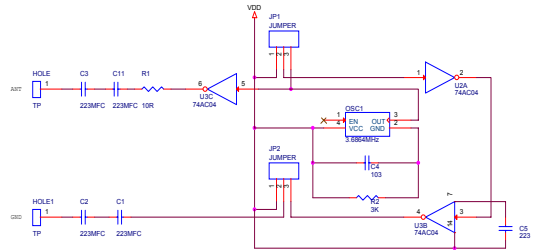


Fig. 3. Oscillation sensor and the antenna output

오일 검출기의 센서는 전원회로와 발진부, 신호 출력부, 안테나, 전압 레퍼런스 회로로 구성되며, 센서의 형태와 면적, 안테나의 크기에 따라 값이 틀려지고 외부의 영향을 많이 받기에 최적화하는 작업이 필요하다.

센서부에는 고주파 발진을 위한 3.6864MHz 오실레이터를 사용하였고 오실레이터에서 발진되어 만들어진 고주파 신호를 임피던스 매칭을 거친 후 안테나를 통하여 방사하고 GND를 통하여 이를 수신하도록 하였다.

안테나를 통하여 방사 시킬 때 고출력을 얻기 위해 버퍼를 삽입하여 전류를 증가시켰으며, 수신 안테나를 통해 수신되는 시그널 전류를 증폭하고 파이형 필터를 거쳐 노이즈를 제거한 후 메인 컨트롤러의 신호 입력부로 전달하도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

프로토타입의 오일 검출기를 제작하여 수조에 넣고 오일의 증가에 따른 유전율의 변화를 측정하였다. 안테나의 방사 파형은 사인파와 비슷한 형태를 하고 있는데 이는 유전율이 DC 전류에 대한 전기적 특성을 나타내는 것이 아니라 AC 전류, 특히 교류 전자기파의 특성과 직접적인 연관이 있기 때문이다.

오일의 증가에 따라 수신되는 신호는 전압형태로 나타나기에 레벨이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

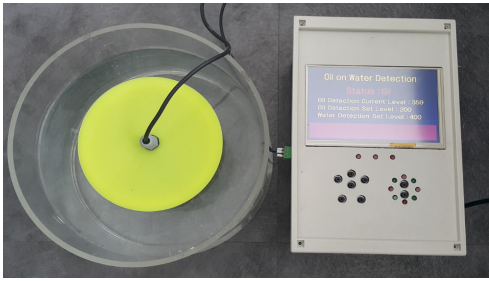
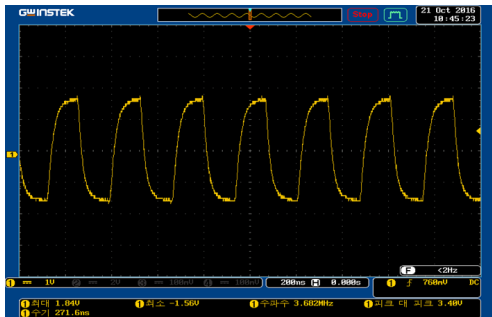
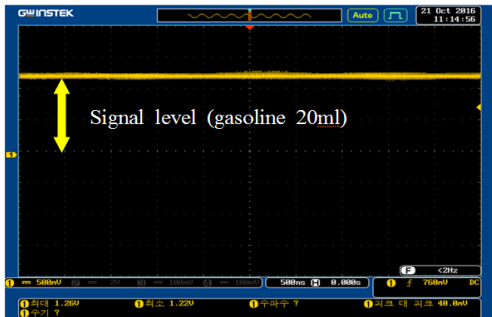


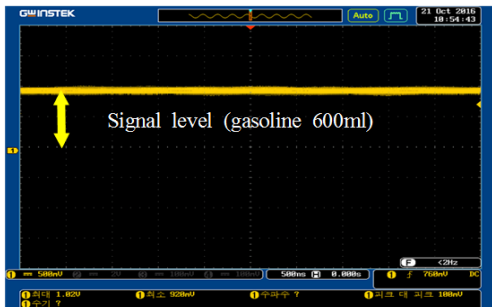
Fig. 4. Photograph oil detector



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Oil detector waveform
(a) Antenna output waveform, (b) Gasoline 20ml input waveform, (c) Gasoline 600ml input waveform

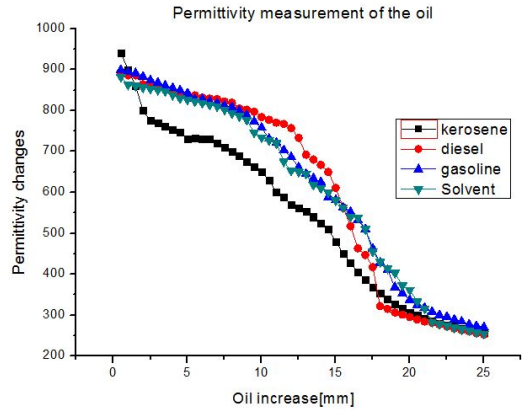


Fig. 6. Graph of Permittivity according to the type of oil

[Fig. 5]의 (a)는 오실레이터의 발진 주파수를 안테나를 통하여 방사하는 주파수 파형, (b)는 휘발유 20ml를 투입했을 때 수신기를 통하여 수신되는 전류파형, (c)는 휘발유 600ml를 투입했을 때 수신기 신호파형이다. [Fig. 6]의 그래프는 휘발유, 경유, 등유, 솔벤트 오일의 증가에 따른 검출 변화량을 나타낸 것이다. 오일이 없는 수면에서 방사파의 흡수량을 1,000으로 하고 공기 중의 흡수량을 0으로 설정하였다. 수조에 기름을 투입하면서 측정 시 오일 층이 두꺼워질수록 흡수량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 오일 종류별 유전율의 변화는 도표에서 보는 것과 같이 크지 않았다. 본 데이터는 실험실 내에서 얻어진 결과이지만 이 수치에 외부 환경 변수를 추가할 경우 정확한 오일의 검출량을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 현장별 튜닝이 가능하다.

4. 결론

기름 유출로 인한 피해를 막기 위해 오일 검출기는 발전소나 정유회사, 유화학회사 등 산업 전반에 사용되고 있지만 대부분 수입 제품으로 정작 국내 환경 즉, 오일 검출기가 바다 또는 하수도관로 설치됨에 따라 유입되는 오일의 종류가 다르고 비나 바람, 햇빛, 온도 등의 외부 환경에 영향을 많이 받으나 외산 장비는 이러한 부분을 보정해 줄 수 없어 불편하며, 설치 후에도 프로그램 개선이나 장비의 문제가 발생되어도 조치를 할 수 없는 환경에 있다. 또한, 가격이 대당 1천만원이 넘기에 기업에서 상당히 부담감을 느끼고 있었다.

본 논문에서는 이러한 문제를 개선하여 1/5 이상 저렴한 비용으로 오일 검출기를 구현할 수 있는 방법을 제시하였으며, 설치 환경에 따라 자유롭게 프로그램 개선 및 설치 값 보정 등을 실시하여 해당 기업에 최적화가 가능하도록 설계하였다.

사용자의 편리성을 위해 유/무선 통신 네트워크를 지원하며, 기름 유출 시 조기에 경보가 가능하도록 하여 기름 유출로 인한 피해를 최소화하도록 하였다. 또한, 오일 센서는 미세한 오일에도 즉각적인 유전을 변화 값을 읽어 들이고 외부 노이즈 및 환경변수에 강하도록 최적화하였다.

References

- [1] Son Hong-Min, Park Jin-Woo, "Development of a Microwave Radiometer for Remote Sensing of Oil Spills on the Water Surface", Korea maritime institute, e-journal Marine Industry Trend, vol. 21, pp. 1-5, May 2010.
- [2] Oil Spill, Wikipedia the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_spill, 2010.
- [3] S. P. Fondekar, L. V. Gangadhara Rao, "Remote sensing of oil slicks", Current Science, vol. 60, no. 11, pp. 636-639, Jun. 1991.
- [4] N. Bartsch, K. Gruner, W. Keydel, and F. Witte, "Contribution to oil-spill detection and analysis with radar and microwave radiometry : Results of the archimedes II campaign", *IEEE Trans. Gesci. Remote Sensing*, vol. GE-25, no. 6, pp. 677-689, Nov. 1987. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.1987.289737>
- [5] Son Hong-Min, Park, Jin-Woo, "Development of a Microwave Radiometer for Remote Sensing of Oil Spills on the Water Surface", *The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 9, pp. 858-867, Sep. 2011. DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2011.22.9.858>
- [6] Seong-Min Park, Chan-Su Yang, Yisok Oh, "Numerical Simulation of Radar Backscattering from Oil Spills on Sea Surface for L-band SAR", *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 26, no. 1, pp. 21-27, 2010.
- [7] Yonsei University Industry-Academic Cooperation Foundation, "Apparatus and Method for Measuring Dielectric Constant" Patent registration vol. 10-1464657, Nov. 2014.

염 우 정(Woo-jung Yeom)

[정회원]



- 2002년 2월 : 인천대학교 공과대학 전자공학과 (공학학사)
- 2004년 8월 : 인천대학교 공과대학 원 전자공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 공과대학원 전자공학과 (공학박사 수료)
- 2003년 4월 ~ 현재 : 아이젠 시스템 대표

<관심분야>

자동제어, 전자제어, 로봇

홍 연 찬(Yeon-Chan Hong)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1985년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1990년 3월 ~ 1992년 2월 : 순천향대학교 전자공학과 전임강사
- 1992년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

지능제어, RFID, 전력전자