

열화상 시스템에 의한 유빙의 탐지특성에 관한 실험적 연구

조용진
동의대학교 조선해양공학과

An Experimental Study on the Detection Characteristic of Draft Ice by Thermography System

Yong-Jin Cho

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요약 북극해 지역은 해수면의 변화와 다양한 환경적 요인들로 인해 유빙들이 형성되고 이는 자원 개발을 위한 해양시스템 및 운항선박과의 충돌사고에 의한 피해를 유발하고 있다. 극지방의 유빙은 운항중인 선박뿐만 아니라 한 장소에서 오랜 기간 작업을 수행하는 해양자원 시추 및 생산 시스템에 대한 잠재적 사고요인이 된다. 유빙과의 충돌사고 방지를 위해 북극해의 해양자원 시추 및 생산 시스템과 북극 항로를 운항하는 선박에서는 위성 영상 정보 및 탐지 레이더를 이용하여 유빙을 탐지하고 있다. 하지만 가시광선 위성영상은 야간 활용이 불가능하고, 레이더에 의한 탐지도 소형 유빙에 대해서는 탐지확률이 현격히 저조해지는 문제가 있다. 본 연구에서는 유빙의 탐지를 위해 주야간 운용이 모두 가능한 열화상 시스템의 이용 방안 에 주목하고 유빙의 탐지특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 열화상 시스템의 야간 운용성을 파악할 수 있도록 실험 조건을 설정하고 계측 각도 변화에 따른 열화상을 계측하였으며, 실험과 동일 조건에 대한 유빙과 해수의 복사에너지를 이론적으로 제한함으로써 계측 결과와의 상호 관계를 파악하였다.

Abstract Draft ice in polar regions is formed due to sea level changes and various environmental factors cause damage due to collision with offshore plants and ships for resource development. Drift ice in polar regions is a potential source of accidents for offshore plants that perform long-term operations in one place, as well as on the ship. To prevent accidents with drift ice, offshore plants and ships in polar regions use satellite image information and detection radar to detect drift ice. However, the inability to use visible satellite images at night significantly lowers the detection probability by radar for small drift ice. In this study, we used a thermal imaging system which can be operated day and night for the detection of drift ice, and carried out an experimental study on the detection characteristics of drift ice. To examine the night operation of the thermal imaging system, the experimental condition was set and the thermal image was measured according to the measurement angle change. Under this condition, the correlation was analyzed by theoretical calculating the radiant energy of the drift ice and the sea water.

Keywords : Draft ice, Detection Characteristics, Emissivity, Irradiance, Thermography system.

1. 서론

북극 지역은 최근 지구온난화의 영향으로 해빙(ice of sea) 면적이 크게 감소함에 따라 혹독한 환경으로 개발이 지연되었던 해양 자원의 시추 및 생산 개발이 가능하

게 되었고 운항기간 단축에 의한 경제성 효과에 따른 북극해 항로 개발도 활성화 되고 있다. 하지만 북극해는 해수면의 변화와 다양한 환경적 요인들로 인해 크고 작은 유빙들이 형성되고 이는 자원 개발을 위한 해양시스템 및 운항선박과의 충돌사고에 의한 피해를 유발하고

*Corresponding Author : Yong-Jin Cho(Dong-Eui Univ.)

Tel: +82-51-890-2593 email: cyjdeu@deu.ac.kr

Received January 19, 2017

Revised (1st March 3, 2017, 2nd March 28, 2017)

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

있다.

유빙과의 충돌사고 방지를 위해 북극해의 해양자원 시추 및 생산 시스템과 북극 항로를 운항 선박에서는 위성 영상 정보 및 탐지 레이더를 이용하여 유빙을 탐지하고 있다. 하지만 가시광선 위성영상은 야간 및 실시간 영상정보 활용이 불가능하고 소형 유빙의 경우 레이더에 의한 탐지확률이 현저히 저조해지는 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 유럽의 열화상장비 제작사를 중심으로 주야간의 해양환경에서 유빙 탐지가능 열화상 시스템 개발연구를 진행하고 있지만, 국내에서는 유빙의 탐지원리 및 특성에 대한 기초 연구도 매우 부족한 실정이다.

북극해 개발에 대한 관심의 증가 및 유빙에 의한 사고 위험성의 인식에 따라, 국내에서도 이와 관련하여 유빙과 충돌시의 충격하중 추정 및 충돌에 의한 선체구조의 안전성 평가[1], 유빙과의 충돌 후 유빙의 운동 특성[2] 등에 대한 연구들이 수행되었으나 유빙과의 충돌 방지를 위한 연구는 찾아보기 어렵다. 유빙의 탐지 특성으로 분류할 수 있는 최근 연구로 Masahiro Hori[3]는 눈과 얼음의 각도에 따른 방사율(emissivity)을 계측하고 모델링하는 기초 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 열화상 시스템에 의한 유빙의 탐지 특성에 대한 기초 연구를 수행하였다. 특히 열화상 시스템의 야간 운용성을 파악할 수 있도록 실험 조건을 설정하고 빙 표면의 각도변화에 따른 열화상을 계측하였으며, 실험과 동일 조건에 대한 유빙과 해수의 복사에너지(irradiance)를 이론적으로 계산함으로써 계측 결과와의 상호 관계를 파악하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 흑체복사

열화상 시스템은 흑체복사를 기반으로 복사에너지를 탐지한다. 흑체(black-body)는 이상적인 물체로 파장과 방향에 관계없이 입사하는 모든 복사를 흡수·방사하며 반사와 투과는 일어나지 않는다. 열평형(thermal equilibrium) 상태의 흑체에서 복사된 신호를 흑체복사라 하고 실제 물체 표면의 복사 성질을 결정하는 비교 기준이 된다.

흑체복사는 플랑크(plank)의 복사식에 따라 물질, 모

양, 크기와 상관없이 오직 물체의 온도와 파장에 따른 함수로서 식(1)과 같이 표현된다.

$$E_{\lambda,b}(T,\lambda) = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 [\exp((hc_0/k)/\lambda T) - 1]} \quad (1)$$

$$h = 6.6626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

여기서, $E_{\lambda,b}$ 는 파장에 따른 흑체의 복사(radiant exitance)에너지이고 T 는 절대온도, λ 는 파장, h 는 Planck상수, k 는 Boltzmann 상수, c_0 는 빛의 속도이며 플랑크 복사식의 단위는 $W/m^2\mu m$ 이다. 플랑크 복사식은 Fig. 1과 같이 온도와 파장에 따른 복사에너지를 나타낸다.

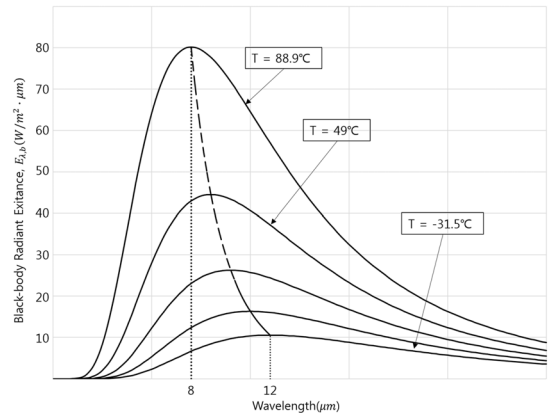


Fig. 1. Black-body radiation

키르히호프(Kirchhoff)는 흑체복사 개념을 도입하여 온도와 파장에 대한 물체의 흡수율과 방사율의 비는 물체에 관계없이 동일한 값을 가진다는 법칙 식(2)을 발견하였으며 일반적인 물체의 복사에너지 평형 비율은 식(3)과 같다.

$$\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (2)$$

$$\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (3)$$

여기서, $\varepsilon(\lambda)$ 는 방사율, $\alpha(\lambda)$ 는 흡수율, $\rho(\lambda)$ 는 반사율, $\tau(\lambda)$ 는 투과율을 나타낸다.

일정한 온도에서 흑체의 총복사량은 전체 파장에 대해 식(1)을 적분하여 구할 수 있다. 이를 스테판-볼츠만 (Stefan-Boltzmann law)의 법칙이라 하며 식(4)와 같이 표현된다.

$$E_b(T) = \int_0^\infty \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 [\exp((hc_0/k)/\lambda T) - 1]} d\lambda = \sigma T^4 \quad (4)$$

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$$

여기서, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다. 식(4)로부터 흑체 복사 강도는 온도에 4제곱에 비례하는 것을 알 수 있으며 식(4)의 단위는 W/m^2 이다.

물체에서 방사된 복사에너지는 파장에 따라 연속적으로 변하고 그 크기는 온도가 증가할수록 증가하지만 에너지 밀도가 가장 큰 파장과 온도와의 관계는 반비례이다. 즉 온도가 증가 할수록 짧은 파장에서 더 많은 복사가 나타나며 이를 빈(Wien)의 변위법칙이라 하고 식(5)와 같이 표현된다.[4]

$$\lambda_{max} T = 2898 \mu m \cdot K \quad (5)$$

식 (5)을 통해 계측 대상 물체의 온도 범위가 설정되면 이에 적합한 파장대역을 설정할 수 있다. 본 연구에서 계측하고자 하는 온도 범위는 약 $-20^\circ C$ 에서 $30^\circ C$ 로 이에 맞는 파장 범위는 $9.5 \sim 12 \mu m$ 이다.

2.2 열화상 카메라의 탐지 원리

열화상 카메라는 Fig.2와 같이 물체에서 복사된 복사에너지를 카메라 렌즈를 통해 집중시켜 검출기에 수집한

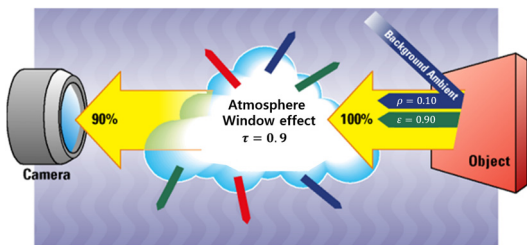


Fig. 2. Thermography system

후 신호전압을 발생시킨다. 신호전압은 신호처리를 통해 디지털 카운트로 변환되고 소프트웨어에 입력된 적절한 교정곡선을 거쳐 온도 값으로 출력된다.

검출기에 수집된 신호는 ‘물체 스스로 방출하는 복사 에너지’와 ‘물체 주위에 있는 물체들에 의해 방출된 복사 에너지가 물체 표면에 반사된 복사 에너지’가 수집되고, 두 복사에너지는 대기를 통과하는 과정에서 감쇠된다. 복사에너지의 일부를 흡수한 대기는 키르히호프 법칙에 따라 흡수한 에너지의 일부를 다시 방출하게 되며 이들 관계식은 다음 식(6)과 같다[5][6].

$$L_{Sensor}(T_{object}) = \quad (6)$$

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \left[\begin{array}{l} \varepsilon(\lambda)\tau(\lambda)E(T_{object}, \lambda) \\ + \rho(\lambda)\tau(\lambda)E(T_{ambient}, \lambda) \\ + (1 - \tau(\lambda))E(T_{air}, \lambda) \end{array} \right] d\lambda$$

$$R(\lambda) = \text{Camera spectral response}$$

여기서, L_{sensor} 은 열화상 카메라에 입사되는 복사에너지, T_{object} , T_{amb} , T_{air} 는 각각 대상물체의 온도, 배경의 온도, 대기 온도이고 $R(\lambda)$ 은 열화상 카메라 탐지기의 응답특성이다. 본 실험에 사용한 열화상 시스템의 응답특성곡선은 Fig. 3과 같다.

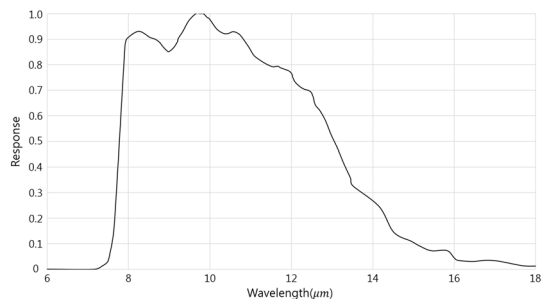


Fig. 3. Spectral response of A655sc

일반적으로 실내 환경에 가까이 있는 물체를 계측할 경우 대기투과도는 $\tau=1$ 로 가정하여 위 식(6)는 다음 식 (7)과 같이 재 표현 할 수 있다[7][8].

$$L_{Sensor}(T_{object}) = \quad (7)$$

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \left[\begin{array}{l} \varepsilon(\lambda)E(T_{object}, \lambda) \\ + \rho(\lambda)E(T_{ambient}, \lambda) \end{array} \right] d\lambda$$

3. 유빙 탐지 실험

3.1 실험 장비 및 환경

열화상 카메라는 FLIR사의 A655sc 모델로 렌즈는 적외선 대역의 파장이 투과하도록 게르마늄 렌즈를 사용하고 탐지기는 비 냉각식 마이크로 볼로미터(uncooled microbolometer)를 사용한다.

본 실험에서는 야간조건을 구현하기 위해 밀폐된 공간에서 빛의 간섭을 차단하고 실험 공간의 다양한 물체들에서 복사되어 얼음과 물에 반사되는 에너지를 최소화하기 위해 실험 장비 주변에 가림막을 설치하였다. 그리고 가림막에 의해 복사된 에너지를 계산하기 위해 접촉식 온도계를 사용하여 가림막의 온도를 계측 하였다.

얼음은 실험 환경 조건에 따라 상태변화가 발생하기 때문에 실시간적인 환경 계측이 필수적이다. 본 실험에서는 Columbia Weather System사의 기상 관측 시스템을 사용하였으며 제공된 계측 소프트웨어를 사용하여 30초 간격의 온도 및 습도를 계측하였다. 실험 시 실내 온도는 약 25-26℃ 습도는 약 45-50%로 계측 되었다.

얼음과 물의 각도 변화에 따른 열화상 이미지를 계측하기 위해 Fig.4과 같은 실험을 구성 하였다. 물체와 카메라와의 거리가 약 1m로 하였으며 0°에서 75°까지 15° 간격으로 각도를 조절하여 각도별 50Hz의 속도로 6초간 300프레임을 저장하였다.

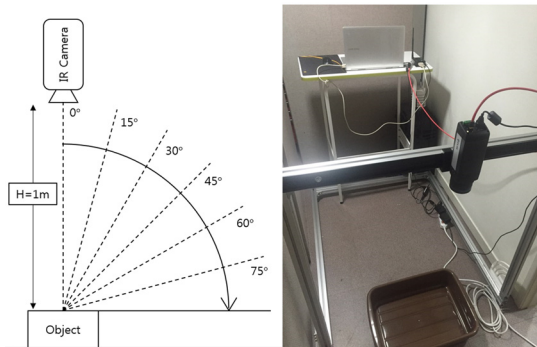


Fig. 4. Experiment schematic for ice measure

3.2 실험 결과

열화상 카메라에 의해 물체를 구분해내기 위해서는 대상 물체와 주변과의 온도차이가 있어야 한다. 또한 계측 특성을 파악하기 위한 물과 얼음의 복사에너지 계산에 있어서도 온도 값은 중요하다. 따라서 물과 얼음

의 온도를 계측하기 위해 얼음의 온도는 생산과정에서 온도센서를 매립 냉각하여 10분 단위의 온도계측을 수행하였으며, 물의 온도는 침투형 온도계를 사용하여 계측하였다.

얼음의 온도계측 결과는 Fig. 5에 보였으며, 정상상태에 도달하기 위한 시간은 약 10시간정도가 소요되었고 이때의 온도는 약 -26℃로 계측 되었다. 그리고 물의 온도는 약 2-3℃ 로 계측되었다.

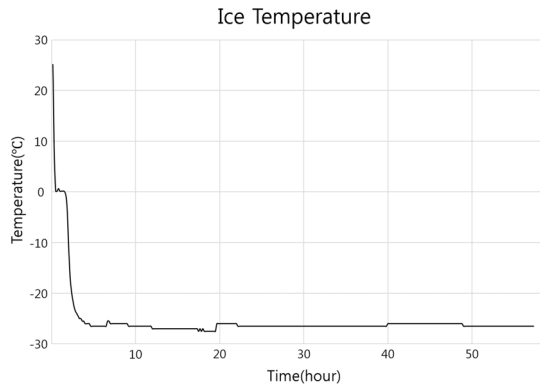


Fig. 5. Ice temperature measure data

물과 얼음의 온도계측 결과를 통해 확인한 온도 차이가 있음을 알 수 있고 이는 열화상 카메라를 이용하여 탐지가 가능함을 의미한다. 또한, 계측 각도에 따라 물과 얼음의 방사율이 달라지므로 본 실험을 통해 이러한 특성을 파악하고자 하였으며, Fig.6은 야간 조건에서 각도에 따른 계측 이미지이며, 온도범위는 시인성을 높이기 위해 자동으로 설정 하였다.

얼음의 표면은 실험 준비 과정에서 조금씩 용해되어 온도가 낮아지지만 Fig.6을 통해서 물과 얼음의 확인한 대비 복사(contrast radiance)를 확인할 수 있다. 또한 0°와 15°에서 계측한 이미지를 보면 물과 얼음의 차이뿐만 아니라 물이 얼음주변과의 온도차이로 인해서 대류현상이 발생하는 것 또한 확인 할 수 있다. 그리고 30°이상에서는 물과 얼음이 담집 용기와 주변의 영상이 함께 계측되며, 60°이상에서는 얼음의 복사에너지가 물에 반사되는 현상 또한 확인 할 수 있다.

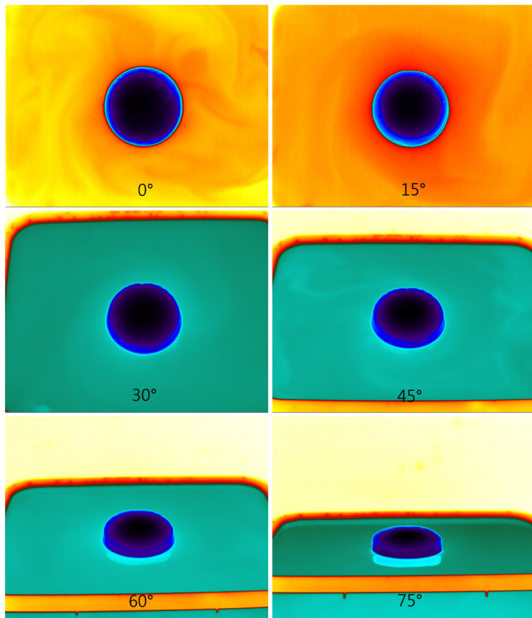


Fig. 6. Thermal image of ice

4. 결과분석 및 고찰

복사에너지를 계산하기 위해서는 온도뿐만 아니라 물과 얼음의 파장에 따른 방사율을 알아야 한다. Masahiro Hori[3]는 눈과 얼음의 분자구조형상에 따라 5 등급으로 구분하고 각각의 방사율을 15°씩 조절하여 0°부터 75°까지 계측하여 정리하였다. 본 연구에서는 이들 계측자료 중 매끄러운 분자표면에 대한 계측자료를 사용하였다.

Fig.7은 야간 조건에서 파장과 각도에 따른 얼음의 복사에너지 그래프이며, 식(7)의 적분기호 내에 있는 식을 수치계산 하여 작성한 결과이다. 얼음의 온도는 표면이 다소 용해되는 것을 감안하여 -20℃로 가정하여 계산하였다. 그래프를 통해 얼음의 복사에너지는 각도의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 각도가 증가하면 파장에 따른 얼음의 방사율이 낮아지게 되고 결과적으로 주변에서 복사된 에너지가 반사되는 비율이 높아지기 때문이다. 결과적으로 같은 온도라 하더라도 계측되는 각도에 따라서 열화상 카메라에 입사하는 복사에너지가 증가한다는 것을 보여준다.

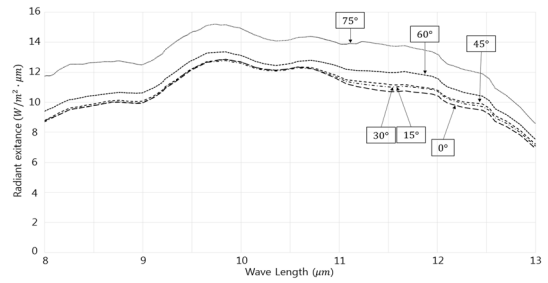


Fig. 7. Angular-dependent radiance of ice

마찬 가지로 Fig.8에 있는 그래프는 물의 복사에너지 그래프이다. 여기서 방사율은 일반적으로 알려진 물의 방사율인 0.96을 사용하고 각도가 증가함에 따라 방사율이 0.1씩 저감된다고 가정하였으며 온도는 3도로 하였다. 같은 온도에서 각도가 증가함에 따라 복사에너지가 점점 증가하는 것을 확일 할 수 있다.

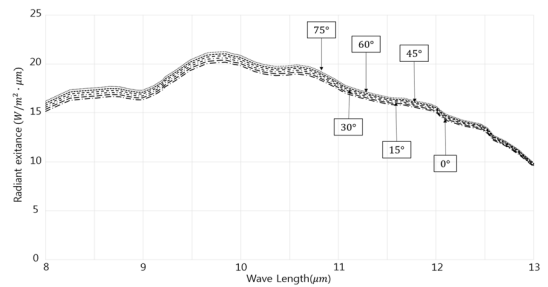


Fig. 8. Angular-dependent radiance of water

얼음과 물에서 복사되어 열화상 카메라에 입사되는 복사에너지는 파장에 따른 계산결과를 모두 적분하여야 한다. 따라서 8-13μm 대역의 값을 적분하였으며 그 결과는 Table 1에 있다.

Table 1. Radiance result of ice and water

Angle	radiance (unit: W/m^2)	
	Ice	Water
0°	53.44	82.62
15°	53.93	83.47
30°	54.01	84.31
45°	54.39	85.16
60°	57.26	86.00
75°	66.05	86.85

Table 1를 통해서, 물과 얼음의 온도에 변화가 없더라도 계측 각도가 증가할수록 복사에너지 값은 점점 크게

나타난다는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 방사율이 각도에 따라 점점 감소하고 반사율은 점점 증가하여 나타나는 결과로 판단된다. 또한, 각각의 각도에서 계산된 물과 얼음의 복사에너지의 차이를 Fig.6을 통해서 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 주·야간 운용이 모두 가능한 열화상 시스템을 이용하여 유빙의 탐지 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였으며 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 열화상 시스템의 기반이 되는 흑체복사와 탐지원리를 고찰하였다. 열화상 시스템은 절대온도 이상의 모든 물체에서 방사된 복사에너지만을 탐지하므로 주·야간 운용이 모두 가능하다.
2. 열화상 시스템의 야간 운용성을 파악할 수 있도록 실험 조건을 설정하여 빙 표면의 각도변화에 따른 열화상을 계측하였다. 각도의 증가에 따라 복사에너지 값은 점점 크게 나타난다는 것을 확인하였으며, 이러한 결과는 방사율은 각도에 따라 점점 감소하고 반사율은 점점 증가하여 나타나는 결과로 판단된다.
3. 실험과 동일 조건에 대한 유빙과 해수의 복사에너지를 이론적으로 계산함으로써 계측 결과와의 상호관계를 파악하였다. 각각의 각도에서 계산된 물과 얼음의 복사에너지의 차이가 실 계측 영상에서 물체의 선명성과 정성적으로 대응됨을 확인할 수 있었다.

본 연구에서의 실험은 실험실 내부에서 간이수조를 이용하여 수행한 것으로, 향후 빙해수조 또는 실제 해상 환경 조건에서의 탐지 특성에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

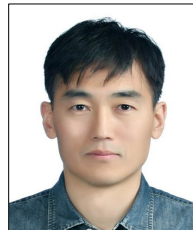
References

[1] Y. M. Yoon, "Assessment of structural safety according to Ice-Hull collision and estimation of the equivalent ice load", M.S Thesis, Chung-nam National University, 2014.

- [2] H. I. Kim, S. H. Jun, "Towing Tank Test assuming the Collision between Ice-going Ship and Ice Floe and Measurement of Ice Floe's Motion using Machine Vision Inspection", Korean Institute of Navigation and Port Research symposium, pp. 33-34, 2015.
- [3] Masahiro Hori, Teruo Aoki, Tomonori Tanikawa, Akihiro Hachikubo, Konosuke Sugiura, Katsuyuki Kuchiki, Masashi Niwano, "Modeling angular-dependent spectral emissivity of snow and ice in the thermal infrared atmospheric window", Journal of the Applied Optics, vol. 52, no. 30, pp. 7243-7255, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.52.007243>
- [4] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt and A. S. Lavine, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," John Wiley & Sons, pp. 836-853, 2008.
- [5] FLIR System, "Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals," pp. 5-48, 2008.
- [6] Cedip Infrared Systems, "Calibration Procedure," pp. 3-7, 2005.
- [7] F. Reid and E. Rouleau "Description of an infrared signature analysis software, WinISAS," Defence R&D Canada-Valcartier, Technical Report, pp. 4-8, 2002.
- [8] Y. J. Cho, "Study for ship infrared signature measurement result calibration and validation method," Study Report, pp. 26-48, 2009.
- [9] S. T. Yoon, Y.J. Cho, H. S. Jung, "Radiant Energy Filtering to Enhance High Temperature Measurement by a Thermography System" Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, vol. 36, no. 6, pp. 466-473, 2016.

조 용 진(Yong-Jin Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 인하대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2001년 2월 : 충남대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수
- 2012년 5월 ~ 현재 : 동의대학교 부설 함정적외선신호연구소 연구소장

<관심분야>

선체 진동-소음, 적외선 신호 및 복사열전달