

함정 적외선 신호저감 장치의 열 유동해석 연구

윤석태¹, 조용진^{2*}, 고대은²
¹동의대학교 함정적외선신호연구소
²동의대학교 조선해양공학과

A Study on the Heat Flow Analysis of Infra-Red Signature Suppression System for Naval Ship

Seok-Tae Yoon¹, Yong-Jin Cho^{2*}, Dae-Eun Ko²

¹Ship Infra-Red Signature Research Center, Dong-Eui University

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요약 함정의 추진기와 발전기에 의해 발생하는 고온의 폐기가스와 연돌 주변 금속표면에서 방사되는 적외선 신호는 적 위협 무기체계의 표적이 되어 함의 생존성을 감소시키는 주 원인이 된다. 폐기가스와 연돌의 적외선 신호는 함정에 적외선 신호저감 장치(Infra-Red Signature Suppression system, IRSS)를 설치하여 감소시키고 있다. IRSS는 폐기가스에 난류 유동을 형성하는 이덕터, 폐기가스와 주변 공기가 혼합되는 믹싱 튜브, 외기와의 압력차를 이용하여 공기 필름을 형성하는 디퓨저 세 부분으로 구성된다. 본 연구는 적외선 신호저감 장치를 국내 독자기술로 개발하기 위한 기초 연구로 국외 선진 기술사에서 개발하여 국내 함정에 설치된 IRSS의 모형시험 조건을 분석하고 이를 기반으로 열 유동해석 연구를 수행하였다. 열 유동 해석에서는 상용 수치해석 프로그램을 사용하였으며, 다양한 난류 이론 모델을 고려하여 결과를 비교 분석하였다. 해석의 주요 결과로는 이덕터 입구와 디퓨저 출구에서의 폐기가스 온도 및 속도, 그리고 디퓨저의 금속표면 온도를 구하였으며 모형 시험의 계측 결과와 잘 부합함을 확인하였다.

Abstract Infrared signatures emitted from hot exhaust gases generated by the internal combustion engine and generator of naval ships and from the metal surfaces of the funnel have become the targets of infrared homing missiles, which is the main cause of a reduced survivability of naval ships. The infrared signatures from the exhaust gas and the metal surface of a funnel can be reduced by installing an infrared signature suppression (IRSS) system on a ship. The IRSS system consists of three parts: an eductor that generates turbulent flow of the exhaust gas, a mixing tube that mixes the exhaust gas with ambient air, and a diffuser that forms an air film using the pressure difference between the inside and outside air. As a basic study to develop an IRSS system using domestic technology, this study analyzed the model test conditions of an IRSS system developed by an overseas engineering company and installed on a domestic naval ship, and a numerical heat-flow analysis was conducted based on the results of the aforementioned analysis. Numerical heat-flow analysis was performed using a commercial numerical-analysis application, and various turbulence models were considered. As a result, the temperature and velocity of the exhaust gas at the educator inlet and diffuser outlet and that of the metal surface of the diffuser were measured, and found to agree well with the measurement results of the model test.

Keywords : Computational Fluid Dynamics(CFD), Diffuser, Infra-Red Signature Suppression(IRSS), Naval Ship, RANS(Reynolds Average Navier-Stocks)

This work was supported by Dong-eui University Grant.(201702860001).

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

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

Received July 31, 2017

Revised September 5, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

1. 서론

세계적인 안보환경 변화와 해상 무기체계의 획기적인 발전으로 인해 현대 해양의 전장 환경은 다양한 복잡성을 갖게 되었으며, 이러한 어려움을 극복하기 위해 국내에서는 90년대부터 함정의 설계과정에서 생존성 향상을 위한 특수성능 관련 기술을 적용하기 시작하였다[1].

함정의 특수성능과 관련된 기술로는 레이더에서 방사된 전자파가 함정에 반사되어 돌아오는 에너지를 탐지하여 함정의 크기, 방향 및 거리를 파악하는 RCS(Radar Cross Section), 선체로부터 주위 유체로 방사되는 기계 소음을 파악하는 URN(Underwater Radiated Noise), 함정의 표면에서 방사하는 열에너지를 탐지하는 IR(Infra-Red) 등이 있으며, 이중 적외선 스텔스 기술은 2000년대에 들어와서야 국외 선진기술의 습득 등을 통한 관련 연구가 수행되고 있다[2].

국내 연구로는 한반도 해양환경을 고려한 함정의 적외선 신호 계산과 해양환경 변수의 민감도 분석에 관한 연구가 수행된바 있으며[3], 이후 해석결과와 신뢰성 확보를 위한 실제 함정의 적외선 측정 및 검증에 대한 연구들이 수행되고 있다[4]. 또한 신호해석을 위한 기준 해양환경조건의 정립[5] 및 폐기가스가 함정의 적외선 신호에 미치는 영향에 대한 연구[6]도 수행되었다.

국외에서는 함정의 적외선 신호저감을 위한 장비 개발에 관한 많은 연구와 적외선 신호를 보다 정확히 계산할 수 있는 분석 소프트웨어 개발에 관한 연구가 꾸준히 이루어져 왔다[7].

함정의 적외선 신호저감 장치로는 선체에 해수를 살포하여 주변과의 대비복사강도(Contrast Radiant Intensity, CRI)를 줄이는 선체해수냉각장치와, 폐기관의 형상을 최적화하여 고온의 폐기가스를 저감시키는 IRSS가 있다.

IRSS는 폐기가스에 난류 유동을 형성하는 이덕터, 폐기가스와 주변 공기가 혼합되는 믹싱 튜브, 외기와의 압력차를 이용하여 공기 필름을 형성하는 디퓨저 세 부분으로 구성된다.

본 연구는 적외선 신호저감 장치를 국내 독자기술로 개발하기 위한 기초 연구로 국외 선진 기술사에서 개발하여 국내 함정에 설치된 IRSS의 모형시험 조건을 분석하고 이를 기반으로 열 유동해석 연구를 수행하였다. 열 유동해석에서는 상용 수치해석 프로그램을 사용하였으

며, 다양한 난류 이론 모델을 고려하여 결과를 비교 분석하였다. 해석의 주요 결과로는 이덕터 입구와 디퓨저 출구에서의 폐기가스 온도 및 속도, 그리고 디퓨저의 금속 표면 온도를 구하였으며 모형시험의 계측 결과와 잘 부합함을 확인하였다.

2. 모형 시험

설계된 IRSS의 성능을 확인하기 위해서 제작사에서 실제와 기하학적 형상이 동일한 축소모형을 제작하여 성능 시험을 실시하게 된다. 이때 주요 성능 평가 항목은 엔진에 부하되는 역압, 폐기가스의 온도 및 폐기관의 금속 표면 온도이다. 장비로 유입되는 폐기가스의 온도, 정적압력 및 전체압력은 시험 조건과 결과를 확인하기 위해 이덕터 입구와 디퓨저 출구에서 피토투브를 이용하여 계측한다.

피토투브는 이덕터 입구와 디퓨저 출구의 횡단방향으로 위치시키고 온도와 정적압력 및 전체압력을 동시에 계측한다. Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하는 IRSS의 개략도이다.

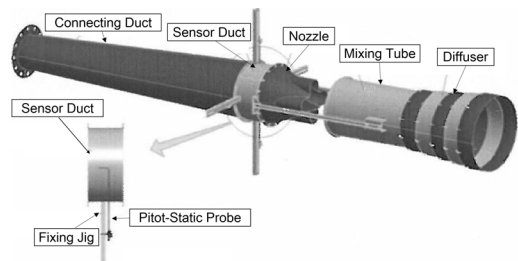


Fig. 1. Schematic of IRSS

피토투브의 계측 위치는 이덕터 입구와 디퓨저 출구에서 각각 21개의 지점이다. 이덕터 입구와 디퓨저 출구의 면적을 5개의 동일한 면적으로 나누고 상하좌우 방향으로 계측하며, Fig. 2에 한 단면에서의 계측지점을 보였

다. 폐기관의 금속표면온도는 열전대(thermocouple)를 이용한 온도 계측기를 각각의 디퓨저 링 양쪽 끝단에 5mm의 간격을 두고 용접 부착하여 계측한다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 IRSS의 디퓨저 링은 5개이고 온도 계측지점의 개수는 총 20개이다.

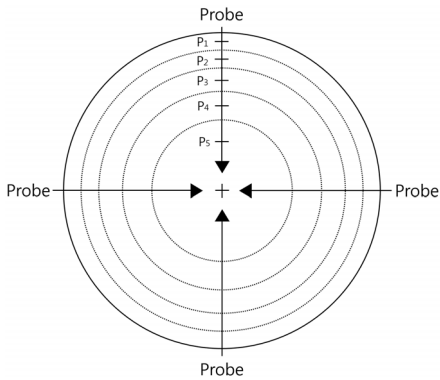


Fig. 2. Position of pitot tube

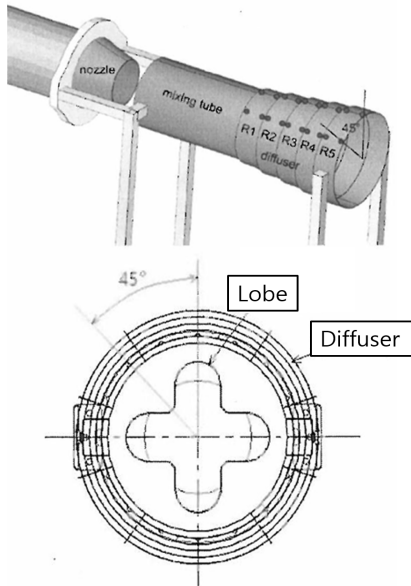


Fig. 3. Position of thermocouple

시험 평가를 위한 시스템이 구축되면 IRSS의 모형을 열 풍동 시험기에 연결하고 열 유동조건을 설정한다. 이후 계측 값들이 안정화 될 때까지 일정시간 가동상태를 유지하고 안정화 된 계측 값을 기록한다. 축소 모형의 시험 조건은 Table 1과 같다[8].

Table 1. Model test condition

| Mass flow (kg/s) | Gas temperature (°C) | Gas density (kg/m ³) |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1.55 | 525 | 0.4424 |

3. 열 유동해석

본 연구에서는 유동해석 전용 프로그램인 STAR-CCM+ 11.02를 사용하였다. 보다 정밀한 해석을 위해 프로그램에서 제공하는 3차원 형상정보 수정기능과 자동격자 생성기능을 사용하여 해석모형을 3차원으로 구현하였다.

유동해석의 지배방정식으로 사용한 연속방정식과 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식의 형태는 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] \tag{2}$$

여기서, \bar{u}_i 는 직교좌표계에서 각 방향으로의 속도, ρ 는 밀도, \bar{f}_i 는 평균 체적력, \bar{p} 는 등방향의 압력, δ_{ij} 는 유체 입자의 변형, μ 는 마찰계수이다[9].

식 (2)에 마지막 항은 레이놀즈응력으로 난류에 의해 발생하는 전단력을 의미한다. 본 연구에서는 레이놀즈 응력을 구하기 위한 난류 모델로 K-Epsilon, SST(Shear Stress Transport) K-Omega, RST(Reynolds Stress Turbulent)모델을 적용하여 각각의 해석결과를 비교분석하였다.

Fig. 4는 열 유동해석을 위한 도메인을 나타낸 것이다. 이터터에서 유입되는 에너지가 도메인 안에 축적되어 해석 결과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 도메인을 충분히 크게 설정하였다. 즉, 도메인의 크기를 길이 방향으로 디퓨저 끝 지름의 100배, 폭 방향으로 디퓨저 끝 지름의 50배가 되도록 하였다.

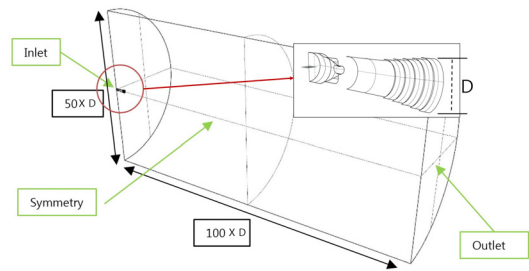


Fig. 4. Domain for flow analysis

도메인의 기체영역에는 정렬격자를 사용하였으며, IRSS 주변에서는 격자 밀도를 높여 약 600만개의 격자를 생성하였다. 도메인의 고체영역에는 12~16면체로 구성된 다면체(polyhedral) 격자를 사용하여 약 15만개로 생성함으로써 해석시간이 절감되도록 하였다. 해석모델에서 얇은 판에 해당하는 고체영역에 정렬격자를 사용하면 격자의 수가 너무 많아져 해석 시간이 크게 증가하게 된다. 생성된 격자의 일부분을 확대하여 Fig. 5에 보였다.

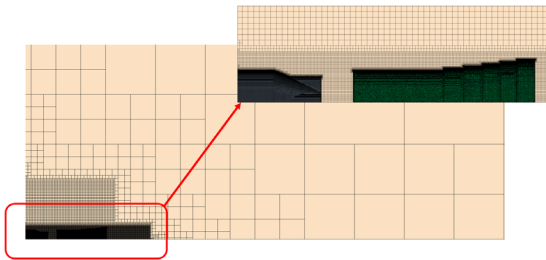


Fig. 5. Mesh of analysis domain

4. 결과 비교 분석

4.1 폐기가스 결과

이덕터 입구에서의 폐기가스 온도와 속도에 대한 수치해석 결과를 시험계측 결과와 비교하여 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 보였다. 본 연구에서는 시험 계측 값을 다항식 함수로 작성하여 수치해석의 초기조건으로 설정함으로써 이덕터 입구에서 시험 계측값 대비 난류모델에 따른 온도와 속도의 오차율이 최소화 되도록 하였다.

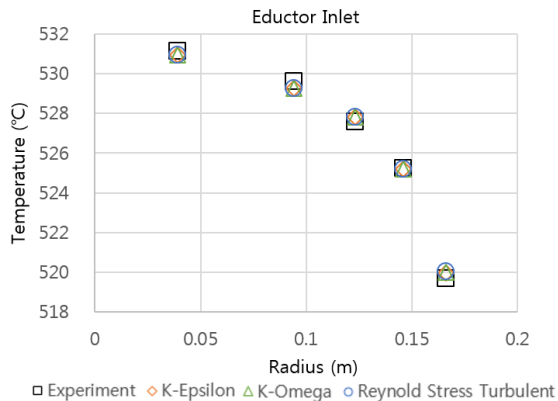


Fig. 6. Temperature of eductor inlet

이덕터 입구에서의 온도와 속도는 이덕터의 중심으로 갈수록 증가하게 되며, 이러한 현상은 열풍동기에서 생성된 유동이 점차 완전발달유동(fully developed flow)으로 바뀌면서 중심에서의 유동속도가 가장 빠르게 되고 대류현상으로 인해 온도 또한 증가하기 때문이다.

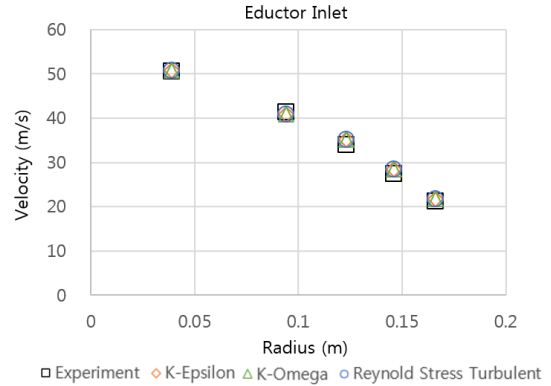


Fig. 7. Velocity of eductor inlet

디퓨저 출구에서의 폐기가스 온도와 속도에 대한 수치해석 결과를 시험계측 결과와 비교하여 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 보였다.

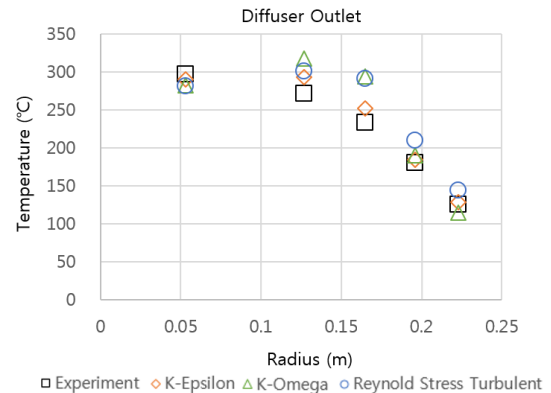


Fig. 8. Temperature of diffuser outlet

반경 방향에 따른 온도와 속도의 변화는 이덕터 입구에서의 결과와 유사한 경향을 보이나 시험 계측값 대비 난류모델에 따른 오차율은 상대적으로 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 K-Epsilon 모델의 결과에서 온도와 속도의 최대 오차율이 각각 8%, 21%로 나타나 모형시험 결과와 가장 잘 부합하였다.

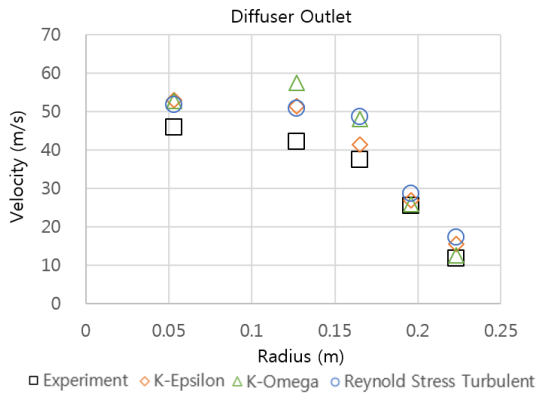


Fig. 9. Velocity of diffuser outlet

4.2 디퓨저의 금속표면온도 결과

고온의 폐기가스는 이터터 출구의 형상에 따라 분사 형태가 달라진다. 본 연구에서 이터터의 출구 형상은 Fig. 3에 보인 Lobe형상으로, 이로부터 분사되는 폐기가스에 의해서 믹싱튜브와 디퓨저 금속표면의 온도는 Fig. 10과 같은 양상을 보인다.

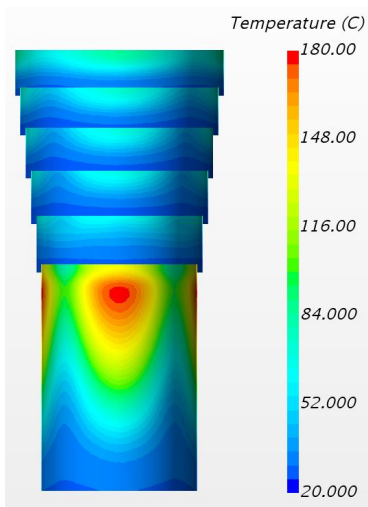


Fig. 10. Temperature distribution of mixing tube and diffuser

고온의 폐기가스가 디퓨저를 통과할 때 외부와의 압력차로 인해 디퓨저 링 사이로 저온의 외기가 흡입되며, 이에 의해 디퓨저 링의 하단 부분은 상단 부분에 비해 상대적으로 온도가 감소하게 된다. 디퓨저 링 사이로 흡입되는 외기의 속도벡터를 Fig.11에 보였다.

또한, 디퓨저의 하단 링(R1)부터 상단 링(R5)까지의 표면온도 결과를 Table 2에 정리하였다. 해석 결과와는 달리 열전대를 이용한 시험 계측 결과에서는 각 링의 상단과 하단에서의 온도 차이가 명료하게 나타나지 않는다.

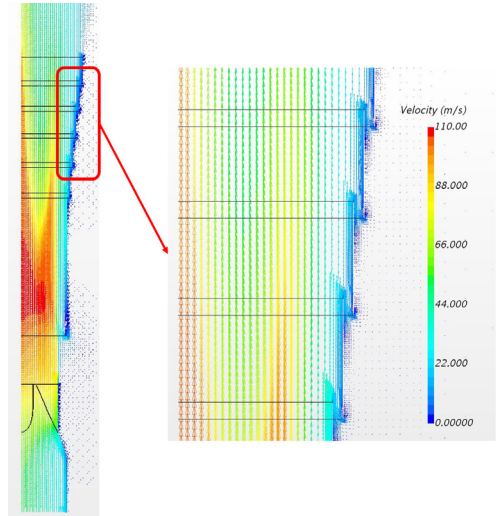


Fig. 11. Vector of air around diffuser rings

Table 2. Temperature distribution of diffuser

| Metal Temp.(°C) | Test | | CFD | |
|-----------------|------|--------|------|--------|
| | Top | Bottom | Top | Bottom |
| R1 | 34.3 | 31.1 | 45.6 | 28.6 |
| R2 | 32.5 | 31.6 | 45.1 | 28.3 |
| R3 | 43.1 | 31.4 | 46.6 | 28.3 |
| R4 | 35.6 | 42.1 | 52.8 | 28.5 |
| R5 | 35.8 | 32.7 | 64.1 | 28.9 |
| Mean | 36.3 | 33.8 | 50.8 | 28.5 |

해석결과로 파악된 각 링에서의 온도 차이를 확인 및 검증하기 위해 고해상도 열화상 카메라를 사용하여 유사 모델의 시험 영상을 획득하였으며 그 이미지를 Fig. 12에 보였다.

Fig. 12의 중앙부에 위치한 디퓨저 링들의 온도분포 결과를 보면 본 연구에서 수행한 열 유동해석의 결과와 같은 경향을 확인 할 수 있다.

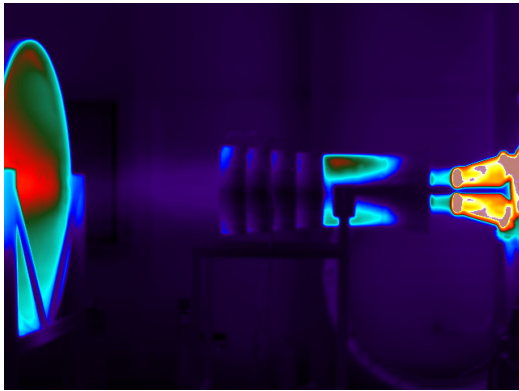


Fig. 12. Thermography of IRSS

5. 결론

본 연구는 함정의 적외선 신호저감 장치를 국내 독자 기술로 개발하기 위한 기초 연구로서, 이에 대한 열 유동 해석 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 국외 선진 기술사에서 개발하여 국내 함정에 탑재된 IRSS의 모형시험 조건을 분석하고 이로부터 열 유동해석 조건을 파악하였다.
- 2) 열 유동해석 시 다양한 난류모델을 적용하여 각각의 해석결과를 비교분석하였으며, 본 연구에서는 난류모델 중 K-Epsilon 모델의 결과가 모형시험 결과와 가장 잘 부합하였다.
- 3) 열 유동해석을 수행함으로써, 외기흡입 효과에 의한 디퓨저 링의 온도분포 등 모형시험 계측결과만으로는 불명확한 현상을 상세히 파악하는 것이 가능하다.

향후 연구로는 본 연구를 통해 정립한 열 유동해석 기술을 바탕으로 IRSS의 성능 향상을 위한 설계변수 민감도 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] Y. J. Cho, "A Survey on Stealth Technology for a Surface Warship", Study report, 1995.
- [2] Y. J. Cho, "A Study on the Management Methods of the Ship Infrared Signature", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 50, no. 3, pp. 182-189, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3744/SSNAK.2013.50.3.182>
- [3] Y. J. Cho, "An Analytical Study on the Sensitivity of

Ship's IR Signature According to the Meteorological Environment in Korean Waters", D. S. Thesis, Chung-nam National University, 2005.

- [4] Y. J. Cho, "Study on Calibration and Verification Method of Naval ship Infra-red Measurement Results", Study Report, 2009.
- [5] S. I. Han, "A study on the sampling methods of ocean meteorological for ship IR signature", M. S. Thesis, Dong-Eui University, 2013.
- [6] K. I. Han, "Study on the effect of exhaust plume gas on ir image characteristics of a naval ship", M. S. Thesis, Chung-Ang University, 2013.
- [7] J. Thompson, D. Vaitekunas, A.M. Birk, "Infrared Signature of Modern Naval Ship", American Society of Naval Engineers 21th, Century Combatant Technology Symposium, 27-30 January. 1998.
- [8] Sung Shin ENSTEC, "Procedure of Performance Test Evaluation", 2011.
- [9] CD-Adapco, "Star-CCM+ User Guide

윤 석 태(Seok-Tae Yoon)

[정회원]



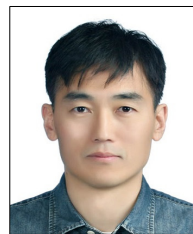
- 2017년 2월 : 동의대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 부설 함정적외선신호연구소

<관심분야>

특수선 시스템 설계, 적외선 신호 및 복사열전달

조 용 진(Yong-Jin Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 인하대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2001년 2월 : 충남대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 1994년 7월 ~ 2007년 8월 : 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
- 2007년 9월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

특수선 시스템 설계, 선체 진동-소음, 적외선 신호 및 복사열 전달

고 대 은(Dae-Eun Ko)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2008년 2월 : 삼성중공업(주) 구조설계팀
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계