

원통 아크릴 수조로 주입된 고온 기포의 수면 배출 온도 측정에 관한 실험적 연구

(An Experimental Study on the Measurement of Water Surface Discharge Temperature of High-Temperature Bubble Injected into Cylindrical Acrylic Water Tank)

윤 석 태¹⁾, 조 용 진^{2)*}
(SeokTae Yoon and YongJin Cho)

요 약 고도의 생존성이 요구되는 잠수함은 군의 전략자산에서 가장 중요한 전투 무기체계 중 하나이다. 일반적인 재래식 잠수함은 추진시스템을 작동하기 위해 공기가 필요해 필연적으로 스노클 항해를 하며 잠수함 내부로 공기를 공급해야 한다. 그리고 스노클 항해 시 수중으로 배출된 폐기 가스는 주변 유체를 가열해 온도 항적을 형성하고 결과적으로 잠수함의 생존성을 감소시킨다. 본 연구에서는 수중 잠수함의 폐기로 인해 형성된 수면의 온도 항적에 관한 기초 실험 연구를 수행하였다. 이를 위해 국내 도입된 잠수함의 추진시스템과 항해 조건 자료를 수집하였으며, 온도 항적을 측정하기 위한 실험 시스템을 구현하였다. 실험 결과 수조로 주입된 고온 기포는 작은 크기로 부서져 주위를 둘러싼 유체와 유사한 수준으로 온도가 감소하였으며, 이를 열전대 센서로 확인하였다. 그리고 수면의 온도 항적을 측정하기 위한 열화상 시스템의 결과에서도 온도 항적은 측정되지 않았다.

핵심주제어: 생존성, 수중 운동체, 기포, 고온, 온도 항적

Abstract Submarines, which require a high degree of survivability, are among the most critical combat weapon systems in military strategic assets. Conventional submarines need air to operate their propulsion systems. Exhaust gases released into the water during snorkel navigation heat the surrounding fluid, producing a temperature wake. This wake, in turn, reduces the submarine's survivability. In this study, we conducted a preliminary experiment on the temperature traces formed by an underwater submarine's waste discharge. For this purpose, we collected propulsion system and navigation condition data from domestically introduced submarines and developed an experimental system to measure the temperature traces. As a result, we observed that high-temperature bubbles injected into the tank broke down into smaller sizes, and their temperature dropped to levels similar to the surrounding fluid. This observation was confirmed using a thermocouple sensor. Consequently, the thermal imaging system designed to measure the temperature trace of the water's surface did not detect any significant temperature traces.

Keywords: Survivability, Underwater vehicle, Bubble, High temperature, Temperature wake

* Corresponding Author: cyjedu@deu.ac.kr
Manuscript received October 31, 2023 / revised November 13, 2023 / accepted November 17, 2023

1) 동의대학교 부설 함정적외선신호연구소, 제1저자
2) 동의대학교 조선해양공학과, 교신저자

1. 서론

고도의 생존성이 요구되는 잠수함은 적과 전력 차이를 극복할 수 있는 강점으로 인해 군의 전략자산에서 가장 중요한 전투 무기체계 중 하나이다. 잠수함은 수중에서 원자력, 공기불요추진체계(Air Independent Propulsion, AIP) 그리고 디젤 발전기와 같은 시스템으로 기동력을 얻는다. 여기서, 원자력 이외의 추진시스템은 발전기를 작동하기 위해 공기가 필요하다. 따라서, 잠수함은 필연적으로 수면 근처에서 스노클 항해를 통해 함정 내부로 공기를 공급해야 한다.

스노클 항해 중 잠수함은 추진체계에서 생성된 고온의 폐기를 수중으로 배출하고 주변 유체를 가열시켜 해수면에 온도 항적을 생성한다. 이렇게 형성된 온도 항적은 적외선 유도무기체계의 표적이 되고, 결과적으로 잠수함의 생존성을 감소시키는 원인이 된다.

잠수함과 관련된 연구 자료는 보안상의 이유로 정보 수집이 매우 제한적이다. 따라서, 기포의 거동 및 온도 계측과 관련된 기초 연구, 함정의 생존성 및 적외선 스텔스에 관한 자료를 중심으로 국내외 연구 동향을 파악하였다.

먼저, 기포 거동에 대한 기초 연구 자료로 무차원 계수와 주입 공기의 체적을 변화시켜 수조 내 기포의 거동 측정에 관한 연구(Neto et al., 2008), 폐기의 온도 감소 효과를 조사하기 위해 폐기와 물의 분사 비율에 따른 가스의 온도 계측에 관한 연구(Jha et al., 2016) 등이 선행되었다. 이 밖에도 입자 영상 유속계, 디지털 마스크 그리고 적합 직교 분해를 사용하여 기포의 유동 특성을 가시화한 연구(Kim et al., 2008; Yi et al., 2008)들이 소개되었다.

함정 생존성 및 적외선 스텔스와 관련해서는 국내 연구 자료를 중심으로 조사하였다. 먼저, 함정의 대공방어 시스템의 효과도를 바탕으로 함정의 피격성을 추정한 연구(Lee et al., 2023), 함정 폐기의 화학 조성 인자와 구성 비율이 적외선 신호에 미치는 영향에 관한 연구(Cho, 2018), 적외선 신호해석에 필요한 해양 기상환경 자료의 표본추출에 관한 연구(Cho, 2018) 등이 수행되었다.

이처럼 지금까지 연구는 기포 거동과 형상에 대한 기초 연구, 수상함의 생존성 그리고 적외선 스텔스에 관한 연구를 중심으로 발표되었다. 따라서, 본 연구에서는 잠수함의 폐기가 수중으로 배출된 후 주변의 유체와 열전달이 발생하고 수면으로 상승하여 배출된 폐기의 온도 그리고 수면에 형성된 온도 항적 측정에 관한 기초적인 실험 연구를 수행하였다.

이를 위해 국내에 도입된 잠수함의 추진시스템과 항해 조건 자료를 수집하였으며, 항해 수심을 구현할 수 있는 원통 아크릴 수조와 고온 기포 주입 시스템을 제작하여 수면의 온도 항적을 계측하기 위한 모형실험을 수행하였다.

2. 실험

2.1 추진 및 항해 조건

본 연구의 대상함은 국내 최초로 도입된 잠수함으로 디젤-전기 추진 방식을 사용하고 있으며, 추진기의 상세 성능은 설계 기관에서 관리하고 있다. 따라서, 본 연구의 실험 조건은 실적 자료와 전문가 자문을 통해 설정하였다.

먼저, 잠수함에서 사용하는 발전기의 배기량은 1.5에서 2.1 kg/s, 배출되는 폐기 온도는 400에서 450 °C로 조사되었다. 그리고 잠수함은 수중에 큰 용적의 버블이 형성되는 것을 방지하기 위해 다공판을 이용하여 폐기를 배출한다. 잠수함 다공판의 구멍 개수는 약 1400에서 1500개이며, 각각의 구멍 직경은 6에서 6.5 mm로 조사되었다.

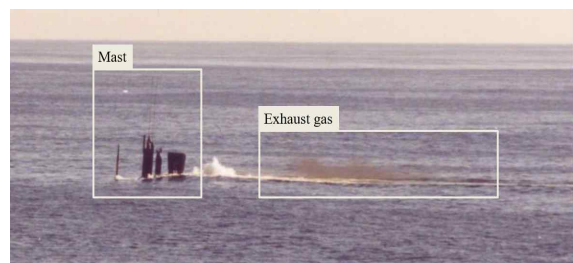


Fig. 1 Snorkel voyage of submarine

잠수함은 스노클 향해 시 다공관의 출구부터 수면까지의 높이가 약 3.4에서 3.6 m를 유지하며 운항하는 것으로 조사되었다. 스노클 향해 시 잠수함은 공기를 흡입하기 위해 Fig. 1과 같이 마스트 상부가 노출되며, 발전기에서 생성된 폐기 가스는 수면 위로 배출된다(Gan et al., 2010).

2.2 모형실험 조건

본 실험에서는 실제 잠수함의 디젤기관을 사용하는 것은 불가능하였다. 따라서, 추진 및 항해 조건을 고려하여 단일 기공을 통한 실험이 구현될 수 있도록 조건을 설정하였다.

발전기에서 배출되는 전체 질량유량은 다음 식(1)과 같으며, 다공관의 단일 기공을 통해 배출되는 질량유량은 다음 식(2)으로 계산된다.

$$\dot{m}_{multi-hole} = \rho Q = \rho A V \tag{1}$$

$$\dot{m}_{single-hole} = \frac{\rho Q}{N} = \frac{\rho A V}{N} \tag{2}$$

여기서, \dot{m} 은 질량유량 ρ 는 밀도, Q 는 유량, A 는 면적, V 는 속도 그리고 N 은 다공관 기공의 수이며, 단위는 각각 kg/s , kg/m^3 , m^3/s , m^2 , m/s 이다(Munson et al., 1990).

공기는 압축 장치를 통해 수조로 공급되며 이때 공기의 온도는 실내온도와 동일하다. 따라서 다음 식 (3)의 이상기체 상태 방정식과 식 (2)의 단일 기공을 통해 배출되는 질량유량 공식을 반영하여 식(4)와 같이 실험에서 주입되는 공기의 공급량을 설정하였다.

$$\rho = P_{atm} / (R \times (T + 273.15)) \tag{3}$$

$$Q_{air} = \frac{\dot{m}_{single-hole}}{\rho_{ambient}} \tag{4}$$

여기서, P_{atm} 은 표준대기압, R 은 기체 상수, T 는 절대온도이며, 단위는 각각 Pa , $J/kg \cdot K$, K 이다. 그리고, 식(4)의 공기 공급 유량의 단위는 유량계의 단위에 맞도록 하였으며, 주변 공기의 밀도 $\rho_{ambient}$ 는 약 20 °C의 온도를 기준으로 계산하였다.

공기의 온도변화에 따른 주입 유량을 Fig. 2에 보였다. 실험 환경에서 주변의 온도는 약 10~20 °C 내외로 예측되었다. 따라서, 주입되는 공기의 유량은 약 60에서 70 L/min으로 설정하였으며, 고온 기포 주입 시스템을 통과한 이후에는 약 150에서 170 L/min으로 기체가 팽창할 것으로 예측하였다. 여기서, 부피 1 m^3 은 1000 Litter로 유량 단위 설정 조건을 편의상 L/min으로 하였다.

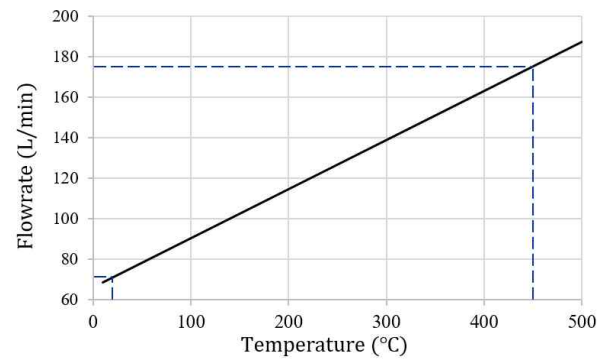


Fig. 2 Flow rate following air temperature

2.3 모형실험 계측기 및 구성

모형실험을 위해 여러 장비와 다양한 계측기를 사용하였다. 먼저, 모형실험을 위한 장비로 콤프레샤, 유량계, 공기 가열 히터 그리고 원형 아크릴 수조(Cylindrical Acrylic Water Tank, CAWC) 총 2개(각각 2m)를 사용하였다.

여기서, 공기 가열 히터와 아크릴 수조는 본 실험에 맞도록 맞춤 제작하였다. 본 연구에서 사용한 장비의 정보를 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Information for model experiment

Item	Specification
Compressor	Power : 3.7KW(5HP)
	Pressure : 9bar(max)
	Volume : 400L
Flow meter	Min : 20L/min
	Max : 200L/min
Heater	Inside temperature : above 650°C
CAWT	Diameter : 1m
	Height : 4m(2+2m)

이 밖에도 기포 형상과 배출 온도 그리고 표면의 온도 항적 계측을 위한 기기를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Information of measuring instrument

Item	Specification
High speed cam	Model : Mini UX100
	Resolution : 1280 × 1240
	Frame rate : 4000FPS
Thermography	Model : A655sc(LW)
	Resolution : 640 × 480
	Frame rate : 50FPS
Weather station	Model : X6540sc(MW)
	Resolution : 640 × 512
	Frame rate : 50FPS
Thermocouple	Model : Orion LX

수조로 주입된 고온의 기체는 주변 유체와 접촉하면서 경계면을 통해 활발한 열전달이 발생한다. 그리고 열전달 비율은 기포의 크기와 상관관계가 있다. 따라서, 초고속 카메라를 사용해 수중으로 주입되는 기포의 형상과 크기를 계측하였다.

또한, 수면에 형성된 열 분포를 시각 열 영상으로 가시화하기 위해 열화상 시스템으로 수면의 온도 항적을 계측하였다.

영상 계측 기기 외에도 실내온도와 습도를 실시간으로 계측하고 디지털 자료로 저장할 수 있는 시스템과 습도가 높은 환경에서 온도를 계측할 수 있는 열전대 센서를 사용하였다. 본 실험 연구를 위해 사용된 장비와 개략적인 구성을 Fig. 3에 보였다.

2.4 모형실험 및 계측 방법

공기가열기로 들어가는 기체의 온도는 주변의 온도와 같다. 따라서 실내온도를 계측하고 밀도를 계산하여 공기의 주입 유량 설정하였다. 또한 공기가열기를 통과해 수조 안으로 주입되는 기체의 온도를 실시간으로 계측해 실험 조건을 확인하였다.

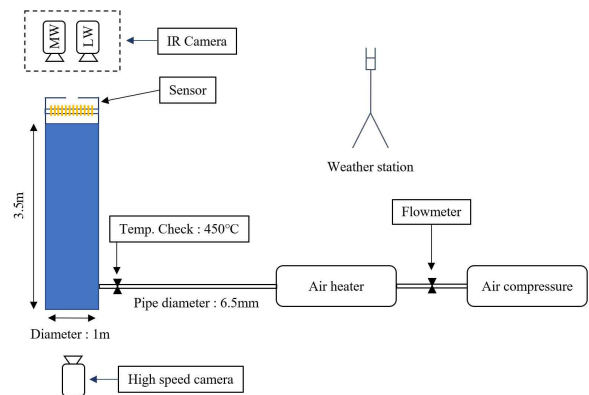


Fig. 3 Flow rate following air temperature

수조로 주입된 기포의 형상과 크기를 계측하기 위한 초고속 카메라의 촬영속도는 1000 frame/s로 설정하였으며, 배경에 할로젠 램프를 설치하여 계측시 충분한 빛이 들어오도록 하였다. 이와 동시에 수면의 온도 항적을 계측하기 위한 열화상 카메라를 수면에 수직이 되도록 설치하여 영상을 계측하였다.

마지막으로 수면으로 배출되는 기체의 온도는 수조 상부 공간에 열전대 센서를 설치하고 체류하는 기체의 온도를 계측하였다. 수조의 상부는 기압이 생성되는 것을 방지하기 위해 0.1 m의 구멍을 만들었으며, 고온 기포가 수조로 주입되는 내내 체류하는 기체의 온도를 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 기포 형상 및 크기

초고속 카메라로 수조 내 고온의 기포가 주입되는 영역을 계측한 결과를 Fig. 4에 보였다. 이 결과는 기포가 지속해서 주입되는 순간을 계측한 것으로 기포의 초기 크기와 부력과 전단에 의해 잘게 부서진 것을 확인할 수 있다.

공기가 배출되는 배관의 외경은 12 mm이고 내경은 6에서 6.5 mm로 가공하였다. 기포 크기가 최대 22.4 mm로 계측되었다. 하지만 배출 후 기체의 부력, 전단력 그리고 점성으로 인해 약 1 mm 이하로 부서지거나 결합되는 형태를 보였다.

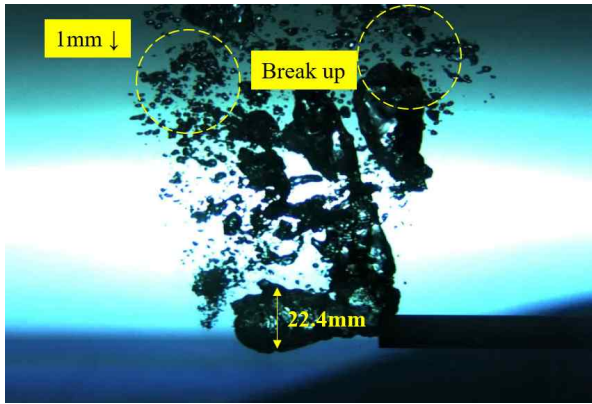


Fig. 4 Bubble size and shape

온도가 서로 다른 기체와 유체는 순간적으로 혼합되면서 활발한 열교환이 발생한다. 그리고 열교환은 기포의 크기에 절대적인 영향을 받는다. 따라서 배출 직후 1 mm 이하로 부서진 기포의 온도는 급격한 온도 감소를 하고 유체의 온도와 유사한 수준으로 감소할 것으로 예상할 수 있었다.

3.2 수면 온도 항적

배출된 기체로 인해 형성된 수면의 온도 항적을 계측하기 위해 사용한 열화상 시스템의 측정 결과를 Fig. 5과 Fig. 6에 각각 보였다.

Fig. 5은 중적외선 카메라를 사용하여 실험 중 표면에 기포가 형성되는 것을 계측한 결과이다. 측정 결과에서 수면의 최대/최소 온도 차이는 약 0.6 °C로 온도 항적 효과가 미미하며, 정

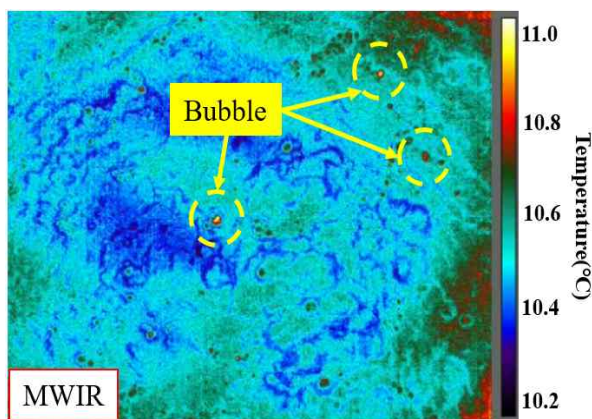


Fig. 5 Thermal image at water surface

량적인 복사에너지 값을 계산하였을 때 유의미한 차이를 보이지 않았다.

Fig. 6은 원적외선 카메라를 사용하여 측정된 결과로 중적외선의 결과와는 달리 표면에 기포 형상이 계측되지 않았다. 또한, 수면에 온도 항적 효과도 없는 것으로 나타났다. 두 결과의 차이는 적외선 대역의 차이뿐만 아니라 계측 센서의 민감도에서 발생한 것으로 보인다.

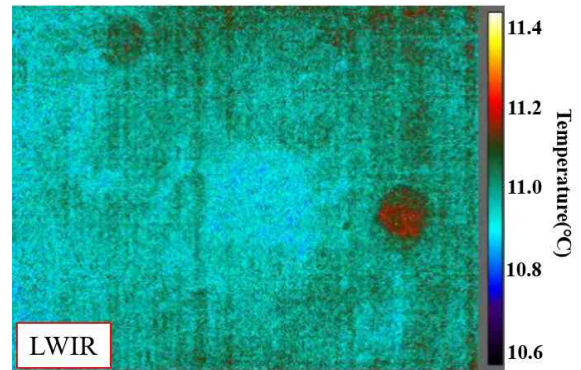


Fig. 6 Thermal image at water surface

3.3 수면 배출 온도 측정 결과

대기 온도, 수조 내 유체의 온도 그리고 수면으로 배출되는 기체의 온도 계측 결과를 Fig. 5에 보였다. 수조 내 유체 온도 계측을 위한 센서의 위치는 기포의 배출 지점을 기준으로 0 m, 1.5 m 그리고 3 m에 위치하도록 하였다. 그리고 수면으로 배출되는 기체가 주변 공기와 혼합되어 실내와 같은 온도가 되지 않게 체류하도록 구성해 기체의 온도를 계측하였다.

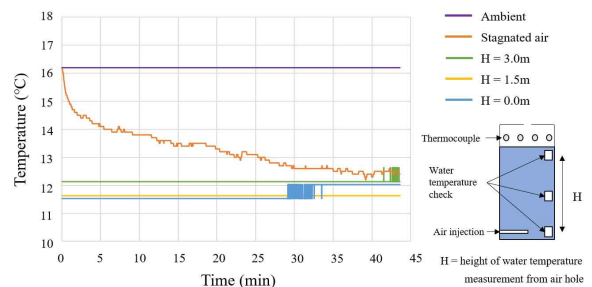


Fig. 7 Temperature measurement result of air and water

측정 결과 수조 내 유체의 온도는 위치에 상관없이 약 12 °C로 측정되었으며, 온도 센서의 오차 범위 내의 차이를 보였다. 그리고 수면으로 배출된 기체의 온도는 초기 주변 환경의 온도와 같은 16 °C가 되었고 시간이 지남에 따라 점점 수조 내 유체의 온도와 같은 12 °C로 수렴하는 것을 확인하였다.

따라서, 수조 내로 주입된 450 °C의 기체는 주변의 유체와 혼합하여 유체와 유사한 12 °C로 낮아진 후 수면으로 배출되는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 원통 아크릴 수조로 주입된 고온 기포의 수면 배출 온도 측정에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 본 연구의 내용과 결과를 다음과 같이 정리하였다.

첫째, 국내 도입된 잠수함의 추진 및 항해 조건을 조사하고 단일 기공으로 배기량이 배출될 수 있도록 모형 시스템을 구축하였다.

둘째, 수조로 주입된 고온 기체의 형태, 온도 그리고 표면의 온도 항적을 측정하기 위해 초고속 카메라, 열전대 센서 그리고 열화상 시스템을 사용하였다.

셋째, 고온 기체는 수조로 주입된 후 1 mm 이하의 크기로 작아지고 활발한 열전달 효과로 인해 수조내 유체의 온도와 유사한 수준으로 감소하는 것을 열전대 센서로 확인하였다.

넷째, 열화상 시스템을 이용하여 수면의 온도 항적을 계측한 결과 중적외선, 원적외선 대역 카메라 모두 이미지 내 유의미한 온도 차이가 없음을 확인하였다.

본 연구에서는 실제 잠수함에 사용되는 디젤 발전기를 사용한 것이 아니므로 폐기의 화학 조성이 반영되지 않았다. 따라서, 추후 연구로는 실제 폐기 가스를 반영한 실험이 필요하다고 보인다. 하지만, 수중으로 배출된 폐기의 온도 감소와 수면의 온도 항적 생성 여부의 측면에서 유의미한 결과가 도출되었다. 결과적으로 본 연구의 결론은 추후 잠수함 폐기에 의한 온도 항적 추정 연구에 유용하게 활용될 것으로 예상된다.

References

- B. R. Munson, A. P. Rothmayer, T. H. Okiishi and W. W. Huebsch, *Fundamentals of Fluid Mechanics : 7th Edition*, John Wiley & Sons Inc.
- G. H. Lee, S. T. Yoon, Y. J. Cho, (2023). A Feasibility Study on the Estimation of a Ship's Susceptibility Based on the Effectiveness of its Anti-Air Defense Systems, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 60(1), 57-64. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2023.60.1.57>
- I. E. L. Neto, D. Z. Zhu, N. Rajaratnam (2008). Bubbly jets in stagnant water, *International journal of multiphase flow*, <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.06.005>
- P. K. Jha, K. Karunamurthy, J. Das, R. Malik. (2016). Study of Exhaust Gas Temperature of SI Engine using Water Injection, *India Journal of Science and Technology*, 9(35).
- S. J. Yi, J. W. Kim, H. D. Kim, K. C. Kim, (2008). Characteristics of Bubble-driven Flow by Using Time-resolved PIV and POD Technique, *Journal of the Korean Society of visualization*, 6(1), 41-46.
- S. M. Kim, H. D. Kim, K. C. Kim, (2008). The Measurement of Bubble Driven Flow Using PIV and Digital Mask Technique, *Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers*.
- T.H. Gan, P. Hanhela, W. Mazurek, R. Gillett (2010), Characteristics of submarine engine diesel particulates in the maritime environment, *Journal of Aerosol Science*, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2009.09.007>
- Y. J. Cho, (2018). A Study on the Sampling of Ocean Meteorological Data to Analyze Signature of Naval Ships, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 23(2), 19-28. <http://dx.doi.org/>

10.9723/jksiiis.2018.23.2.019

Y. J. Cho, (2018). Sensitivity Study on the Infra-Red Signature of Naval Ship According to the Composition Ratio of Exhaust Plume, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 19(4), 103-110. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.4.103>



윤 석 태 (SeokTae Yoon)

- 정회원
- 동의대학교 조선해양공학과 공학사
- 동의대학교 조선해양공학과 공학석사
- 부산대학교 조선해양공학과 공학박사
- (현재) 동의대학교 부설 함정적외선신호연구소 연구교수
- 관심분야: 열유체, 전산유체역학, 함정특수성능



조 용 진 (YongJin Cho)

- 정회원
- 인하대학교 조선공학과 공학사
- 인하대학교 조선공학과 공학석사
- 충남대학교 선박해양공학과 공학박사
- (현재) 동의대학교 공과대학 조선해양공학과 교수
- 관심분야: 열역학, 진동·소음, 함정특수성능