

# 적외선 신호저감 장치 모형시험을 위한 계측기의 성능평가

## (Performance Evaluation of Measuring Instrument for Infra-Red Signature Suppression System Model Test)

윤 석 태<sup>1)\*</sup>

(SeokTae Yoon)

**요 약** 현대 함정은 외부로 방사되는 적외선 신호를 낮추기 위해 폐기관에 적외선 신호저감 장치 (Infra-Red Signature Suppression system, IRSS)를 설치한다. 그리고 함정은 생의 주기가 매우 긴 전략 자산으로 탑재 장비들의 성능에 대한 높은 신뢰성을 충분히 확보해야 한다. 따라서, IRSS와 같은 장비들은 설계 단계에서 모형시험을 통해 성능평가를 하고 있다. IRSS의 모형시험에서는 다양한 계측기들이 사용된다. 그러므로, 모형시험 단계 이전에 계측기들의 신뢰성을 평가해야 한다. 본 연구에서는 IRSS 모형시험에 사용되는 계측 장비들의 신뢰성 평가에 관한 연구를 수행하였다. 시험 장비와 계측기는 열 풍동 시험기, 피토 튜브와 디지털 차압계, 열전대 센서 그리고 디지털 기록계가 사용되었다. 계측 결과 열 풍동 시험기의 풍속이 증가할수록 유동의 계측 편차가 감소하였으며, 열전대 센서의 온도는 사용 방법에 따라 반응 속도 및 민감도의 차이를 보였다.

**핵심주제어:** 적외선 신호저감 장치, 신뢰성 평가, 열 풍동 시험기, 통계, 모형시험

**Abstract** Modern naval ships install an Infra-Red Signature Suppression system (IRSS) in their exhaust pipe to reduce infrared signature emitted to the outside. In addition, naval ships are strategic assets with a very long life cycle, so high reliability of the performance of the equipment on board must be guaranteed. Therefore, equipment such as IRSS is evaluated for performance through model testing at the design stage. A variety of measuring instruments are used in IRSS model testing, and the reliability of these instruments must also be guaranteed. In this paper, a study was conducted to evaluate the reliability of measurement equipment used in IRSS model testing. The test equipment and instruments used were a hot gas wind tunnel, pitot tube, digital differential pressure gauge, thermocouple sensor, and digital recorder. As the fan speed of the hot gas wind tunnel increased, the measurement deviation of the flow decreased, and the temperature output of the thermocouple sensor showed differences in response time and stability depending on the method used.

**Keywords:** Hot gas wind tunnel, Infrared signature suppression system, Model test, Reliability evaluation, Statistics

\* Corresponding Author: yst31@deu.ac.kr  
Manuscript received October 31, 2023 / revised November

08, 2023 / accepted November 28, 2023  
1) 동의대학교 함정적외선신호연구소, 제1저자 및 교신저자

## 1. 서론

비교적 균일한 환경인 해상에서 작전을 수행하는 함정은 주변과 큰 대비 복사 신호를 보여 적외선 유도무기에 표적이 된다. 따라서, 현대 함정에서는 적외선 신호저감 장치를 설치하여 주변 환경과의 대비 복사 신호를 낮추고 있다 (Yoon et al., 2017).

함정은 생의 주기가 매우 긴 전략 자산으로 임무 및 운용 해역에 따라 배의 크기와 엔진이 달라진다. 때문에 IRSS는 함정의 크기 및 목적에 맞추어 주문 제작되며, 설계 후 모형시험으로 성능을 검증한다. 따라서, 모형시험으로 정확한 성능을 평가하기 위해서는 시험에서 사용되는 계측 장비들의 신뢰성 평가를 사전에 수행해야 한다.

신뢰성 평가의 목적은 시스템이 주어진 조건에서 일정 기간 동안 고장 없이 최초의 성능을 유지할 수 있는 지표를 도출하는 것이다(Roy et al., 2012; Roy et al., 2014; Jacob, 2016). 따라서, 제품 개발 및 출시 단계에서 신뢰성 평가는 필수적이다.

신뢰성 평가에 관한 국내 연구로는 태양열 집열기의 열적 성능 및 효율을 향상하고 정량적으로 신뢰성을 평가할 수 있는 연구(Choi et al., 2017; Kim et al., 2021), 자동차의 연료 저장 시스템 및 전조등에 대한 신뢰성 평가 연구(Jang et al., 2008; Yang et al., 2022), 3D 프린트 출력물에 대한 피로 신뢰성 평가(Moon et al., 2022) 그리고 국방 분야에서 유도탄의 수명 관리를 위한 신뢰성 평가 방안 연구 등이 발표되었다(Lee et al., 2021).

본 연구에서는 IRSS 모형시험에 사용되는 장비들이 같은 조건에서 동일한 물리량을 계측할 수 있는지에 대한 신뢰성을 평가하였다. 평가 항목은 피토크로 계측된 유체의 속도와 온도 그리고 열전대 센서로 가열 판을 계측한 온도이다.

계측 결과 열 풍동 시험기의 풍속이 증가할수록 유체 속도와 온도의 계측 편차가 감소하였으며, 열전대 센서의 온도는 사용 방법에 따라 반응 속도 및 민감도의 차이를 보였다.

## 2. 열유동 계측실험

### 2.1 실험 장비

열유동 계측실험을 위해서는 실제 함정용 엔진과 유사한 유동을 구현하는 장비가 필요하다. 본 연구에서는 함정용 가스터빈 엔진(LM2500)의 1/8 규모로 유동을 구현할 수 있는 열 풍동 시험기를 사용하였으며, 이에 대한 형상을 Fig. 1에 보였다.

열 풍동 시험기는 풍량을 조절하는 송풍기, 온도를 조절하는 가스버너와 배관 그리고 연결 덕트로 구성되어 있으며, 연결 덕트 끝에는 속도와 온도를 계측할 수 있는 지그와 IRSS 축소 모형이 있다. 본 실험 연구에서는 계측기의 신뢰성 평가를 위해 축소 모형은 고려하지 않았다.

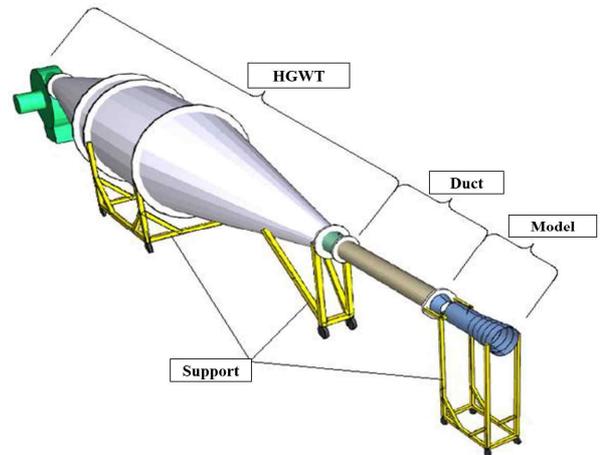


Fig. 1 Heat gas wind tunnel

열 풍동 시험기 끝에 연결 덕트에는 센서가 둘레 방향으로 30도씩 그리고 반경 방향으로 자유롭게 움직일 수 있도록 구성되어 있다. 이는 관내 유동 특성을 잘 계측하기 위한 것으로 연결 덕트 지그와 피토크를 확대하여 Fig. 2에 보였다.

유체의 압력과 온도를 계측할 수 있는 피토크는 관내 유동 흐름과 평행한 방향으로 설치해야 하며, 관내 중앙에서 벽면까지 계측할 수 있도록 해야 한다.

본 연구에서 사용한 피토크의 상세 제원을 Fig. 3에 보였다. 피토크의 두께는 가능한 얇은 3mm를 사용하였으며, 온도 계측이 가능하도록 열전대 센서가 내장된 제품을 사용하였다.

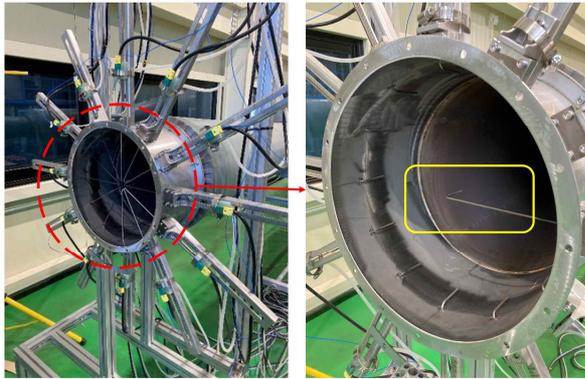


Fig. 2 Installation zig of pitot tube

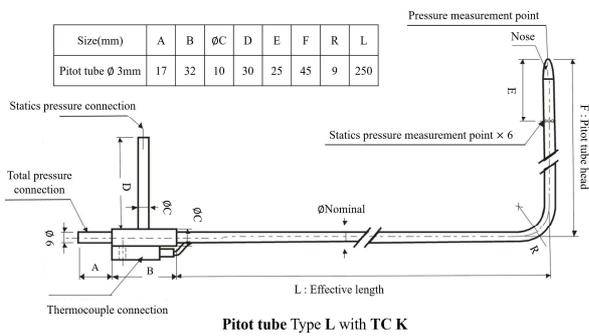


Fig. 3 Information of pitot tube

피토관은 유체 전압(total pressure), 정압(static pressure) 그리고 동압(dynamic pressure)에 대한 관계식을 기반으로 하고 베르누이 방정식에 기반한 속도 산출식으로 압력을 속도로 변환한다. 그리고 이를 계산하기 위한 관계 식은 다음 (1), (2)과 같다.

$$P_{total} = P_{static} + P_{dynamic} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_{static})}{\rho}} \quad (2)$$

여기서,  $P$ 는 압력,  $V$ 는 속도  $\rho$ 는 기체의 밀도로 이상기체 상태 방정식을 따르며, 그 식은 다음 (3)과 같다

$$\rho = \frac{P_{atm}}{RT} \quad (3)$$

여기서,  $P_{atm}$ 은 표준 대기압,  $R$ 은 기체 상수 그리고  $T$ 는 절대온도이다.

본 연구에서는 유체의 온도와 압력을 고려한 속도를 산출하기 위해 식 (2)와 (3)을 고려한 다음 식(4)으로 속도를 계산하였다.

$$V = \sqrt{\frac{2 \times R \times T \times (P_{total} - P_{static})}{P_{atm}}} \quad (4)$$

## 2.2 실험 계측 방법

열 풍동 시험기의 송풍기는 0부터 60Hz까지 팬의 속도를 조절하여 유속을 발생시킨다. 본 연구에서는 송풍 속도를 16, 32, 48Hz 총 3단계로 나누어 유속을 계측하였다. 또한 본 연구의 목적은 계측기의 신뢰성을 평가하는 것으로 열 풍동 시험기의 가스버너는 사용하지 않고 자연적으로 생성된 내부 온도만 계측하였다.

열 풍동 시험기 끝에 설치된 피토관은 30°의 각도로 총 12개가 관내 중앙에서 벽면까지 움직일 수 있도록 설치되어 있다. 따라서, 피토관을 1번부터 12번까지 번갈아 가며 출구 중앙에 위치시켜 실험 조건별로 100개 이상의 자료를 측정하도록 하였다. 이는 추후 실험 분석에서 중심극한 정리를 기반으로 정규 분포를 계산하기 위함이다.

## 3. 표면 온도 계측실험

### 3.1 실험 장비

IRSS 모형시험의 성능평가 항목은 배출된 유체의 온도와 속도 그리고 금속 표면의 온도이다. 따라서, 금속 표면을 가열하기 위해 온도 조절을 할 수 있는 가열 판(heat plate, Wisd/HP-20D)을 사용하였으며, 표면 온도 계측실험을 구성을 Fig. 4에 보였다.



Fig. 4 Experiment setup for thermocouple test

가열 관은 내부에 설치된 발열 코일에 전기저항을 발생해 온도를 조절하여 표면의 온도 균일성이 보장되지 않는다. 이러한 이유로 열화상 시스템으로 표면 온도 균일성을 확인한 후 계측실험을 수행하였다.

온도계는 열전대 센서를 사용하였으며, 계측결과를 비교 분석하기 위해 기준으로 사용할 수 있는 접촉식 온도계(Fluke 80-PK)를 추가로 사용하였다.

### 3.2 실험 계측 방법

열전대 센서는 두 개의 서로 다른 매질로 구성된 와이어를 연결하여 전기가 흐를 수 있는 순환 구조를 이루어야 한다. 그리고 계측 지점에서 온도 값이 변하면 열저항이 발생한 물리량을 계측하여 온도로 나타낸다.

일반적으로 열전대 센서를 이용하여 금속 표면의 온도를 계측하기 위해서는 두 개의 와이어를 여러 번 꼬아낸 후 금속 표면을 용융시켜 결합한다. 하지만, 열전대 와이어를 여러 번 꼬아내면 계측 오류를 보일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 열전대 센서 와이어의 꼬인 정도에 따른 온도 계측 결과를 비교하였다. 또한 용융 전 두 개의 와이어를 미리 접합시킨 후 금속 표면에 결합하는 조건도 확인하였다.

열전대 센서 와이어의 꼬인 횟수에 따른 8가지 경우를 Fig. 5에 보였으며, 와이어의 꼬인 횟수의

정도와 용융 및 접합에 대한 조건을 확인할 수 있다.

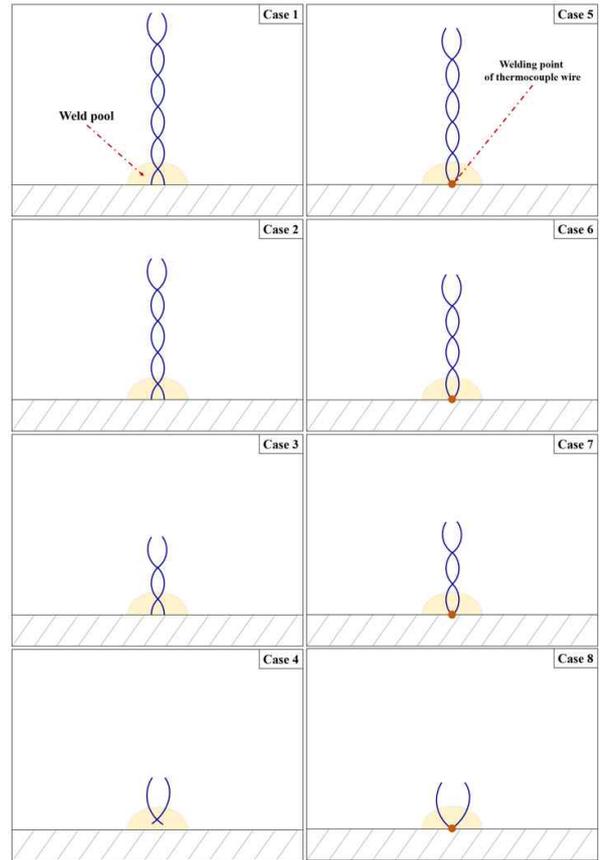


Fig. 5 Case for thermocouple test

## 4. 실험 결과

### 4.1 열유동 계측 결과

피토크를 통해 계측된 속도, 온도와 같은 물리량은 차압계 및 디지털 기록계를 통해 전자 신호로 변환되어 저장된다. 그리고 디지털 기록계는 사용 전에 고유 신호를 초기화해야 한다. 디지털 기록계의 교정 전과 후를 구분하여 계측한 결과를 Fig. 6에 보였다.

Fig. 6는 12개의 피토크, 차압계 그리고 디지털 기록계에 대한 초기 안정성을 확인한 후 교정을 수행한 것으로 교정 전과 후를 비교하여 기록 장

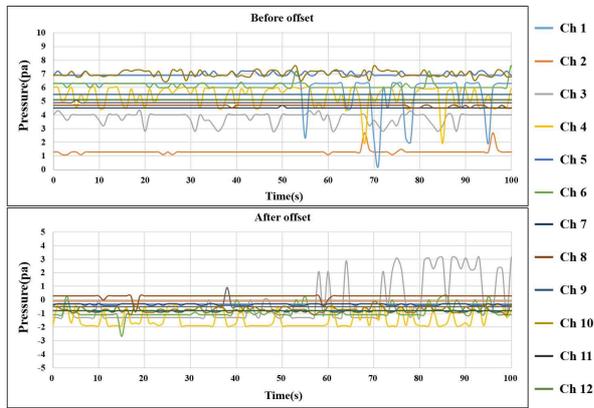


Fig. 6 Calibration of digital recorder

치의 안정성이 확보된 것을 확인할 수 있다.

계측 장비들의 교정이 완료된 후 풍동 시험기의 작동 조건 변화에 따른 속도와 온도를 계측하였으며, 그 결과를 속도와 온도로 구분하여 Fig. 7에 보였다.

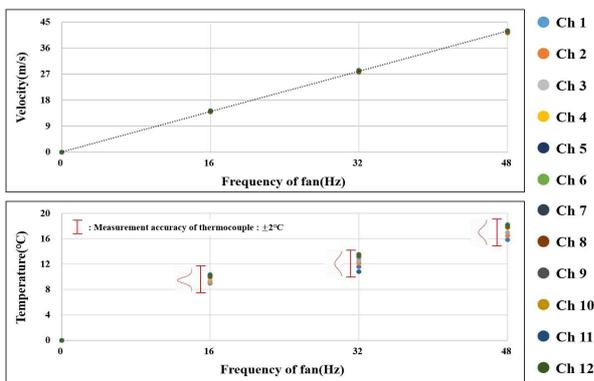


Fig. 7 Result of pitot tube reliability test

Fig. 7에서 송풍기의 작동 조건을 16, 32, 48Hz 까지 증가시키면 유체의 속도는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 온도 계측 결과에서도 송풍기의 속도가 올라가면 송풍기의 가열로 인해 온도가 소폭 상승하였다. 그리고 12개의 피토크관에서 온도 결과는 약  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 차이를 보였다. 이 차이는 일반적인 열전대 센서의 오차를 고려하여 큰 영향이 없음을 확인하였다.

#### 4.2 표면온도 계측 결과

표면 온도 계측시험에서 열화상 시스템을 이용해 가열 관의 표면 온도 균일성과 실험 열전대의 계측 장면을 Fig. 8에 보였다. 가열 관은 내부에 있는 열저항 코일을 이용하여 표면 온도를 조절한다. 따라서, 열이 집중되는 중앙을 제외한 모서리에서 불균일성을 보였다.

이러한 이유로 열이 집중되는 중앙에 시편을 위치시켜 실험 조건에 따른 열전대의 온도 변화를 측정하였다. 또한, 열전대 센서는 가열 관에 직접 용접이 불가능하다. 따라서, 시편을 제작한 후 열전도를 고려해 시편에 전도된 온도를 계측하였다.

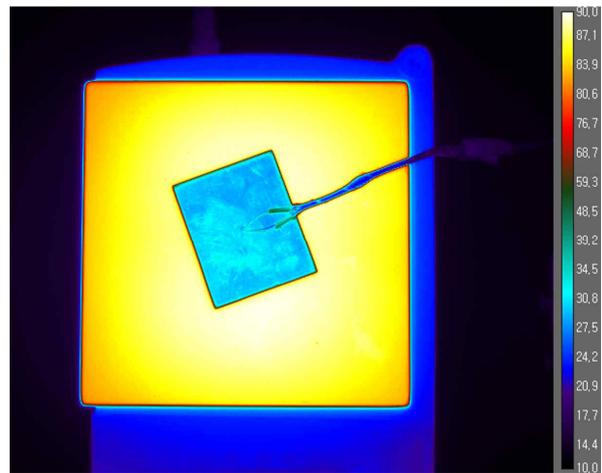


Fig. 8 Thermography of thermocouple test

본 연구에서 설정한 열전대 센서 와이어의 꼬인 횟수에 따른 8가지 조건에서 시간변화에 따른 온도 계측 결과를 Fig. 9에 보였다. 가열 관은  $100^{\circ}\text{C}$ 로 온도를 설정하였으며, 접촉식 온도 센서를 통해 계측한 비교 기준값은 약  $91^{\circ}\text{C}$ 로 계측되었다.

Fig. 9에서 비교 조건을 기준으로 꼬인 횟수가 가장 많은 case 1과 case 5에서 약 33%의 오차를 보였으며, 꼬인 횟수가 가장 적은 case 8에서 약 2.8%의 오차를 보였다. 결과적으로 꼬인 횟수가 많아질수록 열전대 센서 와이어가 교차해 접촉되는 부분이 증가하여 계측 오차가 커지는 것을 확인하였다.

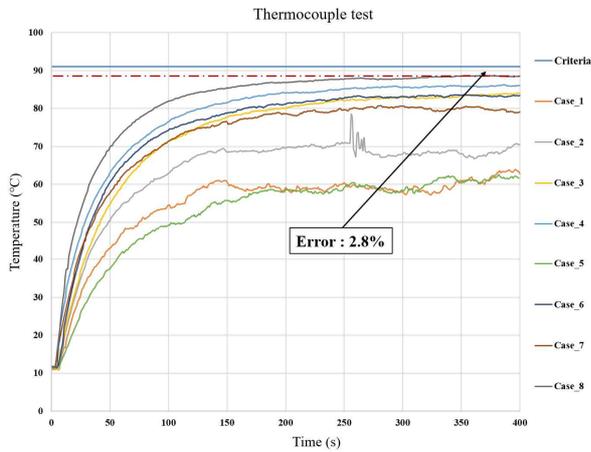


Fig. 9 Result of thermocouple test

## 5. 결론

본 연구에서는 IRSS의 축소 모형시험을 위한 계측기들의 신뢰성 평가에 관한 연구를 수행하였으며, 본 연구의 내용과 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 열 풍동 시험기의 송풍 조건에 따른 유체의 속도와 온도를 12개의 피토포관을 통해 계측하였으며, 송풍 팬의 속도가 올라갈수록 유체의 속도는 선형적으로 증가하였고 유체의 온도는 열전대 센서의 오차 범위 내의 차이를 보였다.

둘째, 가열 판을 이용하여 열전대 센서 와이어의 꼬인 횟수 변화에 따른 온도 계측의 정확성과 민감도를 확인하였다. 그 결과 꼬인 횟수가 증가할수록 계측 오차가 커지며, 꼬인 횟수가 낮아질수록 계측 오차가 감소하는 것을 확인하였다.

이와 같은 결론을 통해 12개의 피토포관은 동일한 계측 조건에서 유사한 결과를 보였으며, 열전대 센서는 꼬인 횟수를 최소화할수록 계측 정확성이 향상되었다. 이러한 결론을 바탕으로 추후 IRSS의 모형시험에서 피토포관을 이용한 유체의 온도와 속도 그리고 열전대 센서의 표면 온도 계측 결과는 신뢰성을 보일 것으로 예상하였다.

## References

- G. J. Jang, Y. M. Choi, B. G. Ahn, T. W. Lim(2008). The Evaluation of Reliability for the High Pressure Hydrogen Storage System of Fuel cell Vehicle, The Korean Hydrogen and New Energy Society, 19(4).
- H. C. Moon, W. S. Noh, H. S. Ryu, J. H. Doh(2022). Deep Neural Network-Based Reliability Assessment on Fatigue Life of PLA Specimens Considering Unvertainty of Additive Manufacturing, International Journal of Reliability and Applications, 22(1), 37-47, <https://doi.org/10.33162/JAR.2022.3.22.1.037>
- H. W. Choi, Y. B. Kim, J. I. Yoon, C. H. Son, K. H. Choi(2017). Experimental Study for Estimation of Air Heating Performance and Improvement of Thermal Performance of Hybrid solar Air-water Heater, Journal of the Korean Solar Energy Society, 37(1), <https://doi.org/10.7836/kses.2017.37.1.047>
- Jacob Fraden(2016), Handbook of Modern sensors : Physics, Designs, Applications, Springer Link.
- M.S. Yang, J. H. Chung, C. H. Bai, J. H. Kim, S. M. Oh, C. S. Kim, J. S. Nam, J. S. Shim(2022), Accelerated Life Test for Leveling Device of Automobile Headlamp, The Korean Society of Mechanical Engineers, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2022.46.2.119>
- Roy Billinton, Ronald N. Allan(2012), Reliability Evaluation of Engineering Systems, Springer Link.
- Roy Billinton, Ronald N. Allan(2014), Reliability Evaluation of Power Systems, Springer Link.
- S. T. Yoon, Y. J. Cho, D. E. Ko(2017). A Study on the Heat Flow Analysis of Infra-Red Signature Suppression System for Naval ship, Journal of the Korea Academia Industrial cooperation Society, 18(11), <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.11.740>
- Y. H. Lee, J. Y. Kim, K. S. Moon, K. S.

Lee(2021). A Study on Stockpile Reliability Program for Effective Life Cycle Management of Domestically Developed Missile, Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, 28(1), 81-91, <https://doi.org/10.52798/KADIS.2021.28.1.7>

Y. J. Kim, E. S. Wang, B. J. Lee, H. K. Shin, E. J. Lee, E. C. Kang(2021). A Thermal Performance Rliability Study on A Solar Air Collector depending on Ambient Temperature Variation, Journal of the Korean Solar Energy Society, 41(3), 139-147, <https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.3.139>



**윤 석 태 (SeokTae Yoon)**

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