

상태기반정비를 활용한 레이더 도파관 결로·결빙 예방에 관한 연구

김영길^{1*}, 손민정¹, 노시찬¹, 김성진²
¹국방기술품질원, ²한화시스템

A Study on Prevention of Condensation and Freezing in Radar Waveguide using Condition Based Maintenance

Young-Gil Kim^{1*}, Minjeong Son¹, Si-Chan Noh¹, Seong-Jin Kim²
¹Defense Agency for Technology and Quality
²Hanwha Systems

요약 상태기반정비(CBM : Condition based maintenance, 이하 CBM)는 내·외장형 센서를 통해 데이터를 획득하고 분석하여 장비의 상태를 평가하는 정비 방법으로, 첨단 무기체계의 운용가용도 향상과 정비비용 감소를 위해 확대 적용되고 있는 정비 방법이다. 그러나 무기체계에서 전자장비의 비중이 점차 높아짐에도 불구하고, 기존의 CBM은 주로 엔진, 구조안전성과 같은 기계적 결함 검출에 치중되어 있어 전자장비에 CBM을 적용하기 위한 실증적 연구가 부족하다. 따라서, 전자장비에 CBM을 적용하기 위한 연구가 필요하며, 전자장비에 CBM을 적용한다면 장비 가용도 향상시키고 유지비용을 절감할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 다빈도 고장 전자장비 중의 하나인 레이더 도파관의 결로 및 결빙 현상을 해결하기 위한 CBM 적용 연구사례를 제시한다. CBM 적용 장비의 도파관 결로 및 결빙 현상의 방지를 위한 주요 구성품 및 동작 메커니즘을 조사하고, 장비에서 도파관 결로 및 결빙 현상이 발생하는 주요 고장원인을 분석하여 CBM에 적합한 센서를 선정했다. 이후 연구실 환경에서 주요 고장 조건을 모사하여 데이터를 획득하고, 획득한 데이터를 분석하여 장비의 이상 탐지 알고리즘과 고장 분류 모델을 제안했다. 이어서 제안한 고장분류 모델에 대한 효과성을 검증하고, 연구의 발전방안을 제안했다.

Abstract Condition-based maintenance(CBM) is a maintenance method that evaluates equipment conditions by acquiring and analyzing data from the equipment through internal or external sensors. CBM is being expanded to improve operational availability and reduce maintenance costs of advanced weapon systems. However, despite an increasing proportion of electronic equipment in an advanced weapon system, the existing CBM application in the system is mainly focused on detecting mechanical defects, such as engine and structural safety-related defects. So, empirical studies on applying CBM to the electronic equipment in the system are insufficient. Therefore, research to apply CBM to electronic equipment is required, and if CBM is applied to the electronic equipment, operational availability can be improved, and maintenance costs can be reduced for the system. Hence, in this study, an application case of CBM to prevent condensation and freezing in a radar waveguide, one of the most frequently broken electronic equipment, was developed. First, a sensor suitable for CBM was selected by examining the main components and operating mechanisms for preventing waveguide condensation and freezing in the CBM-applied equipment and analyzing the main causes of waveguide condensation and freezing in the equipment. After that, data were obtained from the equipment by simulating major failure conditions for the equipment in a laboratory environment. Further, an anomaly detection algorithm and failure classification model of the equipment were proposed by analyzing the obtained data. Finally, the effectiveness of the proposed failure classification model was verified, and a research improvement strategy related to the application case was suggested.

Keywords : Condition Based Maintenance, Radar Waveguide, PHM, Condensation, Freezing, Sensor

*Corresponding Author : Young-Gil Kim(Defense Agency for Technology and Quality)

email: ykim0033@daq.re.kr

Received June 9, 2022

Revised July 6, 2022

Accepted July 7, 2022

Published July 31, 2022

1. 서론

무기체계가 첨단화되고 구조가 복잡해짐에 따라 다양한 전기적·기계적 고장유형으로 인해 운용유지 간에 가동률이 저하되고, 정비비용도 높아지고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 정비방법도 Fig. 1과 같이 발전하고 있다. 과거에는 고장이 발생하면 해당 장비를 정비 혹은 교체하는 사후정비(CM : Corrective maintenance)를 수행하였다[1]. 신뢰성설계 기술의 발전에 따라 평균 고장간격(Mean Time Between Failure)과 평균고장시간(Mean Time To Failure) 등을 고려하여 특정 주기를 정한 뒤, 정해진 주기마다 정비를 수행하는 시간기반정비(TBM : Time based maintenance)로 발전하였다. 또한, 현대에 들어 네트워크 기술, 센서 저전력화, 소형화 기술 등의 발전에 의해 고장예지 및 건전성관리(PHM : Prognostics and Health Management, 이하 PHM) 기술이 적용되어 장비의 현재 상태를 모니터링하고 장비의 이상을 검출하는 CBM으로 발전하고 있다[2].

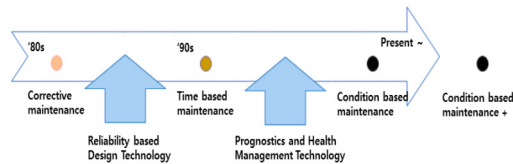


Fig. 1. Maintenance method development trend according to technological development

정비방법의 발전 및 중요성 부각에 따라 방위산업 분야에서도 국방전력발전업무훈령의 개정 및 총수명주기업무훈령의 제정을 통해 CBM을 무기체계에 적용하도록 규정하고 있다[3,4]. 또한, 방위산업에서 CBM의 확대적용을 위한 정책 및 프로세스에 대한 연구[5-8]를 수행하거나 주요 구성품들의 CBM 적용을 위한 기술적 연구가 수행되고 있다[9-17].

CBM이 적용된 무기체계의 대표사례로는 항공 및 함정 무기체계가 있다. 항공 무기체계는 상태감시시스템(HUMS : Health and Usage Monitoring System)이라는 명칭으로 CBM과 유사한 시스템을 적용하고 있다. 상태감시시스템은 센서로 부터 운용데이터를 획득하여 주요장비 상태를 모니터링 하고 정비시기를 결정하는 안전시스템으로 CBM과 개념이 유사하다. 이러한 상태감시시스템을 이용하여 진동데이터를 분석해 기어박스의 균열을 모니터링 하는 시스템을 구축하거나 엔진 내부에

축적되는 파편 수준을 모니터링하여 열화를 조기발견하고 사전 진단하는 시스템을 구축하였다[18,19]. 함정 무기체계 또한 CBM과 유사한 시스템으로 통합조건평가시스템(ICAS : Integrated Condition Assessment system)을 운영하고 있다. 통합조건평가시스템은 가스터빈, 추진기와 같은 추진계통의 주요장비 및 디젤발전기와 같은 보기계통 주요장비의 운용 데이터와 진동감시시스템을 통한 데이터를 바탕으로 실시간 성능분석 및 모니터링을 수행한다[20,21].

하지만 현재 무기체계에 적용된 CBM은 주로 항공, 함정 무기체계와 같이 엔진, 구조건전성과 같은 기계적 결함 검출에 집중되어 있으며, 레이더와 같은 전자장비에 대한 연구가 부족하다.

도파관은 레이더의 고주파, 고전력을 전송하는 전송로로 도체로 만든 속이 빈 도관이다. 내부에서 전파의 반사로 RF신호를 전송하는 전송로이므로 내부의 수분이나 이물질이 있으면 시스템이 정상적으로 동작하지 못하기 때문에 도파관의 결로·결빙을 방지하는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 도파관의 결로·결빙현상을 방지할 수 있도록 CBM을 적용했다. CBM을 적용한 무기체계의 도파관에 결로·결빙현상을 발생시키는 현상을 정의하고 실험실 레벨에서 고장조건을 모의한 뒤 데이터를 획득하였으며 획득한 데이터를 기반으로 결로·결빙이 발생하는 고장분류모델을 만들고 검증했다. 마지막으로 연구의 한계점 및 발전방안을 제안했다.

2. 연구배경

2.1 상태기반정비(CBM)

CBM은 학술적으로 많은 정의를 가지지만, 본 연구에서는 내·외장형 센서 및 검사장비 등을 통해 얻은 데이터로 장비의 상태를 실시간으로 평가하고, 막 시작되는 고장을 예측하는 기술로 정의한다[22,23].

CBM은 내·외장형 센서 및 검사장비 등을 추가로 부착하고 모니터링 시스템을 구축하기 때문에 설계가 복잡해지고 비용이 증가한다는 문제점을 가진다. 이러한 단점을 최소화하기 위해서 CBM 시스템을 구축할 때에는 Fig. 2와 같은 절차를 이용한다. 절차는 크게 CBM 적용 품목을 선정하기 위한 단계와 실제 CBM 기술을 적용하는 단계로 구분할 수 있다[6,8].

CBM 적용 품목을 선정하기 위한 단계에서는 시스템

분석을 통해 중요기능품목(FSI : Function Significant Item)을 선정하고, 고장유형영향 및 치명도분석(FMECA : Failure Modes Effects and Criticality Analysis)을 수행하여 고장메커니즘, 고장원인 등을 파악한 뒤 분석한 결과를 바탕으로 품목별 적합한 정비방식을 수립한다. CBM 기술적용은 실제 기술을 적용하는 단계로서 CBM을 적용하는 주요장비들의 상태를 확인할 수 있는 측정 가능한 데이터들을 식별한 뒤, 측정방식과 설치 위치를 결정한다. 그 후 센서를 통해 데이터를 지속적으로 획득 및 분석하여 정비시기 및 방법을 결정하고 결과 데이터를 피드백하여 CBM의 정확도를 지속적으로 개선한다.

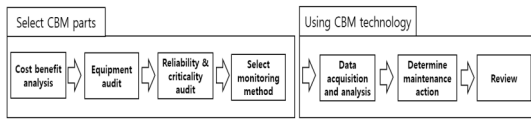


Fig. 2. Condition monitoring system development flowchart

Fig. 3은 CBM 기술 적용단계를 세부적으로 표현한 그림이다. CBM은 PHM기술을 기반으로 구축하는 정비 형태이며, CBM은 센서를 통해 데이터를 획득하고 획득한 데이터에 신호처리를 하여 장비가 정상적으로 동작하는지 지속적으로 모니터링한다[23]. CBM+는 CBM 개념에 장비의 잔존유효수명(RUL : Remaining Useful Life, 이하 RUL)을 예측하는 예측정비의 개념이 더해진 정비방법이다[7].

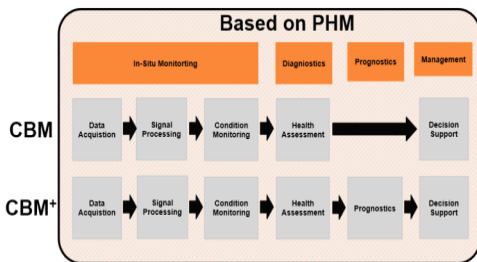


Fig. 3. Condition based maintenance procedure

CBM는 Fig. 4와 같이 장비의 상태를 모니터링하여 고장의 발생 징후가 있을 시 정비를 수행하기 때문에 사후정비와 시간기반정비보다 정비비용감소, 운용가용도 증가, 안정성 향상, 장비 수명연장 등 다양한 측면에서 장점을 지닌다[23,24].

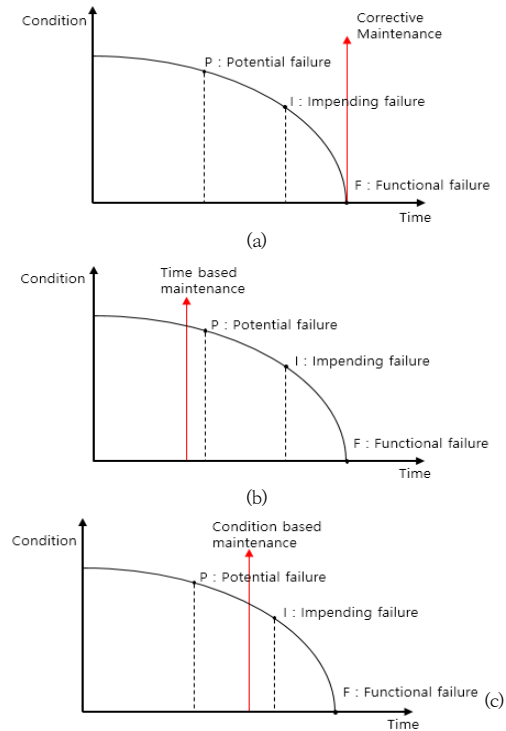


Fig. 4. Maintenance methods and features
(a) Corrective maintenance (b) Time based maintenance (c) Condition based maintenance

2.2 레이더 도파관 결로·결빙현상

레이더시스템은 전파를 방사하여 표적에 반사되는 신호를 분석해 표적을 식별하고 위치를 획득하는 감시정찰 체계이다. 원거리의 표적을 정밀하게 측정하기 위해 레이더는 높은 주파수 신호와 높은 전력을 필요로 한다. 도파관은 전송손실이 적고 높은 전력에서 사용이 가능하기 때문에 레이더의 신호 송·수신부에서 주로 이용된다.

도파관은 도체로 만든 속이 빈 도관으로, 내부에서 반복적인 전파의 반사를 일으켜 RF신호를 전송한다. 내부에서 전파를 반사시켜 신호를 전송하기 때문에 도파관의 내부에는 전파의 진행을 방해하는 수분이나 이물질이 없어야 한다. 따라서 레이더시스템에서는 도파관 내부의 이물질 유입방지 및 습도조절을 위해 건조기(dehydrator)를 보유하고 있다. 하지만 도파관이 항온·항습이 유지되지 않는 외부에 노출되어 있거나, 건조기가 제대로 동작하지 않는다면 온·습도의 영향을 받는다. 도파관에서 온·습도에 의해 영향을 받는 부분은 결로·결빙현상으로 도파관 표면의 온도가 도파관 내부의 이슬점(dew point)

보다 낮아지게 될 경우 발생한다. 도파관 내부에 결로·결빙현상이 발생할 경우, 도파관의 임피던스 매칭이 틀어져 신호를 정상적으로 전송시키지 못할 뿐만 아니라 반사되는 전파에 의해 송수신부가 손상을 입을 수 있다. 이슬점은 Eq. (1)과 같이 구할 수 있으며 상대습도의 값이 높을수록 이슬점의 온도가 높아지므로 도파관 내부의 상대습도의 값을 낮게 유지시키는 것이 중요하다[25].

$$Dew\ point = \frac{243.12 \times \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.62 \times T}{243.12 + T} \right)}{17.62 - \left(\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.62 \times T}{243.12 + T} \right)} \quad (1)$$

where, RH denotes relative humidity,
T denotes temperature(Celsius)

3. 온습도 상태기반정비 방안

3.1 적용장비 선정 및 원인분석

본 연구에서는 CBM 적용 대상 무기체계로 천마(K-SAM)를 선정하였다. 무기체계 선정 시 도파관 사용 여부, 도파관 결로·결빙으로 인한 정비문제 발생여부 등 다양한 측면을 고려하여 선정하였다.

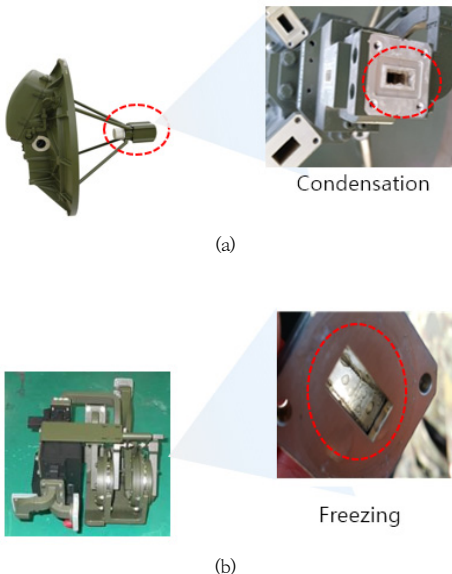


Fig. 5. Waveguide condensation and freezing
(a) Condensation (b) Freezing

천마는 추적레이더 도파관이 외부에 노출되어 있는 구조로 되어 있어 Fig. 5와 같이 실제 도파관 내부 결로·결빙 현상에 의한 고장이 발생한다. 정비된 사례를 분석하였을 때, 도파관 결로·결빙현상의 많은 원인이 공기건조기의 고장 또는 성능저하로 확인되었다. 현재 천마는 도파관 내부에 결로·결빙현상이 발생하여도 직접적으로 도파관 결로·결빙을 확인가능한 자체진단기능(BIT : Built In Test, 이하 BIT) 시스템이 없어 확인이 제한된다. 현재는 고장배제절차에 따라 정비를 수행하기 때문에 정비시간이 오래 걸리고, 장비의 운용가용도도 낮아진다. 따라서, 도파관 결로·결빙현상의 주요 원인으로 파악된 천마(K-SAM) 공기건조기(dehydrator)를 CBM 적용대상 장비로 선정했다.

천마 공기건조기는 레이더의 도파관 내부의 습기를 제거하고 도파관 내 일정한 공기압력을 유지하여 이물질이 유입되는 것을 방지하는 장비로 건조통(air drying vessel) 2개, 캠축(camshaft), 히터(heater)와 같은 주요 구성품으로 이루어져있다. 공기건조기는 Fig. 6과 같이 전원이 인가되면 일정시간마다 캠축을 이용하여 건조통을 교대로 사용하며, 건조통 내부의 건조제를 이용해 도파관 내부의 습도를 일정 값 이하로 유지시킨다. 이 때 사용하지 않는 건조통은 히터를 이용하여 흡수된 건조제를 재생시켜 지속적인 건조능력을 유지하도록 한다.

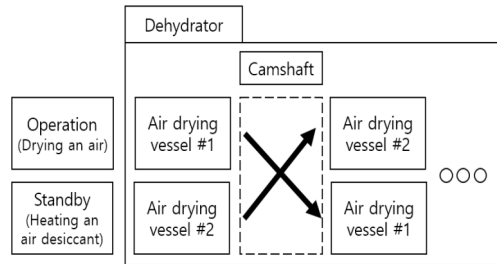


Fig. 6. K-SAM dehydrator operation logics

Table 1에 도파관의 결로·결빙현상의 주요 원인인 공기건조기의 비정상적 동작을 유발하는 원인을 주요 구성품과 관련하여 정리하였다. 첫째, 공기건조통 내부의 건조제가 노후화되어 습도 제어기능이 약화되는 경우로, 공기건조기의 습도제어기능이 저하된다. 둘째, 공기건조기 내부의 공기건조통을 번갈아가며 바꿔주는 캠축의 고장으로 인해 1개의 공기건조통이 지속적으로 사용되는 경우로, 공기건조기의 흡습능력이 저하된다. 셋째, 히터의 결함으로 인해 건조제를 흡습능력을 재생시키지 못하는 경우로 흡습능력이 저하된다.

Table 1. Dehydrator main components and failure types

Failure type	Cause	Symptoms
Air drying vessel defect	Air desiccant obsolescence	Dehumidification function deteriorated
Camshaft defect	Control-motor fault	Alternating operation of air drying vessel is not possible
Heater defect	Heater & motor fault	Air desiccant heating and drying are not possible

3.2 데이터 수집 및 분석

공기건조기 주요 구성품들의 고장이 발생하면 공기건조기의 습도제어 능력이 약화된다. 따라서, 공기건조기의 습도데이터 측정을 통해 건조통의 건조능력, 캠축의 동작여부, 히터의 히팅능력을 판단할 수 있다. 또한, 온·습도데이터를 기반으로 도파관 내부의 이슬점을 구하고, 외부 운용환경의 온도를 활용한다면 도파관 내부에 결로 및 결빙의 발생 여부를 판단할 수 있다.

공기건조기 내부의 온·습도 데이터를 확보하기 위해서 Fig. 7과 같이 데이터 수집환경을 구축했다. 천마는 전력화된지 20년이 넘는 무기체계로서 공기건조기 내부의 센서 활용이 제한된다. 따라서 공기건조기에 별도의 관을 연결하여 내부의 차폐공간을 조성하고 온·습도센서(thermo-hygrometer)를 부착하여 공기건조기 내부의 온·습도 데이터를 수집하고 저장하는 시스템을 구축했다.

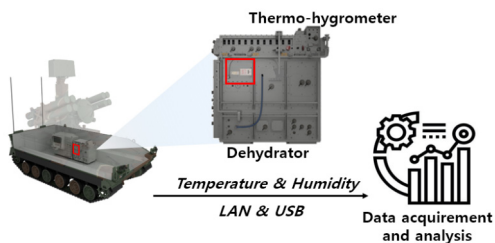


Fig. 7. Temperature and humidity data acquisition method of K-SAM dehydrator

실험은 공기건조기가 정상 상태인 경우와 비정상 상태인 경우로 구분하여 수행했다. 시험은 건조통 교체주기 T를 기준으로 약 3~4 cycle간 수행했다. 비정상 상태의 경우 Table 1에서 분석한 고장유형을 바탕으로 실험실 환경에서 고장유형별 상황을 모의 조성하여 실험을 수행했다.

Fig. 8은 공기건조기가 정상 상태인 경우의 온·습도 데이터이다. 습도는 Fig. 6의 공기건조기 동작 메커니즘에 따라 교체주기 T에 맞추어 정현파 형태를 가지며 약 30% 이하의 값을 가진다. 온도의 경우 뚜렷한 특징을 보이지 않았다.

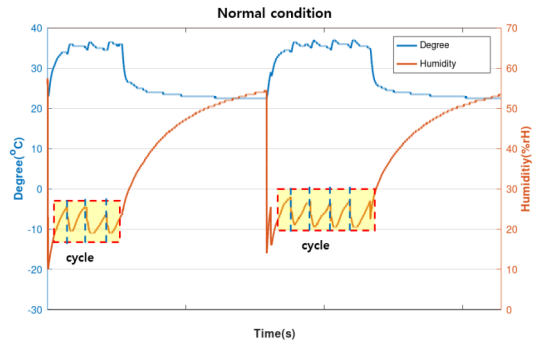


Fig. 8. Dehydrator normal condition temperature and humidity data

비정상 상태는 Table 1에서와 같이 건조제 노후화로 인한 건조통 결함, 캠축 결함, 히터 결함과 같이 3가지 고장유형으로 분류하였으며, Fig. 9는 각 고장유형별 온·습도 그래프이다.

건조제 노후화로 인한 건조통 결함(air drying vessel defect)의 온·습도 데이터는 Fig. 9 (a)와 같이 나타났으며, 2개의 건조통 중 1개의 건조통에만 고장조건을 유발하여 시험을 수행했다. 온도의 경우, 의미있는 특징을 보이지 않았다. 습도의 경우 빨간색 박스로 표시된 부분과 같이 정상적인 건조통과 교체하였을 때 보다 초기 시점부터 습도가 높은 값을 가진다.

캠축 불량(camshaft defect)의 온·습도 데이터는 Fig. 9 (b)와 같이 나타났다. 온도는 정상조건 및 다른 조건들과 마찬가지로 의미있는 특징을 가지지 않았다. 습도의 경우, 캠축의 고장으로 인해 1개의 건조통만 사용하여 공기건조기 내부의 습도가 지속적으로 높아지는 것을 확인할 수 있다.

히터 불량(heater defect)인 경우의 온·습도 데이터는 Fig. 9 (c)와 같이 나타났다. 온도는 다른 조건들과 마찬가지로 특별한 경향을 나타내지 않았다. 습도는 건조통 내부 건조제가 흡습능력을 재생시키지 못하여, 건조통 교대 시 이전 습도 값에서 감소하지 않고 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

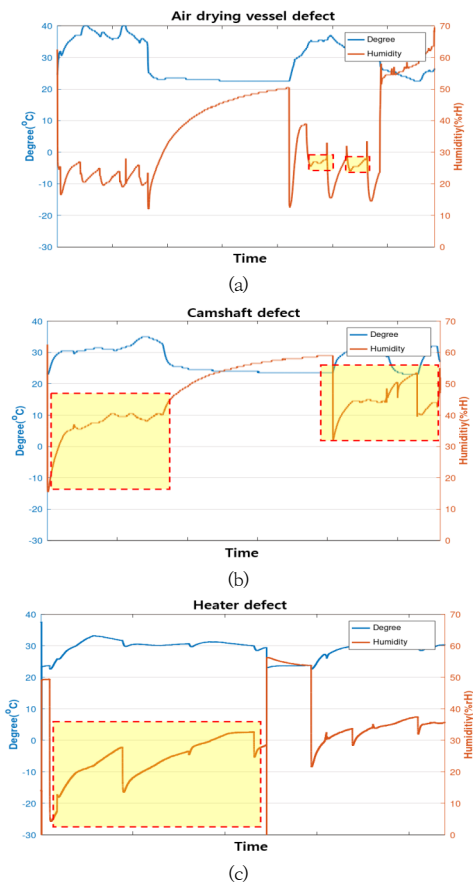


Fig. 9. Dehydrator abnormal condition temperature and humidity data
 (a) Air drying vessel defect (b) Camshaft defect
 (c) Heater defect

공기건조기의 CBM 적용을 위해 첫 번째로 정상 상태와 비정상 상태의 구분을 위한 기준을 수립하였다. 실험

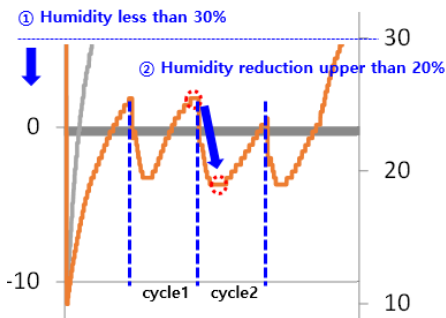


Fig. 10. Establishment for standard of dehydrator of normal and abnormal condition

을 통해 획득한 온·습도 그래프를 분석한 결과 Fig. 10과 같이 정상인 경우의 특징을 얻을 수 있었다. 공기건조기가 정상인 경우 공기건조기 내부 습도는 30% 이하를 유지하였으며, 건조통이 교체되기 직전 cycle의 습도 최댓값 대비 습도의 감소량이 20% 이상으로 나타났다. 비정상 상태인 경우는 습도 값이 30%를 초과하거나 직전 cycle의 습도 최댓값 대비 습도 감소량이 20% 미만인 경우로 설정하였다.

3.3 이상 탐지 알고리즘

본 연구에서는 데이터 분석을 통한 이상 탐지 알고리즘 모델 연구를 위한 운영환경으로 Intel i7 7세대 4.2GHz의 CPU와 32GB의 메모리를 사용하였고 운영체제는 window 10, 프로그램은 python을 사용했다. 이상탐지 분류방법으로는 CNN(Convolution Neural Networks) 모델을 사용하였다. CNN 모델은 시신경 구조를 모방하여 이미지 형태에 대한 추출 및 분류 기능에 특화된 모델이다. 천마 공기건조기는 온·습도에 대한 2차원 행렬 데이터 및 그래프로 구성되어 있으며, CNN은 이미지의 국지적 분류 및 학습에 뛰어난 성능을 보이므로 이상탐지 분류방법으로 CNN모델을 적용하였다. 이상탐지 로직은 Fig. 11과 같이 세 단계로 수행된다. 우선, 장비 가동 후 발생된 원자료(raw data)를 CNN 분석에 활용할 수 있게 이상치/결측치 제거 등 통계적 기법을 활용한 데이터 전처리를 수행한다. 다음으로 CNN을 통해 데이터의 정상/비정상 판별을 하고, 고장 유형을 식별한다. 정상일 경우 모니터링을 지속하며, 비정상일 경우 상태 알람 및 관련 경고를 전시한다.

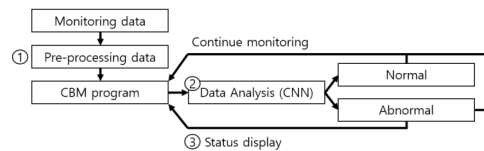


Fig. 11. Anomaly detection logic

데이터 전처리는 원자료를 데이터 분석 목적과 방법에 맞는 형태로 처리하기 위해 자료를 가공하는 방법으로 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 우선, CNN을 활용하여 정상/비정상을 판단하므로 Fig. 12와 같이 원자료 데이터 형식을 CNN 입력 데이터 형식으로 변환한다.

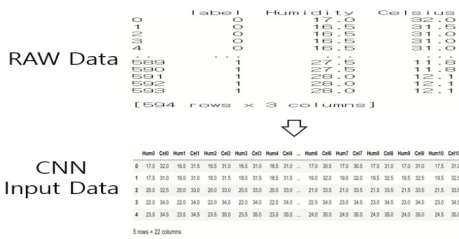


Fig. 12. Convert raw data to CNN input data

다음으로 데이터의 미 수집 혹은 잡음(noise)으로 인한 분석결과의 왜곡을 방지하기 위해 데이터 이상 값 처리를 수행한다. 데이터 이상 값 처리는 크게 결측 값 처리와 이상치 처리로 구분할 수 있다. Fig. 13은 결측치가 발생한 경우의 데이터 처리 방법으로 일부 구간에서 데이터가 미 수집된 경우, 해당 구간을 예외처리하고 가장 마지막 데이터를 추가로 복사하여 데이터의 크기를 유지한다. Fig. 14는 이상치 처리방법으로 온·습도데이터가 아날로그 데이터로 짧은 시간에 값이 급변하지 않는다는 특성을 이용한다. 처리방법은 크게 3가지 방법을 사용하였다. 이상치가 발생한 온·습도 데이터의 다음 데이터가 정상인 경우, 이상치가 발생한 데이터를 제외하고 정상인 데이터를 추가하였다. 만일 다음 데이터까지도 이상치로 판단될 경우, 이전 데이터의 정상여부 판단 후, 정상인 경우 이전데이터를 추가하였다. 만약 이상치 값의 이전 데이터와 다음 데이터에도 비정상인 경우에는 특정 시간 전, 후의 온·습도 데이터 값을 싱크시켜 싱크된 데이터의 평균값을 추가하는 방법을 통해 이상치 데이터를 처리하였다.



Fig. 13. Handling method for missing value

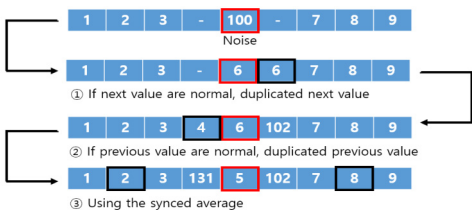


Fig. 14. Handling method for outlier

CBM의 정상/비정상 판단 방법은 Fig. 15와 같다. 천마 공기건조기 교체 주기 T를 기반으로 온·습도 데이터

를 얻고 데이터 전 처리를 수행한다. 처리된 데이터를 건조통 불량 분류 모델, 히터 불량 분류 모델에 입력한다. 이 때, 챔축 불량의 경우, 건조통을 하나만 이용하기 때문에 Fig. 9 (b)와 같이 습도 값이 감소하지 않아 CNN 모델을 활용하여 구분할 필요가 없어 데이터 분류 모델에 추가하지 않았다. 불량 데이터 분류 모델은 CNN 방식으로 구성하였으며, 온·습도데이터를 정상, 이상, 고장 3가지 단계로 분류하였다. 두 분류모델의 결과가 모두 정상인 경우, 공기건조기는 교체주기 T의 크기를 가지는 온·습도 데이터를 다시 획득한다.

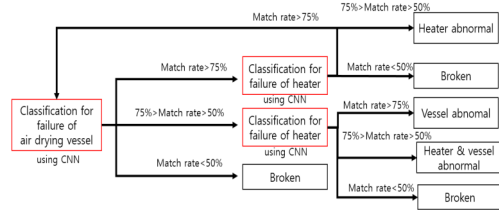


Fig. 15. K-SAM dehydrator CBM Logic flow

4. 시험 및 검증결과

4.1 시험 모델

데이터 전처리 후 획득한 데이터는 정상, 건조통 불량, 히터 불량 3가지 상태로 나누어지며, 공기건조기의 고장 분류모델은 건조통 불량과 히터 불량에 대한 모델로 구성했다. 건조통 불량 분류모델의 경우, 6개의 정상 데이터와 1개의 건조통 불량 데이터를 학습용 데이터에 포함하였으며 정상, 건조통 불량 데이터를 각각 1개씩 검증 및 테스트용 데이터에 포함했다. 히터 불량 분류모델의 경우 6개의 정상데이터와 3개의 히터 불량 데이터를 학습용 데이터에 포함하였으며 정상, 히터 불량 데이터를 각각 1개씩 검증 및 테스트용 데이터에 포함했다.

CNN 레이어의 구성도는 Fig. 16과 같다. 건조통 불량 분류모델과 히터 불량 분류모델은 동일한 레이어의 구성을 가지고 있으므로 Conv1D를 사용하였으며 filter는 4, kernel size는 2로 설정하여 합성곱(Convolution)을 수행하였다. 온·습도의 경우, 데이터 간 차이가 크지 않기 때문에 maxpooling을 사용했으며 활성화 함수로는 ReLU함수를 사용했다. Dense layer의 경우, Dense #1에서는 256개, Dense #2에서는 128개의 노드의 출력을 가지도록 설정하였고, 활성화 함수로는 ReLU함수를 사용했다. 최종 결과출력을 위한 Dense의 출력은 2개로

설정하고 각각의 확률을 구하기 위해 활성화 함수로 softmax함수를 사용했다. 모델의 학습을 위해 최적화 알고리즘으로 adam을 사용하여 학습을 수행하였으며, 학습이 제대로 수행되었는지 확인하기 위해 정확도 (accuracy)와 손실함수(loss function)를 이용했다. 손실함수의 경우 추가적인 연구를 통해 고장의 경우가 많아질 경우를 대비하여 일반적인 분류에 많이 사용되는 범주형 교차 엔트로피(categorical cross-entropy)를 사용했다.

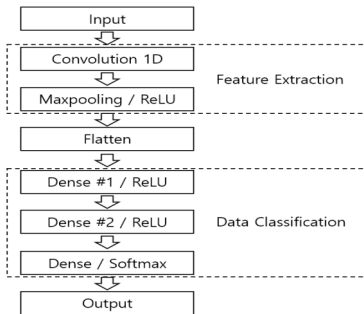


Fig. 16. CNN architecture for K-SAM dehydrator CBM

4.2 시험결과 검증

epoch은 입력 데이터를 모델에 학습시킨 횟수를 의미하며, 모델 학습 시 매 epoch마다 학습용 데이터와 검증 및 테스트용 데이터의 정확도(accuracy)와 손실(loss)이 저장된다. 정확도와 손실은 잘 훈련된 모델인지 검증하기 위한 척도로 사용되며, 학습 데이터를 사용하여 모델을 학습시키는 과정에서 손실함수(loss function)를 통해 학습 오차가 계산된다. 이 때 모델의 학습은 오차 값을 최소화하는 방향으로 진행되며 학습을 마친 후, 검증 및 테스트용 데이터를 사용하여 같은 과정을 반복한다. 검증 및 테스트용 데이터에 대한 오차 값을 일반화 오차 (generalization error)라고 하며 이 값은 새로운 데이터에 대해 모델이 얼마나 잘 동작하는지를 나타내는 지표이다.

학습데이터를 이용하여 학습 정확도(train accuracy)와 학습 손실(train loss)의 값을 얻고, 테스트용 데이터를 사용하여 검증 정확도(validation accuracy)와 검증 손실(validation loss)의 값을 구한다. 이 때 학습 정확도와 검증 정확도는 그래프의 기울기가 양수로 나타날 경우 학습이 잘 된 것으로 판단할 수 있으며, 학습 손실과 검증 손실의 경우 그래프의 기울기가 음수로 나타날 경우 모델이 제대로 학습된 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 17은 건조통 불량 분류모델의 학습결과를 나타내며 Fig. 18은 히터 불량 분류모델의 학습결과를 나타낸다. 두 결과 그래프 모두 학습 정확도와 검증 정확도의 그래프 기울기가 양수값을 가지며, 학습 손실과 검증 손실의 그래프 기울기가 음의 값을 가진다. 또한 손실값은 0으로 수렴하고 정확도는 100%에 근접하므로 학습결과가 유효하다고 판단할 수 있다.

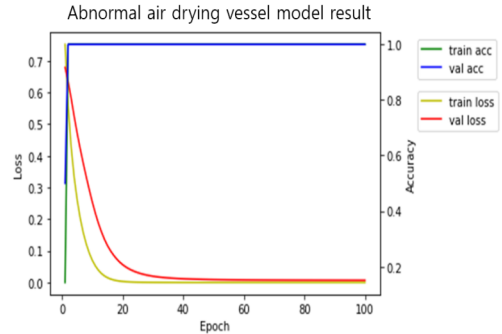


Fig. 17. Graph of air drying vessel failure classification model result

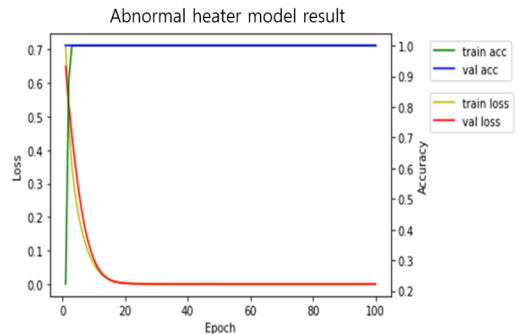


Fig. 18. Graph of heater failure classification model result

4.3 한계점 및 발전방안

본 연구는 천마 추적레이더의 도파관 결로·결빙현상 예방을 위해 CBM을 적용하는 방법에 대해 논하였다. 본 연구의 수행결과를 토대로 한계점과 발전방안을 아래와 같이 제시한다.

첫째, 한정된 재원으로 수행된 연구이기에 외부환경에 의한 영향성에 대한 분석이 부족하고, 모의 고장유발이나 가속수명시험 등 비정상 데이터를 충분히 확보하지 못하여 개발된 모델이 과적합(over-fitting) 또는 과소적합(under-fitting)이 발생할 확률이 있다. 이는 향후 실제장비에 CBM을 적용, 정상 및 비정상 데이터를 추가로

확보하여 알고리즘의 보안을 통해 개선할 수 있다.

둘째, 실험실 환경에서의 시험으로 인해 외부환경에 의한 영향성 분석이 부족하다. 도파관 결로·결빙 현상은 도파관 내부의 이슬점보다 도파관 표면온도가 낮아질 경우 발생하게 되며, 도파관 표면온도는 외부환경의 온·습도에 영향을 받는다. 이는 향후 야전에 배치된 실제 장비에 CBM을 적용하고 외부환경 온·습도를 측정할 수 있는 센서를 부착하여 데이터를 확보한 뒤, 외부 온·습도 데이터에 따른 영향성을 고려하여 알고리즘의 보안을 통해 개선할 수 있다.

셋째, 현재상태를 모니터링하여 정상여부를 파악하는 방식인 CBM에서 RUL 예측기술을 포함하는 CBM+로의 발전이 필요하다. 이는 Fig. 19와 같이 CNN에 LSTM(Long Short Term Memory)을 적용하여 개선할 수 있다. CNN은 특징을 추출하는 역할을 하고 LSTM은 시계열에서 데이터의 상관관계가 클 때 좋은 분류 특성을 가진다[26]. 이러한 특징을 활용하여 CNN과 LSTM을 결합한 모델로 잔존수명예측을 한 연구[27,28]가 있으며 본 연구에서도 추가적인 데이터 획득 후 CNN과 LSTM을 결합하여 잔여수명예측을 하고, 실제 시험을 통해 증명하여 CBM+로 발전시킬 수 있을 것이다.

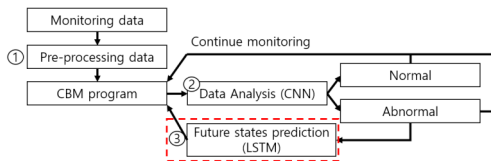


Fig. 19. Application plan for CBM+

5. 결론

본 연구에서는 전자장비 중에서 레이더의 고주파, 고전력을 전송하는 전송로인 도파관의 결로·결빙현상 방지를 위해 온·습도 데이터를 이용하여 CBM을 적용했다. CBM 적용 장비로 천마를 선정하고, 정비사레 분석을 통해 공기건조기의 비정상동작이 도파관 결로·결빙의 주요 원인임을 확인했다. 공기건조기의 비정상동작을 유발하는 원인을 주요 구성품과 연관하여 정리하였으며, 공기건조기에 온·습도 센서를 부착하여 실험실 수준에서 고장을 유발하여 시험을 수행했다. 획득한 데이터들을 CNN모델에 적용하여 정상/비정상 상태를 파악할 수 있는 이상탐지 로직과 고장유형을 분류할 수 있는 모델

을 제안했다. 또한, 데이터의 수집 및 분석, 시험의 과정을 통해 제안한 모델의 유효성을 검증하였고, 연구의 한계점 및 발전방안을 제시했다. 본 연구의 한계점으로는 한정된 재원으로 수행된 연구로 인해 충분한 데이터가 확보되지 못한 점과 외부환경에 의한 영향성 분석이 부족하다는 것이다. 이러한 한계점은 실제장비에 CBM을 적용하여 추가적인 데이터를 확보하고 분석하여 보완할 수 있으며, 누적된 데이터를 바탕으로 LSTM을 적용시켜 RUL을 예측할 수 있는 CBM+에 대한 연구로 발전시킬 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 기대되는 효과는 다음과 같다. 첫째, 체계개발 중인 무기체계가 아닌 기 전력화된 장비에 CBM을 적용하고 검증하였다. 무기체계 주요 구성품들의 고장유형들을 분석하고, 기 전력화된 무기체계 중 같은 문제를 가지는 무기체계를 식별한 뒤 CBM을 적용하여 무기체계 가용도를 향상시킬 수 있다. 더 나아가 CBM을 통해 지속적인 데이터 수집 및 연구로 RUL 예측이 반영된 CBM+로 발전시켜 무기체계 가용도를 향상시킬 수 있으며, 수리부속 소요예측을 통한 군수지원시간 단축을 통해 정비도를 향상시킬 수 있다. 또한 PBL, LTS와 같은 업체주관 체계진단 주기를 최적화시켜 수명주기지원 비용을 절감시킬 수 있고, 수리부속의 조달기간을 단축시켜 재고 비용을 절감시킬 수 있을 것이다. 둘째, 전자장비의 전송선로로 사용되는 도파관의 주요 문제점인 결로·결빙현상을 식별할 수 있는 CBM 방법을 제안 및 검증하였다. 또한, 본 연구결과를 기반으로 함정용 추적레이더와 같이 도파관을 이용하고, 천마 공기건조기와 유사한 기능을 수행하는 구성품을 포함한 타 무기체계에 확대 적용하여 도파관 결로·결빙 방지를 위한 표준 모델을 구축할 수 있을 것이다. 결론적으로 기계 및 전자장비의 주요 구성품들의 고장유형에 따른 CBM 적용방법을 연구하고 전력화된 무기체계에 적용하여 정비비용 절감 및 장비 가동률 향상에 기여할 수 있을 것이다.

References

- [1] J. H. Choi, "Introduction of failure prediction and prognostics and health management", Journal of the KSME, vol.53, no.7, pp.24-34, Jul, 2013.
- [2] Prajapati, A., Bechtel, J. and Ganesa, S., "Condition based maintenance : a survey", Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 18, pp.384-400, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552511211281552>

- [3] MND(Ministry of National Defense), Directive on defence force development, 2021.
- [4] MND(Ministry of National Defense), Directive on total life cycle management, 2021.
- [5] H. S. Jeong, "A Study on the Condition Based Maintenance Development for the Expansion of CBM Adoption in Weapon Systems", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.22, no.8, pp. 631-638, Aug. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.8.631>
- [6] J. Y. Kim, Jiwon Kim, Jeong-Ah Yoon, Yoonho Lee, kesin Lee, Myoung-jin Lee, "A Study on the PHM application process for efficient weapon system operation and maintenance", Korean Institute Of Industrial Engineers, pp.2572-2577, Gyeongju, Korea, Apr, 2018.
- [7] M. J. Son, Y. G. Kim, "A Study on the Reflection of Condition-Based Maintenance Requirement in the Defense Specification", Journal of Korean Society for Quality Management, vol.49, no.3, pp.269-279, Sep. 2021.
DOI: <https://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2021.49.3.269>
- [8] S. G. Shin, "Condition based maintenance (CBM/CBM+) application plan under total life cycle system management(TLCSM) environment", Defense & Technology, vol.516, pp.104-111, Feb, 2022.
- [9] S. G. Kim, J. H. Choi, D. An, "Feature Extraction for Bearing Prognostics based on Frequency Energy", Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation Systems, vol.16, no.2, pp.128-139, Apr, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.2.128>
- [10] J. W. Kim, C. G. Lee, S. H. Park, "Real-time health monitoring of pipeline structures using piezoelectric guided wave propagation", Advanced Science Letters, vol.4, no.3, pp.696-701, Apr, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1166/asl.2011.1674>
- [11] J. H. Park, M. J. Song, S. E. Ahn, "Developing the Fault Diagnostics and Prognostics Model of a Rotating Machinery", Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society, vol.45, no.1, pp.25-38, Feb, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.7737/JKORMS.2020.45.1.025>
- [12] M. S. So, J. H. Shin, "Performance Degradation Prediction of Industrial Equipment using Machine Learning", Korea Journal of Computational Design and Engineering, vol.24, no.3, pp.268-279, Sep, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.7315/CDE.2019.268>
- [13] J. H. Jung, K. H. Sun, K. Kim, "Fault Diagnosis Method for Excavator Hydraulic Axial Piston Pumps", Journal of Drive and Control, vol.18, no.4, pp.98-103, Dec, 2021.
- [14] M. G. Kang, Y. H. Hyun, C. B. Lee, "Deep Learning-Based Analysis for Abnormal Diagnosis of Air Compressors", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol.39, no.2, pp.209-215, Mar, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.7736/JKSPE.021.117>
- [15] S. G. Kim, C. Y. Lim, S. J. Ham, H. J. Park, J. H. Choi, "Tutorial for Prognostics and Health Management of Gears and Bearings: Advanced Signal Processing Technique", Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A, vol.42, no.12, pp.1119-1131, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2018.42.12.1119>
- [16] D. H. Seo, T. Y. Kang, J. H. Yoo, J. K. Min, C. K. Park, "The defect detection circuit of an electronic circuit through impedance change detection that induces a change in S-parameter", Journal of Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers, vol.25 no.4, pp.689-696, Dec, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2021.25.4.689>
- [17] P. Y. Lee, S. U. Kwon, D. H. Kang, S. Y. Han, J. H. Kim, "SOH Estimation and Feature Extraction using Principal Component Analysis based on Health Indicator for High Energy Battery Pack", The Transaction of the Korean Institute of Power Electronics, vol.25, no.5, pp.376-384, Oct, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2020.25.5.376>
- [18] George Vachtsevanos, Frank L. Lewis, Michael Roemer, Andrew Hess, Biqing Wu, "Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems", p.456, Wiley, p.134-146
DOI: <http://doi.org/10.1002/9780470117842>
- [19] Honor Powrie, Ari Novis, "Gas path devris monitoring for F-35 Jonit Strike Fighter propulsion system PHM", IEEE Aerospace conference, 2006
DOI: <http://doi.org/10.1109/AERO.2006.1656114>
- [20] K. W. Oh, "Development of Korean Condition Based Maintenance Systems to Monitor Naval Weapon Systems", Journal of Aerospace system Engineering, vol.10, no.4, pp.67-74, Dec., 2016.
DOI: <https://doi.org/10.20910/JASE.2016.10.4.67>
- [21] D. J. Kim, J. S. Shim, M. G. Kim, "Integrity Prediction Model of Data-driven Dissel Generator for Naval Vessels", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, vol.23, no.4, pp.98-103, Aug, 2019.
- [22] J. H. Shin, H. B. Jun, D. G. Kim, "A Study on Several Aspects of Condition Based Maintenance(CBM) Approach and Introduction of Relevant Case Studies", Entru Journal of Information Technology, vol. 13, no.3, ,pp.123-138, Oct, 2014.
- [23] Gullidge, T., Hiroshige, S. and Iyer, R., "Condition based maintenance and the product improvement process", Computer in Industry, Vol.61, pp.813-832, Dec, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.07.007>
- [24] Sunday Ochella, Mahmood Shafiee, Chris Sansom, " Adopting machine learning and condition monitoring P-F curves in determining and prioritizing high-value assets for life extension", Experts systems with application, vol.176, Aug, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114897>

[25] Gustav Magnus, "Versuche uber die Spannkrafte des Wasserdampfs", Annalen der Physik, 137(2), pp.225-247, 1844.

DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.18441370202>

[26] B. S. Seo, J. N. Jeon, Y. K. Ju, H. S. Shim, H. S. Kang, "Attribute Classification of Long-Period Pulsed Radar Signals Using CNN-LSTM Networks", The Journal of Korean Institute of electromagnetic engineering and science, vo.33, no.1, pp.76-82, Jan, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2022.33.1.76>

[27] J. I. Ma, T. H. Kim, "Remaining Useful Life Estimation with CNN-LSTM combination based on multiple temporal feature extraction", The Korean Insitute of Communication and Information Sciences, Korea, pp.683-684, Aug, 2020.

[28] Y. J. Seo, "A Study on Applying a Model Using 1D CNN-LSTM to the RUL Prediction of HDD", Korea Information Processing Society, Korea, pp.978-981, Nov, 2020.

김 영 길(Young-Gil Kim)

[정회원]



- 2019년 2월 : 광주과학기술원
기전공학과 (공학석사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 연구원

<관심분야>

전파공학, 통계학

손 민 정(Minjeong Son)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한국과학기술원
기계공학과 (기계공학석사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 연구원

<관심분야>

기계공학, 체계공학

노 시 찬(Si-Chan Noh)

[정회원]



- 2019년 2월 : 연세대학교 글로벌
융합공학과 (공학석사)
- 2020년 12월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 연구원

<관심분야>

무선통신, 5G 표준

김 성 진(Seong-Jin Kim)

[정회원]



- 2005년 8월 : 금오공과대학교
전자공학과 (공학학사)
- 2002년 11월 ~ 현재 : 한화시스템
차장

<관심분야>

CBM+, RAM-C, TLCSM