



Received: 2025/08/27
Revised: 2025/09/06
Accepted: 2025/09/29
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Chang Woo Hong

Dept. of Electric Computer Engineering, United States Naval Academy
597 McNair Rd, Naval Academy, MD 21402, US
Tel: +1-410-293-6180
E-mail: chong@usna.edu

Abstract

대한민국 해군은 USV, UUV, UAV, 그리고 유인 전력으로 구성된 유·무인 복합체계(MUM-T)을 발전시키고 있다. 이를 위한 핵심 기술인 인공지능과 지휘통제기술(C2)이 민간 기업과 연구소를 중심으로 빠르게 발전하고 있다. 하지만 MUM-T의 효율적인 운영을 위해서는 정비개념의 수립이 필수적이다. 본 연구에서는 인공지능 기반 무인체계 정비 개념과 원격 정비를 제안한다. 특히 이상 탐지, RUL 예측, 설명 가능 인공지능 기술, 그리고 원격 정비를 기반으로 한 무인체계 정비 개념을 통해 MUM-T의 효율적인 운영이 가능할 것이라고 제안한다.

The Republic of Korea Navy is developing a manned-unmanned teaming (MUM-T) consisting of USV, UUV, UAV, and manned forces. For the future development of the Navy, the development of manned-unmanned combined combat systems is in full swing, and artificial intelligence and command and control technology (C2), which are core technologies for this, are rapidly developing around private companies and research institutes. However, maintenance is technical fields that should not be overlooked for the efficient operation of MUM-T. This study proposes the concept of unmanned system maintenance based on artificial intelligence and remote maintenance. In particular, it will be possible to efficiently operate MUM-T through the concept of unmanned system maintenance based on anomaly detection, RUL prognosis, explainable artificial intelligence technology and remote maintenance.

Keywords

인공지능(Artificial intelligence),
정비개념(Maintenance Concept),
해양 유·무인 복합전투체계(Naval Manned-unmanned Teaming),
원격정비(Remote Maintenance),
무인체계(Unmanned System)

효율적인 해양 유·무인 복합전투체계 운용을 위한 인공지능 기반 무인체계 정비개념에 관한 연구

A Study of the Concept of AI-based Unmanned System Maintenance for the Efficient Operation of Naval Manned-unmanned Teaming

홍창우^{1*}, 백현민²

¹해군 소령/미 해군사관학교 전기컴퓨터공학과 교환교수

²해군 중령/해군본부 총수명주기관리과 정비정책제도담당

Chang Woo Hong^{1*}, Hyun Min Baek²

¹LCDR, ROK Navy/Exchange professor, Dept. of Electric Computer Engineering, United States Naval Academy

²CDR/MRO officer, Total Life Cycle Support Branch, ROK Navy HQ

1. 서론

한국 해군은 해군창설 77주년 기념일인 2022년 11월 11일 해양 유·무인 복합전투체계(manned-unmanned teaming, MUM-T)의 발전을 위한 개념으로 ‘Navy Sea GHOST(Guardian Harmonized with Operating manned Systems and Technology based unmanned systems)’를 명명하였다. 이는 ‘유인 체계와 기술 기반 무인체계가 조화된 해양의 수호자’라는 뜻으로 해양 유·무인 복합전투체계가 미래의 해군 전장을 주도할 게임 체인저임을 인식하고 발전시키겠다는 의지를 담고 있다. 특히, 국방혁신 4.0에 발맞추어 해군에서도 해양 유·무인 복합체계를 발전시킴으로써 병력 감소 시대에 해군 전력의 생존성과 치명성 향상, 지속성의 증대를 기대하고 있다.

유·무인 복합체계는 전장에서 효율성 증대와 인명 피해 감소를 위해, 기존 전투원의 능력을 보완하거나 유인체계의 기능을 대체하는 방식으로 무인체계의 전투원을 네트워크 기반으로 통합하는 전투체계이다. 해양 유·무인 복합전투체계에서 무인체계 부분은 무인수상정(unmanned surface vehicle, USV), 무인잠수정(unman-

ned underwater vehicle, UUV), 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)로 구성된다.

무인체계의 발전 방향은 크기의 대형화, 규모의 군집화, 임무 판단의 자율화, 운용의 다양화로 요약된다. 정찰 임무 중심의 기존 소형 무인체계 범주를 탈피하여 이제는 중형·대형화된 무인체계가 공격이나 지원 등의 복잡하고 다양한 임무를 수행할 예정이며, 기존의 소형 무인체계는 플랫폼화된 중대형 무인체계를 지원하는 감시, 정찰, 자살 공격 등 역할의 소비재 형태 체계로 운용될 것이다. 또한 이들 무인체계는 여러 척의 무인 함정이 유인 함정과 복합함대를 구성하거나 유인 함정 내에 무인체계를 탑재하여 임무를 수행하는 군집화 형태로 발전할 것이며, 더불어 운용자의 개입 없이 자율적으로 상황을 판단하고 적합한 임무를 선택, 수행이 가능한 단계가 구현될 것이다. 또한 무인체계의 형태는 더욱 다양화될 것이며 그에 따라 전술적 운용 방법도 복잡, 다양하게 진화할 것이다. 이들 무인체계는 운용자의 통제 정도에 따라 1단계 원격 통제형, 2단계 반자율형, 3단계 완전 자율과 반자율의 결합을 목표로 발전하고 있다.

이렇듯 미래의 해군 발전을 위해 유·무인 복합전투체계로의 전환이 본격화되고, 이를 위한 핵심기술인 인공지능(artificial intelligence, AI), 지휘통제 기술(command and control, C2) 등이 민간 기업과 연구소 등을 중심으로 빠르게 개발되고 있지만 효율적인 유·무인 복합체계의 운용을 위해 간과되어서는 안 되는 기술 분야가 있다. 바로 유지보수 및 정비 분야이다. 미 해군 DOT&E(The Office of the Director, Operational Test and Evaluation)의 보고서에 따르면, 2022년 무인 기뢰 제거함인 UISS(Unmanned Influence Sweep System)의 시범 운용에서 초기 작전능력(initial operating capability, IOC)를 달성하였지만, 유지보수, 작전지속능력 부분에서의 미비점이 식별되어 운용평가를 위한 정보를 충분히 수집하는데 애로사항이 있었음을 언급하고 있다[1].

무인체계의 유지보수 영역은 해양 유·무인 복합체계 운용을 위한 군수의 핵심 축을 담당할 것이며 해군의 성공적인 유·무인 복합전투체계 구축을 위해 해결해야 할 주요 과제이다. 즉 해양 유·무인 복합체계의 효과적·경제적인 운용을 위해서는 통합체계지원요소(integrated product support, IPS)의 발전이 발맞춰 이루어져야 하며, 운용 개념, 적용 기술 등 기존 함

정과의 차이를 고려한 새로운 정비 전략과 정비개념이 필요하다. 특히 완전 자율 혹은 반자율 기반의 해양 무인체계에 있어 인공지능과 원격 정비 기술을 결합한 정비개념은 필수적이다.

본 연구는 효율적인 해양 유·무인 복합전투체계 운용을 위한 인공지능과 원격 정비 기반의 무인체계 정비개념을 수립하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 기존 함정의 정비개념과 현재 적용되고 있는 총수명주기관리 기반의 RAM-C와 CBM+에 대해 분석하고, 무인체계를 용도 및 크기별로 분류하여 무인체계 정비에 적용할 수 있는 인공지능 기반의 정비 기술을 바탕으로 정비 개념도를 제안한 후, 향후 여건 마련을 위한 시사점을 도출하고자 한다.

2. 기존 함정의 정비개념

기존 함정은 종합 정비관리제도(planned maintenance system, PMS) 하에서 관리되고 있다. 종합 정비관리제도는 운용 시간 또는 운용 횟수 기반으로 예방정비를 실시하고 정비에 관련된 자료를 과학적으로 관리할 수 있는 제도로서, 여기서 정비란 사용할 수 있는 장비 및 보급품을 항상 사용할 수 있는 상태로 유지하는 것과 사용 불가능한 장비 및 보급품을 원상태로 복구하는 일련의 행위를 포함한다. 정비의 개념은 고장이 일어난 이후 정비를 실시하는 사후정비(corrective maintenance, CM)로부터 고장이 없더라도 정비를 시행하는 예방정비(predictive maintenance, PM)로 발전하였으며 이는 예비 부품에 대한 통제력을 확보하여 장비의 더욱 효율적인 운용을 가능하게 하였다. 현재 군의 정비는 정비원의 분류에 따라 군직정비(군이 보유하고 있는 정비능력을 활용한 정비), 외주정비(국내외 제작사 및 정비업체)로 분류할 수 있으며 군직정비는 다시 부대정비, 야전정비, 창정비로 구분된다.

부대정비란 장비 운영부대에서 부대장의 책임 하에 편성 중인 인원이나 공구를 사용하며 주로 예방정비를 위해 실시하는 정비로, 사용자 및 부대정비 요원이 수행하며 보통 운용 시간이나 거리에 따른 점검이나 부품 교체 등을 실시한다. 야전정비는 부대정비능력을 초과하는 정비능력이 요구되는 고장 또는 정비 수요가 발생할 경우, 상급 정비지원부대에서 실시하며 대부분의 야전수리(RA 등)가 이에 해당한다.

마지막으로 가장 높은 정비단계인 창정비는 분해 수리나 재생이 요구되는 장비, 구성품, 수리부속에 대해 특수 정비시설 및 장비, 공구를 이용하여 전반적인 정비를 실시하는 것으로 창정비 주기에 따라 구성품 단위로 분해수리(overhaul, OVHL)하는 것을 의미한다. 창정비는 장비 도입 시점부터 창정비원을 구분하여 정비능력을 개발하며 이때 군직정비와 외주 정비를 구분하여 실시한다.

3. 정비개념의 발전

고장정비와 예방정비가 과거의 정비 전략이라면 현재는 총수명주기관리(total life cycle systems management, TLCSM) 개념을 기반으로 무기체계의 최초 개발부터 폐기 처분까지 전 수명주기(life cycle) 과정을 통합·관리하고 있다. 국방부에서는 총수명주기관리업무 훈령을 제정하여 비용을 최소화하는 동시에 가용도를 높임으로써 효과적인 전투준비태세를 갖추게 한다. 각 군과 방위사업청은 무기체계 획득 시에 통합체계지원요소(IPS)를 포함하여 개발하며, 소요 제기 시점부터 신뢰성, 가용성, 정비성을 의미하는 RAM(reliability, availability, maintainability) 잠정 목표값을 설정하고 상태기반정비인 CBM(condition-based maintenance)의 적용을 고려하게 된다. 상태기반정비를 적용할 경우 기존의 고장정비와 예방정비에 비해 좀 더 적극적이고 장비의 상태를 반영한 효율적인 정비가 가능해진다. 고장정비부터 상태기반정비까지 정비개념의 발전은 Fig. 1에 나타나 있다.

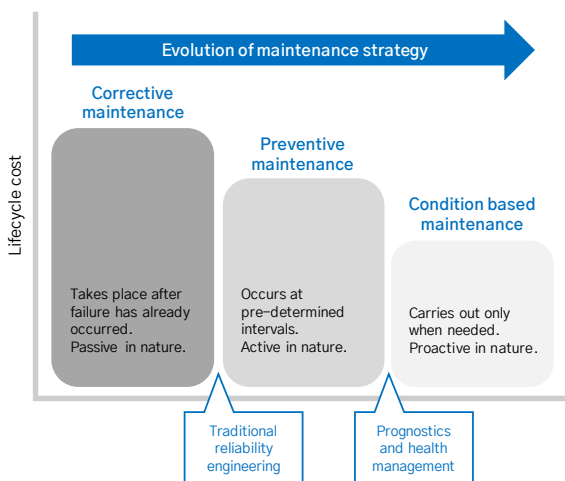


Fig. 1. Development of maintenance strategy[2]

고장 이후의 조치인 과거의 고장정비 이후 신뢰성 공학을 기반으로 예방정비가 발전하였으며, 이는 건전성예측관리(prognostics and health management, PHM)를 통해 장비의 상태를 진단하여 예방정비 주기와는 관계없이 선제적으로 정비하는 상태진단정비로 발전하였다. 고장정비에서 예방정비, 상태진단정비로 발전할수록 정비효율은 높아진다고 볼 수 있다.

또한, RAM 개념은 신뢰성 기반의 수명주기비용까지 추정하는 RAM-C(reliability, availability, maintainability and life-cycle cost)로 확대되고 있으며, CBM 또한 기존의 상태기반정비에서 센서와 데이터, 머신러닝과 인공지능 활용 기반의 예지(prognosis)를 포함하는 CBM+로 개념을 발전시켜 적용되고 있다. 여기서 ‘예지’란 기존의 CBM이 단순히 장비의 상태를 진단(diagnosis)하여 상태 기반의 정비를 수행하는 데 비해, 현재 상태에 기반한 판단으로 장비를 얼마나 더 사용할 수 있는지를 가리키는 잔여유�효수명(remaining useful life, RUL)까지 예측하는데 활용될 수 있음을 의미한다[3]. 무인체계는 사람이 직접 탑승하지 않은 상태에서 운용되며 군집화할 시 개별 무인수상정 또는 무인잠수정의 상태를 즉각적으로 파악하기 쉽지 않다. 따라서 효율적인 유·무인 복합 전투체계 운용을 위해서는 획득 시점부터 CBM+의 적용이 동반되어야 할 것이다. 다만, CBM+의 핵심 기능인 예지 기능의 정확성과 정비 적중률을 보장하기 위해서는 상당히 긴 시간의 운용 데이터 축적이 요구된다.

전술한 정비개념 외에 운용 중인 무기체계의 부대 정비를 지원하고 야전정비와 창정비의 필요성을 제시, 판단할 수 있는 정비개념으로 원격정비(remote maintenance)가 있다. 2013년부터 해군은 하나의 부대로서 기능을 모두 구현 가능한 해군 함정에 위성 기반의 정비용 네트워크를 구축하여 해상에서의 정비 소요(고장, 이상징후 탐지, 상태진단 등) 발생 시 육상의 정비인력이 정비 관련 정보를 공유하고 해결책을 제공하는 원격정비지원체계를 구축하여 운용 중이다. 전 세계 해역으로 임무 영역이 확장되고 있는 해군의 작전적 특성을 고려했을 때, 원해의 함정을 원격으로 정비하여 고장시간을 단축하고, 함정 운용능력을 향상시켜 왔다는 점에서 원격정비지원체계의 효과는 충분히 증명되었다.

그러나 단순히 음성과 영상을 통해 현장을 공유하는 수준의 원격정비개념은 효율성의 측면에서 한계를 드러내고 있다. 특히, 원격정비지원체계는 함정 정비 소요의 판단 정확성과 신속성을 개선하고 정비 부대 운용의 경제성을 제고하며 전력운용의 효율성과 함정의 가용성을 확실히 보장하는 체계로 변화될 필요가 있다.

이에 해군은 현재 새로운 원격정비지원체계 구축을 위한 시범 사업을 추진하고 있다. 청해부대를 우선 지원하기 위해 개발되고 있는 새로운 원격정비지원체계는 스마트 글래스로 정비 현장을 촬영·공유하는 XR 기반 환경에서 정비대상 장비의 디지털 트윈을 생성하여 사전 정비모의(pre-maintenance simulation)를 지원하고, 현장과 동일한 XR 화면 속에서 영상과 문자, 음성, 핸드 트레킹, 정비자료 전시 등을 통해 정비지원센터의 정비 솔루션을 지원받을 수 있다. 또한 낮은 속도의 통신 여건에서도 AI의 영상처리 기술을 통해 높은 해상도를 유지할 수 있으며 여러 정비 지원부대의 동시 정비지원 기능을 제공한다.

특히 지금도 활용되고 있는 원격정비지원체계의 주요 기능인 시스템 접속 기능은 유·무인 복합전투체계의 정비를 위한 핵심 기능으로, 상태기반정비와 원격정비지원체계를 연결하는 핵심 노드 역할을 수행한다. 인공위성 관제센터에서 인공위성의 실시간 상태 정보를 모니터링하고 이상징후 감지 시 시스템에 직접 접속하여 트러블 슈팅을 실시하는 개념과 같이 해군의 원격정비지원체계는 시스템 접속에 의한 트러블 슈팅 기능을 지원하나 운용 장비의 라이선스, 보안 등의 문제로 인해 아직 완벽한 구현이 어려운 실정이다.

현재 진행 중인 스마트팩토리 기반의 상태기반정비체계는 이러한 한계를 극복할 수 있다. 함정을 구성하는 주 체계(무기체계, 선박체계) 중 추진과 발전, 유체관리 등을 관리하는 선박체계에서는 8,000여 개 이상의 센서 데이터가 실시간으로 생성(FFG-II 기준)되어 ECS(engine control system)의 DAU(data acquisition unit)을 통해 획득되며, 해군은 선별한 2,000~3,000개의 주요 센서 데이터를 함정과 육상 통제소에서 실시간 관측하고 분석하는 상태기반체계를 구축하고 있다. 센서 데이터 간의 상관관계를 분석하여 성능에 대한 인과관계가 추적되며 빅데이터 처리 및 머신러닝 기술 기반의 진단모델을 통해 정비

필요성과 최적의 정비시기를 제시한다.

미래의 원격정비지원체계에서 구현될 포터블 센싱 데이터 기술은 상술한 상태기반정비체계가 이상징후를 감지하면 해당 장비로부터 별도의 센싱 정보(온도, 진동, 소음, 그 외 IR 포터블 센서 등을 통해 수집되는 추가 정보)를 수집하여 정비지원부대가 원격으로 함께 모니터링하며 장비 고장 발생 전 운용 정지를 권고하거나 이상 원인을 분석할 수 있도록 지원한다. 해양 유·무인체계의 효과적인 운용을 위한 정비개념은 AI 기반의 상태진단과 이와 결합된 원격정비 방식이 최적인 것으로 판단된다.

4. 해양무인체계의 분류

대한민국 해군은 해양 무인체계를 작전 영역, 목적, 자율화를 기준으로 구분하고 있다. 작전 영역에 따라서는 무인항공기(UAV), 무인수상정(USV), 무인잠수정(UUV)으로 구분하며 목적에 따라서는 감시/정찰용, 다목적용, 전투용으로 구분한다. 마지막으로 자율화에 따라서는 유인 전력에 탑재하여 운용자의 통제하에 임무를 수행하는 원격통제형, 반(半)자율 기동으로 임무를 수행하는 반자율형, 그리고 자율/군집기동을 수행하는 자율형으로 구분한다.

IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)에서는 자율 선박을 ‘MASS(maritime autonomous surface ships)’로 명명하고 자율화에 따라 4단계로 구분한다. 1단계는 자동화를 지원하는 단계, 2단계는 선원이 탑승한 상태에서 원격 작동하는 단계, 3단계는 선원이 탑승하지 않고 원격 제어 및 작동하는 단계, 4단계는 완전 자율 선박이다. 크기의 차이는 있겠지만 해양 무인체계는 IMO의 MASS 구분 기준으로 3, 4단계를 적용한다고 볼 수 있다. 미 해군은 무인수상정과 무인잠수정의 크기 분류를 좀 더 세분화하였다. 무인수상정의 경우 전장 12 m에서 50 m 사이를 중형 무인수상정(medium unmanned surface vehicle, MUSV), 전장 50 m 이상을 대형 무인수상정(large unmanned surface vehicle, LUSV)로 분류하였으며, 무인잠수정의 경우 직경 21인치(53 cm) 이상 82인치(2.13 m)까지를 대형 무인잠수정(large unmanned underwater vehicle, LUUV), 직경 82인치 이상을 초대형 무인잠수정(extra-large unmanned surface vehicle, XLUUV)으로 분류하고 있다.

소형 무인체계가 정찰·감시 임무를 중심으로 수행하던 것에 반해 중·대형 무인체계의 경우 크기가 커짐에 따라 탑재할 수 있는 장비/모듈의 폭이 넓어지고 임무 또한 전자전, 대잠전, 대수상함전, 기뢰전 등의 전투임무 일부를 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 각각의 해양 무인체계 분류는 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Classification of naval unmanned systems

Division	Criteria	Classification
ROK Navy	Operation area	UAV
		USV
		UUV
	Purpose	Surveillance/reconnaissance
		Multipurpose
	Autonomy	Combat
		Remote control
		Semi-autonomous
		Autonomous
		Ship with automated process
IMO MASS	Autonomy	Remotely controlled ship with seafarers on board
		Remotely controlled ship without seafarers on board
		Fully autonomous ship
	USV size (length)	Very small (≤ 7 m)
US Navy (based on operation area and purpose)	USV size (length)	Small (7 m - 12 m)
		Medium (12 m - 50 m)
		Large (> 50 m)
	UUV size (diameter)	Small (3 inch - 10 inch)
		Medium (10 inch - 210 inch);
		Large (21 inch - 84 inch)
		Extra large (> 84 inch)

5. 무인체계의 정비개념

무인체계의 정비개념을 수립하기 위해서는 기존 함정의 정비개념과는 다른 접근방식이 필요하다. 기존 함정은 편성 인원에 의한 예방정비를 중심으로 한 부대정비를 실시한다. 이는 해당 장비를 관리하는 인원이 일정 운영 시간이나 주행 거리에 따라 부속을 교체하는 방식으로 진행된다. 하지만 무인체계의 경우 일반 함정처럼 특정 장비에 대한 전담 인원이 편성되

기 어려우며 모함에서 여러 척의 무인체계를 관리하거나 육상의 무인체계 운용부대에서 소수의 인원이 여러 척의 무인체계를 일괄적으로 관리할 가능성이 높다. 따라서 무인체계의 정비개념은 기존의 예방정비 일부와 CBM+가 결합한 형태로 수립하는 것이 효율적일 것이다.

소형 무인체계의 경우 비교적 단순한 구조로 구성하고 추진부, 탐지부, 통신부, 무장부 등을 모듈화하여 정비 및 교체의 효율성을 향상할 수 있을 것이다. 하지만 모듈화를 통해 정비의 효율성을 향상하더라도 장비의 고장 시점을 예측할 수 없다면 효율적인 운용이 불가능할 것이다. 따라서 소형 무인체계의 정비개념은 모듈별로 고장 징후를 감지할 수 있는 센서 체계에 기반한 모듈 교체 형식이 운용 인원 유지에도 효율적일 것이며 모함에 탑재하는 소형 무인체계는 해당 교체 모듈을 일부 포함하여 즉각적인 정비 및 임무 재투입을 가능하게 하여야 한다.

중·대형 무인체계는 그 자체로 일종의 소형 선박 또는 잠수함이라고 볼 수 있을 것이다. 앞서 언급하였듯 정찰 감시를 포함한 다양한 작전 임무를 수행하여야 하며 함정과 유사한 수준으로 장비를 탑재할 것이다. 인원이 직접 탑승하여 장비의 상태를 실시간으로 점검하고 정비할 수 있는 일반 함정과 달리, 무인체계는 사람이 탑승하지 않고 원격으로 조종하거나 자율 기동하므로 장비의 상태는 센서 데이터를 통해 실시간으로 통제부에 수집되어야 하며 고장 징후가 발생할 경우 대체 전력을 투입하는 등의 조치가 가능해야 한다. 또한 소형 무인체계에 적용할 수 있는 고장 징후 감지 기능과 더불어 전체적인 무인체계의 수명을 예측할 수 있는 예지 기술이 적용되어 중·장기 정비계획에 활용될 수 있어야 할 것이다. 육상의 무인체계 관리부대에서는 여러 센서 데이터 중 특정 부분의 상태를 집중적으로 파악하기 위해 데이터의 선택적 조합을 통한 예지가 가능해야 하며, 무인체계와의 실시간 통신 혹은 주기적인 상태 데이터의 전송이 가능해야 할 것이다.

중·대형 무인체계의 정비개념에서는 정비 시설과 인력의 확보보다 해당 무인체계로부터의 데이터 전송과 고장 감지, 예지 등의 데이터 처리가 중요한 역할을 차지할 것이다. 따라서 무인체계의 상태진단과 정비를 전담으로 하는 민간 기업 혹은 조선소의 성과 기반군수지원(performance-based logistic, PBL)도

고려해 볼 필요성이 있다. 미 해군의 경우 2022년 34회 SNA(Surface Navy Association) 심포지엄에서 무인체계의 정비관리에 대한 이슈가 논의되었지만 아직 유동적이며, 단지 상태기반정비(CBM)을 중심으로 정비 전략이 수립되어야 하고, 대형 무인 선박에 한해 민간 조선소에서 정비가 가능할 것이라는 의견이 제시되었다[4].

6. 무인체계에 적용할 수 있는 인공지능 기반 정비

인공지능을 활용한 많은 기술이 여러 분야에 적용되고 있으며 현재도 계속해서 발전하고 있다. 무인체계 정비에 적용할 수 있는 인공지능 기술은 상태기반 정비의 바탕이 되는 기술들이며 대표적으로는 이상 감지(anomaly detection), 잔여유�효수명 예측(RUL prognosis), 설명 가능한, 신뢰할 만한 인공지능(explainable, trustworthy AI)으로 나누어 볼 수 있다.

6.1 이상 감지(anomaly detection)

이상 감지란 데이터에서 예상되지 않는 패턴 혹은 시점을 찾는 과정을 뜻하며 최근 다양한 분야에서 매우 중요한 역할을 한다. 여기서 ‘예상되지 않는 패턴’이란 보통 이상치(anomalies, outliers)라고 불리며 네트워크 침입, 적의 활동 감시, 건강 이상 징후 감지 등 여러 분야에서 활용될 수 있다. 무인체계는 정상적인 활동을 하는 하나의 장비 혹은 생명체로 간주하여 정상적인 범위 안에 있지 않은 데이터를 식별할 수 있다. 이상치는 잡음(noise)처럼 데이터셋에서 제거해야 할 사항이 아니며 빠르게 식별하여 고장인지 아닌지를 파악하기 위한 자료에 해당한다.

이상 감지를 위한 기법으로는 통계적 기법, 분류 기반 기법, 클러스터링 기반 기법, 스펙트럼 기법 등이 있다[5]. 특정 장비, 혹은 무기체계에 대한 이상 감지 데이터는 보통 시계열 기반에서 맥락적(contextual) 이상 징후나 집단(collective) 이상 징후, 혹은 한계점(threshold)을 넘는 방식으로 나타나며, 이러한 이상 징후는 발견 즉시 조치가 필요하므로 온라인 혹은 실시간으로 감지하는 것이 중요하다. 이상 감지에 있어서는 데이터의 샘플링 주기, 정확한 측정 및 기록, 결측치 처리, 데이터의 실시간 전송 및 분석이 중요하며, 단위 모듈 혹은 주요 구성품에 대한 적용이 가능

하다. 다량의 센서에 의한 복합적인 이상 감지도 가능하나 온라인 혹은 실시간으로 감지하여야 즉각적인 대응이 가능하다는 점에서 많은 데이터의 처리는 리소스 제약이 크다고 할 수 있다.

가장 기본적인 이상 감지에 대하여 회전하는 베어링에 대한 이상 감지를 위해 한계점 설정과 주성분 분석(principle component analysis, PCA), 그리고 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance) 분석을 사용한 연구를 참고할 수 있다[5]. 한계점 설정은 작동 조건에 따라 최소와 최대 한계 범위를 설정하여 정상 상태를 규정한다(식 (1) 참조).

$$Y_{\min} < Y(t) < Y_{\max} \quad (1)$$

여기서, t 는 시간, Y 는 센서로부터 측정된 값이나 경향을 말하며, Y_{\min} 은 최소 한계점, Y_{\max} 는 최대 한계점을 뜻한다.

센서로부터 측정된 값이 식 (1) 범위 안에 있을 때를 정상상태, 범위를 벗어나게 되면 이상치라고 정의한다. 최소-최대 한계점은 확률적인 방법으로 정의할 수 있으며 장비의 종류에 따라 민감도를 결정할 수 있다. 주성분 분석은 고차원 공간의 표본을 저차원 공간으로 변환시켜 다중공선성(multicollinearity) 문제를 해결할 수 있으며 노이즈를 제거하거나 데이터의 특성을 보다 잘 추출하기 위해 활용된다. 마할라노비스 거리 분석은 분류에서 분포가 다른 분포와 얼마나 근접해 있는지 계산할 때 사용되며, 수식은 식 (2)과 같다.

$$Mahalanobis(x, \mu) = \sqrt{(x - \mu)S^{-1}(x - \mu)^T} \quad (2)$$

여기서, x 와 μ 는 각각 임의의 샘플, 평균이며, S 는 공분산행렬이다.

마할라노비스 거리는 샘플과 평균과의 거리, 확률 분포상의 공분산(covariance)의 크기에 따라 가중치가 부여된 거리의 계산을 통해 분포 상에서 특정한 값의 발생확률을 수치화한다. 마할라노비스 거리와 주성분 분석을 사용하여 데이터를 적절히 분석할 경우 이상 감지의 효율을 향상시켜 특정 시점의 고장 발생 전에도 한계점 초과를 포착할 수 있다. 하지만 마할라노비스 거리와 주성분 분석과 같은 이상 감지 기법을 사용하지 않은 경우에는 보통 한계점이 높게 설정되어 고장의 사전 징후를 탐지하지 못할 가능성이 있

다. 따라서 적절한 이상 감지 기법들을 활용한다면 생산량을 줄이면서도 예측 효율을 높일 수 있다. 최근에는 인공지능 알고리즘을 활용하여 이상 감지의 효율을 높이고 있다. Autoencoders, GAN(generative adversarial networks), self-supervised classification 등의 기법을 적용한다면 더욱 효과적인 이상 감지가 가능할 것이다.

6.2 잔여유효수명 예지(RUL prognosis)

Prognosis(예지, 혹은 예후)라는 단어는 꽤 생소하지만, ISO(International Standard Organization, 국제표준화기구)에서는 2015년 ISO 13381-1:2015에 ‘예지(예후)는 하나 이상의 기존 및 미래의 고장에 대한 고장까지의 시간 및 위험의 추정’이라고 정의하였다. 또한, 이는 과거의 작동 상태를 고려하여 고장이 발생하기 전에 남은 유효 수명(RUL)을 예측하는 것이 목표이므로 ‘시스템 수명 예측’이라고도 부른다. 여기서 장비가 현재 시점부터 상태가 저하(혹은 열화, degradation)하여 고장이 발생하기까지의 시간을 ‘예측 고장 시간(TTF, time to failure)’이라고 하며, 장비의 현재 상태와 앞으로의 작동환경을 고려한 확률론적 기법으로 접근할 수 있다. Fig. 2는 열화에 따른 고장시점과 현재 시간 기준 잔여유효수명의 확률분포를 보여준다.

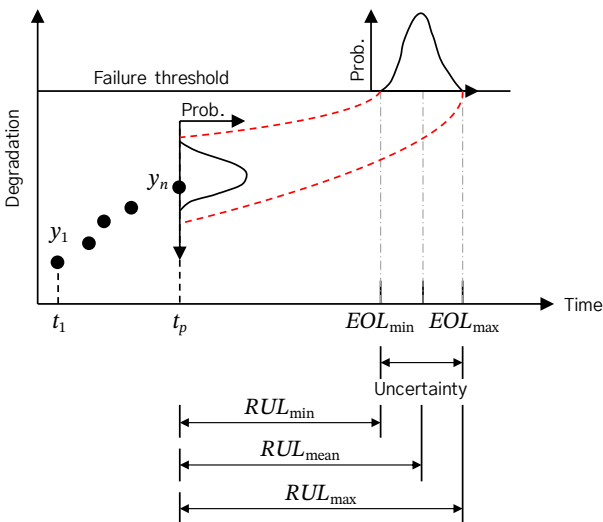


Fig. 2. Remaining useful life prognosis[7]

특정 변수 혹은 센서의 상태를 x , 전체 시스템의 상태를 y , 최초 측정 시점을 t_1 이라 했을 때 현재 시점인

t_p 에서의 센서의 상태 x_n 은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_n = h(y_n) + v_n \tag{3}$$

여기서, $h(\cdot)$ 는 센서와 시스템 상태 간의 매핑이며, v 는 기타 불확정성이다.

센서가 전체 k 개 있다고 가정할 때의 시스템의 상태는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n = f(x_{1n}) + f(x_{2n}) + \dots + f(x_{kn}) + \omega_n \tag{4}$$

여기서, w 는 기타 불확정성이다.

센서로부터 얻은 데이터를 가지고 전체 시스템의 상태 y_n 를 고려하여 잔여유효수명을 예측하고 실제 고장시점(end of life, EOL)과의 오차(uncertainty)를 줄여나가는 것이 잔여유효수명 예측에서 매우 중요하다 할 수 있다.

잔여유효수명 예측은 과거의 경험 기반 예지(experience-based prognosis)에서 데이터 기반 모델(data-driven model), 물리 모델(physical model), 그리고 혼합 모델(hybrid model)로 발전해 나가고 있다. 데이터 기반 모델에서는 최근 MLP(multi-layer perceptron)을 비롯해 CNN(convolutional neural network), RNN(recurrent neural network) 등 여러 인공신경망(artificial neural network, ANN) 알고리즘을 활용하여 시계열(time-series) 기반, 혹은 다변량 데이터(multivariable data)에 대한 잔여유효수명을 예측한다.

중·대형 무인체계의 정비에서는 단순한 이상 감지보다 가동률과 작전수행능력을 고려한 전체적인 잔여유효수명 예측이 더욱 중요할 것이다. 그리고 해상에서 작동하는 중·대형 무인체계의 경우에는 해상환경의 요인 등 다량의 외부 변수가 있으므로 이를 잔여유효수명 예측에 반영될 수 있도록 해야 할 것이다. 또한, 실제 적용에 있어서는 이상 감지와 마찬가지로 제한된 리소스에 따른 변수 선정(feature selection), 센서 데이터 통신, 강건성(robustness) 확보 등이 중요하다. 여기서 강건성이란 인공지능을 활용한 예측에 있어서 다양한 변수를 학습하여 정확도를 유지하면서 국소 최적(local optimum)에 빠지지 않고, 다양한 예측 지평선(prediction horizon)에서의 안정성을 유지하는 것을 의미한다.

6.3 설명 가능한, 신뢰할 만한 인공지능(explainable, trustworthy AI)

기계학습(machine learning, ML)과 인공지능은 하드웨어의 연산처리능력과 알고리즘의 개발·개선으로 폭발적으로 발전하고 있다. 사람이 직접 할 수 없는 많은 양의 연산으로 데이터의 연관성을 고려한 향후 추세 예측까지 가능한 시점까지 왔지만, 모든 분야에 인공지능이 적용되기는 어렵다. 바로 인공지능 연산의 블랙박스(black box) 문제 때문이다. 블랙박스 문제란 복잡한 은닉층(hidden layer)과 많은 하이퍼파라미터(hyperparameter)로 구성된 인공지능 모델이 내놓은 분류나 예측 결과의 이유를 설명하기 불가능한 현상을 말한다. 이러한 블랙박스 문제는 여러 가지 의사결정의 보조 도구로 사용될 수 있는 인공지능의 사용을 막는 큰 장애물 중 하나이다. 무인체계의 상태 진단이나 정비에 인공지능을 활용할 당위성에도 불구하고, 학습된 모델이 예측한 특정 부품 혹은 장비의 고장을 신뢰할 수 없다면 그러한 예측을 토대로 해당 무인체계의 가동을 멈추고 정비를 수행하는 것은 쉽지 않을 것이다. 사실 예측 모델의 설명성(explainability)과 정확도(accuracy)는 반비례 관계를 가지고 있다.

물리 모델 혹은 기초적인 수식을 통해 나온 계산은 왜 그러한 결과가 나왔는지 쉽게 알 수 있다. 하지만 수많은 변수를 통해 나온 계산은 어떻게 그러한 결과가 나왔는지 분석하기 매우 어렵다. 최근에는 의료나 금융, 국방 등의 분야에서 인간의 생명이나 재산과 관련된 임무필수적(mission critical) 의사결정에 인공지능이 적용되면서, 설명 가능한(explainable) 혹은 신뢰할 만한(trustworthy) 인공지능의 사용이 요구되고 있다. 2017년 7월부터 미국 방위고등연구계획국(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)의 추진 하에 많은 민간 기업에서 설명 가능한 인공지능(XAI)이 연구되고 있다. 설명 가능한 인공지능의 개념은 Fig. 3에서 살펴볼 수 있다. 전술한 블랙박스 문제가 수반되는 기존의 기계학습 및 인공지능 모델과 달리, 설명 가능한 인공지능은 산출된 결과의 이유, 고장의 원인과 고장 발생 예측 시점 등을 사용자가 파악할 수 있도록 도와준다.

설명 가능한 인공지능은 크게 데이터의 설명가능성(data explainability)과 모델 설명가능성(model

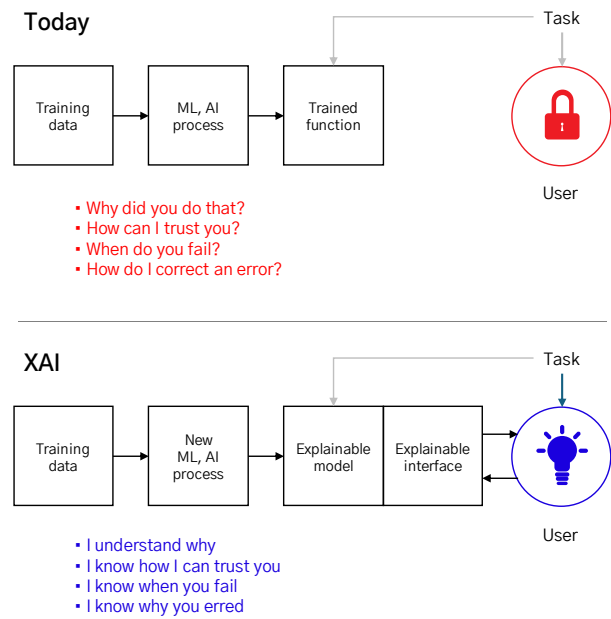


Fig. 3. Inverse proportionality between explainability and accuracy

explainability), 변수기반기법(feature-based techniques), 예시기반기법(example-based techniques)으로 나눌 수 있다[8]. 이 중 다양한 센서 데이터를 기반으로 무인체계의 잔여유효수명 혹은 고장을 탐지해야 하는 상황에서 변수 기반 기법의 XAI를 적용할 있다. 변수 기반의 기법으로는 feature importance, PDP(partial dependence plots), ICE(individual conditional expectation), global surrogate, LIME(local interpretable model-agnostic explanations), SHAP(Shapely additive explanation) 등이 있다.

SHAP 기법은 다양한 변수로 인한 잔여유효수명 예측에서 각 변수의 기여도를 시각적으로 나타낼 수 있다[9]. 한 장비의 여러 부품 중 어떤 부품이 고장의 원인인지, 혹은 전체 시스템에서 어떠한 특정 부분이 원인인지를 판단하기 위해 설명 가능한 인공지능을 활용할 수 있다.

7. 인공지능 기술과 원격정비 기반의 해양 무인체계 정비개념도 제안

앞서 설명한 여러 인공지능 기술을 기반으로 한 무인체계의 정비개념도는 Fig. 4와 같이 제안할 수 있다. 먼저 여러 센서 데이터와 환경적인 요소(해상상태 등), 사용자의 추가 입력 정보 등이 데이터베이스

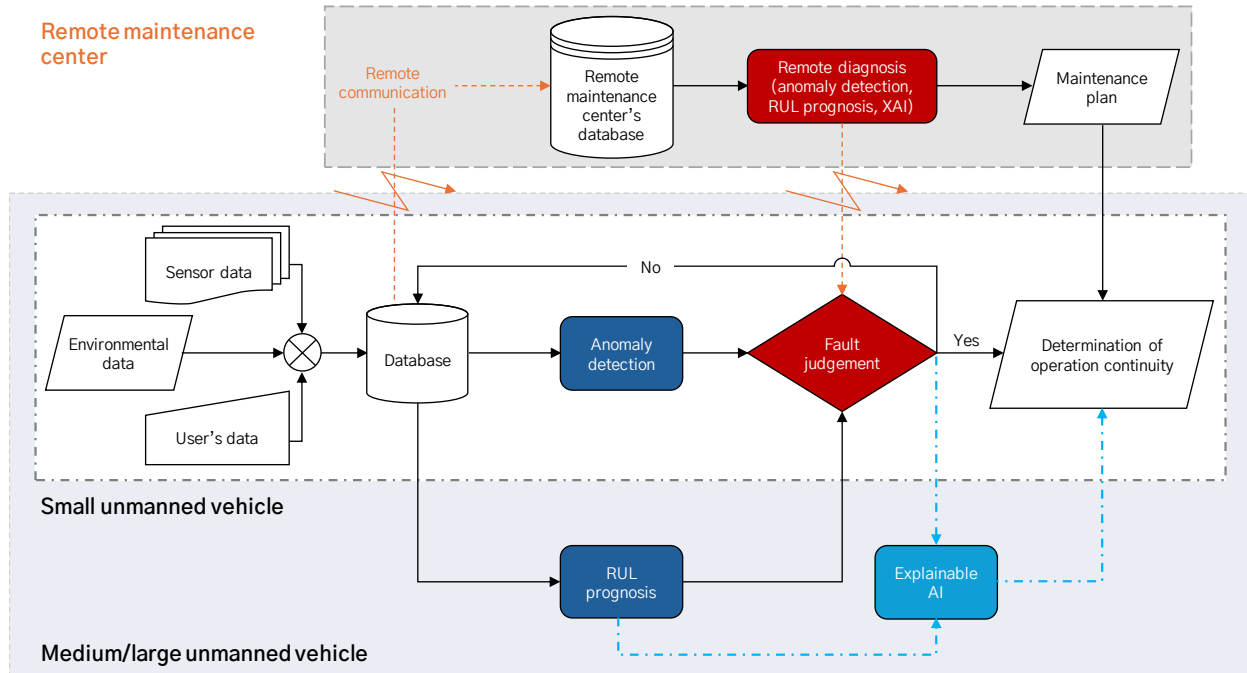


Fig. 4. The proposed maintenance concept of naval unmanned system based on AI technologies and remote diagnosis

에 저장된다. 소형 무인체계의 경우에는 모듈형 구성에 따른 센서 정보로 이상 감지 기법을 통해 고장 여부를 판단하고 작전 지속 여부를 결정하게 된다. 중·대형 무인체계의 경우에는 데이터베이스에 저장된 정보로 이상 감지 기법과 잔여유효수명 예지를 통해 고장 여부를 판단하게 되며 이때 어떤 부분에 대한 원인 인지를 설명 가능한 인공지능 기법을 통해 파악하도록 한다. 최종적으로 고장 여부가 판단되면 작전 지속 여부를 결정한다.

육상의 원격정비지원센터에서는 무인체계의 데이터베이스의 정보를 실시간으로, 혹은 통신 여건에 따라 일정 주기별로 획득한 후 이를 원격정비지원센터의 데이터베이스에 저장하고 높은 컴퓨팅 파워를 이용하여 원격 진단을 실시한다. 마찬가지로 보다 높은 단계의 이상 감지와 잔여유효수명 예측, 설명 가능한 인공지능 기법을 활용한다. 무인체계에서 고장을 진단하지 못하였더라도, 원격정비지원센터에서 고장 여부가 판단되면 통신을 통해 무인체계에 이를 전달하고 작전 지속 여부를 결정한다. 최종적으로는 원격정비지원센터에서 진단한 무인체계별 데이터를 통해 중·장기 무인체계 정비계획을 수립하고 개별 무인체계의 작전 지속 여부를 판단하는 데 활용한다. 소형 무인체계에서는 컴퓨팅 파워와 통신 리소스, 모듈형 장비의 정비에 적합한 이상 감지로 고장 진단과 정비

의 효율성을 높이고, 중·대형 무인체계에서는 자산의 가치와 임무 중요성을 고려하여 이상 감지와 잔여유효수명 예측을 동시에 진행하여 고장의 조기 진단과 고장 부위 판단을 동시에 수행하는 것이 인공지능을 활용한 효율적인 해양 무인체계의 정비개념이라 할 수 있을 것이다.

8. 여건 조성을 위해 필요한 요소들

지금까지 기존의 정비개념과 그 발전 과정, 해양 무인체계의 분류와 특성, 인공지능과 원격정비를 바탕으로 한 해양 무인체계의 정비개념을 살펴보았다. 효율적인 해양 무인체계의 정비를 위해서는 인공지능 기술과 원격정비 기반의 상태기반정비개념이 필요하지만, 단순히 인공지능 기술과 원격정비 기반만 갖추어진다고 효율적인 무인체계의 정비를 할 수는 없을 것이다. 정비 여건 조성을 위해서는 여러 가지 추가적인 요소가 필요하다.

첫째, 이러한 정비개념과 정비 전략이 제도화되어야 할 것이다. 시범적으로 특정 무인체계의 운용에 인공지능 기술과 원격정비 기반의 정비를 적용한 후 보완·발전 요소를 발굴하여 이후 도입되는 무인체계의 정비개념에 이를 반영하고, 특히 무인체계의 획득 사업 내용에 정비를 위한 센싱과 데이터 축적, 통신환경

구축을 반영하여 무인체계를 위한 정비개념이 정착 되도록 하여야 한다. 제도화는 무인체계 정비 전략의 형해(形解)화를 예방하기 위한 필수적인 장치이다.

둘째, 무인체계 획득 및 운용에 통합성을 갖추어야 할 것이다. 무인체계는 인공지능으로 대표되는 자율성과 데이터 분석 및 처리 등 4차 산업혁명을 대표하는 기반 기술에 대한 투자와 주목성 그리고 분명한 변화의 필요성 때문에 군사 부문에서도 다양한 사업이 진행되고 있다. 또한, 군수 분야의 발전을 위한 미래 정비기술에 대한 투자와 연구도 증가하고 있다. 이러한 개발사업과 연구를 중앙에서 통제하여 효율성을 향상시키고 체계 통합성을 추구해야 할 것이다. 무인체계 분야는 전투체계, 무장분야, 추진체계 등 새로운 기술과 제도를 적용할 부분이 많은 만큼 정비 및 유지 분야도 작전운용성능에 반영하여 다른 분야와의 정보공유 및 주파수할당 등 체계 통합성을 추구하여야 한쪽 분야에 치우치지 않는 전투체계로 운용할 수 있을 것이다.

셋째, 정비인력과 시설의 확충이 필요하다. 무인체계의 정비는 기존의 정비와는 일부 다른 특성이 있으며, 이를 잘 이해하고 유지보수를 수행할 수 있는 인력과 시설을 무인체계의 도입과 발맞추어 확보해야 한다. 특히 여기에는 원격정비를 위한 통신 및 데이터 베이스 구축과 이를 분석하는 내용이 포함되어야 할 것이다. 군 자체 시설을 확충하기 어려운 경우에는 도입과 동시에 MRO(maintenance, repair and overhaul) 서비스나 성과기반군수지원 등 무인체계를 정비할 수 있는 군수기업 혹은 민간 조선소를 활용하는 것도 하나의 방법이 될 것이다.

마지막으로, 발전하고 있는 인공지능 기술 중 정비를 위해 활용할 수 있는 분야를 지속해서 발굴 및 도입하고 이러한 정비개념에 대한 시험평가와 인증을 수행할 수 있는 제도를 도입해야 한다. 다양한 크기와 다양한 임무를 수행하는 무인체계의 정비는 표준화 혹은 인증을 거쳐 군 내·외부에서 모두 비슷한 절차로 수행되어야 정비의 효율성을 가질 수 있을 것이다.

9. 결론

무인체계의 도입은 병력 절감 시대에 유인 전력을 대체하고, 작전능력을 향상시키는 게임 체인저가 될 것이다. 미국 등 선진국의 주도 하에 많은 무인체계의

개발과 적용이 이루어지고 있다. 특히 대한민국 해군은 유·무인 복합전투체계를 구성하여 전력의 생존성과 치명성 향상, 지속성의 증대를 기대하고 있는 만큼 획득한 해양 무인체계가 작전에서 원활히 임무를 수행하는 것만큼 중요한 요소는 없다 할 것이다.

본 연구에서는 기존 함정의 정비개념과 상태기반 정비로 발전하고 있는 정비개념을 비교하고, 인공지능과 원격 정비기술을 도입한 해양 무인체계의 정비개념도를 제안하였다. 완전 자율화 이후에는 육상에서 무인체계의 상태를 파악하고, 고장이 식별되거나 증상이 사전 예지될 경우 즉각 대체전력을 투입하고 원인을 식별하여 효율적인 정비를 수행해야 할 것이다. 이를 위해 소형 무인체계와 중·대형 무인체계의 정비개념을 일부 분리하고, 이상 감지와 잔여유효수명 예측, 설명가능한 인공지능으로 무인체계의 고장 및 상태를 조기에 진단하는 동시에 고장 부위를 식별할 수 있는 기법을 적용하고, 육상의 원격정비지원센터에서는 무인체계의 상태를 동시에 감시 및 추가적인 원격 진단함으로써 무인체계의 정비 소요를 판단할 수 있다.

다만 무인체계 운용을 위해 수집되는 각종 센서 데이터 및 통신에 관련된 부분은 군사보안과 결부되는 문제이므로, 장비의 상태 진단을 위한 데이터 확보는 제도적인 여건 하에 이뤄져야 한다는 제한점이 있다.

‘국방혁신 4.0’ 구현을 위한 ‘필승해군 4.0’의 중심에는 유·무인 복합전투체계가 있다. 인공지능 시대에 발전하는 기술과 새로운 개념을 도입하는 것은 피할 수 없는 현실이며, 우리는 보다 효과적인 무인체계의 운용을 위해 더욱 노력해야 할 것이다. 본 연구가 향후 도입될 해양 무인체계의 정비개념 도입을 위한 추가적인 연구에 활용되기를 기대한다.

참고문헌

- [1] The Office of the Director, Operational Test and Evaluation (DOT&E), 2022, Unmanned Influence Sweep System (UISS), DOT&E.
- [2] Kim, N.H., An, D. and Choi, J.H., 2017. Prognostics and health management of engineering systems. Switzerland: Springer International Publishing.
- [3] Department of Defense, 2020. Instruction 4151.22. Condition Based Maintenance Plus (CBM+) for Material Maintenance.
- [4] Pete, S., 2019. Unmanned Maritime Systems Update

[Online] Available at: <https://www.navsea.navy.mil/Exhibits/SNA2019>

[5] Chandola, V., Banerjee, A. and Kumar, V., 2009. Anomaly Detection: A Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 41 (3), pp.1–58.

[6] Hong, C.W., 2022. A study on the Application of Predictive Maintenance Using Artificial Intelligence and Big Data. *The Quarterly Journal of Defense Policy Studies*, 38(2), pp.197–228.

[7] Aizpurua, J.I., Catterson, V.M., Papadopoulos, Y., Chiacchio, F. and D'Urso, D., 2017. Supporting Group

Maintenance through Prognostics-enhanced Dynamic Dependability Prediction. *Reliability Engineering & System Safety*, 168, pp.171–188.

[8] Chamola, V., Hassija, V., Sulthana, A.R., Ghosh, D., Dhingra, D. and Sikdar, B., 2023. A Review of Trustworthy and Explainable Artificial Intelligence (xai). *IEEE Access*.

[9] Park, J.H., Jo, H.S., Lee, S.H., Oh, S.W. and Na, M.G., 2022. A Reliable Intelligent Diagnostic Assistant for Nuclear Power Plants Using Explainable Artificial Intelligence of GRU-AE, LightGBM and SHAP. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(4), pp.1271–1287.