



Received: 2026/08/21
Revised: 2026/08/31
Accepted: 2026/09/16
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Seong Won Oh

Rm 6213, No.2 Building, 91 Haeyangdaehak-ro,
Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea
Tel: +82-61-240-7123
Fax: +82-61-240-7278
E-mail: osw123@mmu.ac.kr

Abstract

첨단 해양 플랫폼의 전자시스템이 고집적·복잡화됨에 따라 열관리와 시스템 건전성 관리의 통합 필요성이 증가하고 있다. 본 연구는 열관리, 예측 및 건전성 관리(PHM), 상태기반정비 관련 연구를 분석하여 데이터, 통합, 의사결정 및 검증 측면의 연구 공백을 도출하였다. 이를 바탕으로 열정보를 전력, 진동, 계산부하 및 환경조건 등 다중 상태정보와 연계하여 상태평가와 유지보수를 지원하는 미션 전자 열 관리 아키텍처(METMA)를 제안하였다. 또한 TEV 벤치와 비민감 데이터를 활용한 단계적 검증체계를 제시하여 향후 해양 전자시스템의 통합 열관리 및 건전성 관리 실증연구를 위한 기반을 마련하였다.

As electronic systems in advanced maritime platforms become increasingly integrated and complex, the need for integrated thermal management and system health management continues to grow. This study reviews research on thermal management, prognostics and health management, and condition-based maintenance, identifying research gaps in data, integration, decision-making, and verification. Based on these findings, the Mission Electronics Thermal Management Architecture is proposed to support condition assessment and maintenance by integrating thermal information with multimodal condition data, including power, vibration, computational load, and environmental conditions. A phased verification framework using a TEV bench and non-sensitive data is presented as a foundation for future empirical research on integrated thermal and health management of maritime electronic systems.

Keywords

열관리(Thermal Management),
임무전자 열관리 아키텍처(METMA, Mission
Electronics Thermal Management Architecture),
고장예지 및 건전성 관리(PHM, Prognostics and
Health Management),
확장형 상태기반정비(CBM+, Condition-Based
Maintenance Plus),
시험·평가·검증·확인(TEVV, Test, Evaluation,
Verification & Validation)

핵추진잠수함 도입에 따른 해양 전자시스템의 통합 열관리 및 건전성관리 프레임워크 연구

Developing an Integrated Thermal and Health Management Framework for Marine Electronic Systems in the Context of Introducing Nuclear-Powered Submarines

손종락¹, 유길재², 오성원^{3*}

¹해군 중령/해군대학 해양전략-전력학처 무기체계교관

²(주) P&T 네트워크스 대표이사

³국립목포해양대학교 해군사관학부 부교수

Jong Lark Son¹, Gil Jae Yu², Seong Won Oh^{3*}

¹CDR, ROK Navy/Instructor of Naval Weapon System, Dept. of Maritime
Strategy & Force Studies, ROK Navy College

²CEO, P&T Networks Co., Ltd

³Associate professor, Naval Academy Division of Naval Science, Mokpo National
Maritime University

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

최근 해양안보 환경의 변화와 첨단 해양플랫폼의 발전에 따라 함정 및 해양시스템에 탑재되는 전자장비의 종류와 기능이 지속적으로 확대되고 있다. 정보처리, 통신, 항해, 감시, 플랫폼 관리 등 다양한 기능이 전자시스템에 의존하면서 전자장비의 안정적인 운용은 개별 장비의 성능을 넘어 플랫폼 전체의 가용성과 임무 지속성을 지원하는 중요한 요소가 되고 있다.

특히 핵추진잠수함 도입 논의는 새로운 플랫폼의 확보라는 정책적 의미뿐 아니라 장기간 운용되는 고복잡도 해양플랫폼에서 전자시스템의 신뢰성과 생애주기 건전성을 어떻게 관리할 것인가라는 연구 필요성을 제기한다. 본 연구는 핵추진잠수함 자체의 설계나 세부 성능을 분석하려는 것이 아니라, 이러한 해양플랫폼의 고도

화를 연구배경으로 하여 일반적인 해양 전자시스템의 열관리와 건전성관리 간 정보연계 문제를 다룬다.

전자장비의 집적도가 높아질수록 운용과정에서 발생하는 열환경은 장비의 성능과 신뢰성을 고려할 때 중요한 관리요소가 된다. Vichare와 Pecht[1]는 정상 상태 온도뿐 아니라 power cycle, temperature gradient 등 시간에 따라 변화하는 thermal load를 지속적으로 관찰하고 이를 prognostics에 활용하는 접근을 제시하였다. 이는 열환경 데이터가 단순한 냉각제어 정보에 머무르지 않고 장비의 상태 및 건전성 평가를 지원하는 정보로 활용될 가능성을 보여준다.

한편 PHM은 상태감시에서 출발하여 이상탐지, 고장진단, 건전성 평가 및 예측을 거쳐 유지관리의 의사결정을 지원하는 방향으로 발전하고 있다[2-4]. IEEE 1856-2017은 전자시스템 PHM capability의 분류와 개발·생애주기 적용을 위한 프레임워크를 제시하며 [5], ISO 13381-1:2025는 prognosis 개발 및 적용을 위한 데이터, 특성, 프로세스와 접근방법을 규정한다 [6]. 해양 분야에서도 PHM 연구는 health condition monitoring(HCM), fault diagnosis(FD), health prognosis(HP), maintenance decision(MD)으로 확장되고 있다[7].

최근에는 단일 온도변수보다 전력, 진동, 운용상태, 연산부하 및 환경조건 등 다중상태 데이터를 함께 수집 하여 물리적·제어적 상태를 해석하려는 데이터 기반 PHM 연구가 확대되고 있다[11]. 이는 thermal information을 독립된 health 값으로 간주하기보다 다양한 condition information 중 하나의 의미 있는 정보영역으로 다루어야 함을 뒷받침한다.

그러나 thermal management, PHM 및 상태기반 유지관리 연구가 각각 발전해 왔음에도 열관리 과정에서 생성되는 데이터를 어떠한 정보구조를 통해 상태 및 건전성 평가와 연결하고, 다시 유지관리의 의사결정 지원정보로 연계할 것인가에 대해서는 관련 개념이 여러 연구영역과 표준에 분산되어 있다. 따라서 해양 전자시스템을 대상으로 thermal management와 PHM 및 상태기반 유지관리 사이의 정보관계를 명시적으로 구조화하는 연구가 필요하다.

1.2 선행연구 검토 및 연구목적

전자시스템 prognostics 연구는 thermal load를

장비 건전성 예측에 활용할 수 있다는 가능성을 제시해 왔다[1,2]. Condition monitoring 분야에서는 상태데이터를 수집·처리하고 의미 있는 상태정보로 변환하기 위한 정보처리 구조가 발전하였다. PHM 연구는 이를 고장진단과 건전성 예측으로 확장하였으며, CBM 관련 연구에서는 이러한 정보를 유지관리의 사결정과 연결하는 방법이 연구되어 왔다[3,4]. ISO 13374-2는 개방형 상태감시 및 진단 체계를 위한 정보모델과 데이터 처리 참조모델을 제시하여 상호 운용 가능한 데이터 처리의 중요성을 보여준다[8].

이러한 연구성과에도 불구하고 본 연구에서는 해양 전자시스템의 thermal management와 health management 간 연계 관점에서 다음 네 가지 연구 공백을 설정하였다. 첫째, data gap이다. 온도와 운용조건 등의 원시데이터가 존재하더라도 이를 장비 상태를 설명할 수 있는 정보로 변환하기 위한 데이터 정보 관계가 명확하게 구조화될 필요가 있다. 특히 향후 실증에서는 온도뿐 아니라 전력, 진동, 연산부하 및 환경조건 등 이질적 데이터의 시간동기화와 메타데이터 관리가 중요하다.

둘째, integration gap이다. Thermal information이 PHM의 health assessment를 지원할 수 있지만 thermal information 자체가 곧 장비의 건전성을 의미하지는 않는다. 따라서 thermal information과 다른 condition information이 health assessment에서 어떠한 개념적 관계를 형성하는지 구조화할 필요가 있다.

셋째, decision gap이다. Health information과 prognostic information은 최종적으로 유지관리의 사결정을 지원해야 하지만 thermal management와 maintenance decision 사이의 정보연계는 개별 연구영역에서 분절적으로 다루어지는 경우가 많다.

넷째, validation gap이다. 제안된 정보구조가 논리적으로 일관되며 실제 적용 가능성을 가지는지를 확인하기 위해 연구질문, 요구사항, 정보기능, 검증 방법 및 증거 사이의 추적성이 필요하다. 또한 개념모델의 검증을 통제된 실험실 수준에서 끝내지 않고 대표적 운용환경으로 단계적으로 확장할 수 있는 실증 경로가 필요하다.

이에 본 연구는 다음 네 가지 연구질문을 설정하였다.

RQ1. 해양 전자시스템의 열환경 및 운용데이터를 장비상태를 설명하는 condition 및 thermal in-

formation으로 어떻게 구조화할 수 있는가?

RQ2. Thermal information과 PHM의 health information 사이의 관계를 어떠한 개념적 아키텍처로 표현할 수 있는가?

RQ3. Condition-thermal-health-prognostic-maintenance information 간 관계를 하나의 연속적인 정보구조로 통합할 수 있는가?

RQ4. 제안된 개념적 프레임워크의 논리적 일관성과 향후 적용 가능성을 어떠한 V&V 구조와 실증증거를 통해 평가할 수 있는가?

본 연구의 목적은 이러한 연구질문에 답하기 위해 METMA를 제안하고, thermal management와 PHM 및 상태기반 유지관리 사이의 정보관계를 해양 전자 시스템이라는 연구영역에서 구조화하는 데 있다.

2. 이론적 배경

2.1 전자시스템 Thermal Management와 Prognostics

전자시스템의 thermal management는 장비가 요구되는 운용환경에서 안정적으로 기능하도록 열적 상태를 관리하는 활동이다. 기존의 열관리 접근에서는 냉각성과 온도 유지가 중요한 목표였으나 전자 시스템 PHM 연구가 발전하면서 열환경 데이터의 활용범위가 확대되고 있다.

Vichare와 Pecht[1]는 전자장비가 경험하는 thermal load를 지속적으로 관찰하고 이를 stress-and-damage model 등과 결합함으로써 prognostics에 활용하는 개념을 제시하였다. Pecht[2] 역시 전자시스템의 PHM을 장비의 현재상태와 미래 신뢰성을 평가하기 위한 생애주기적 접근으로 설명하였다.

따라서 본 연구에서는 thermal data와 thermal information을 구분한다. Thermal data는 센서 또는 운용과정에서 획득되는 원시자료를 의미하며, thermal information은 데이터 처리와 특징추출 등을 통해 장비의 열적 상태와 변화경향을 설명할 수 있도록 의미가 부여된 정보를 의미한다.

중요한 점은 thermal information이 장비의 전체 health information과 동일하지 않다는 것이다. 장비 건전성은 열환경 외에도 전력상태, 진동, 연산부하, 통신 및 운용환경 등 다양한 상태정보와 관련될 수 있으므로 thermal information은 health assess-

ment를 지원하는 정보영역 가운데 하나로 보는 것이 적절하다.

2.2 PHM과 해양시스템 건전성관리

PHM은 장비 또는 시스템의 현재 상태를 감시하고 이상 또는 고장을 진단하며 향후 건전성 변화를 예측하여 운용 및 유지관리 의사결정을 지원하는 접근이다. Peng et al.[3]은 CBM 환경에서 machine prognostics의 발전동향을 분석하였으며, Jardine et al.[4]은 diagnostics와 prognostics를 condition-based maintenance의 핵심요소로 제시하였다.

전자시스템 분야에서는 IEEE 1856-2017이 PHM implementation과 capability classification 및 관련 생애주기 활동을 위한 표준적 프레임워크를 제공한다[5]. Prognostics 분야에서는 ISO 13381-1:2025가 prognosis 개발 및 적용에 필요한 공통 개념과 데이터, 특성 및 프로세스를 규정하고 있다[6].

특히 Zhang et al.[7]은 해양시스템 및 장비 PHM 연구를 분석하여 HCM → FD → HP → MD의 네 가지 주요 기술과정을 제시하였다. 이러한 구조는 해양 전자시스템에서 thermal information을 단순한 환경제어 정보로 한정하지 않고 health assessment를 지원하는 정보로 활용하고 궁극적으로 유지관리 의사결정까지 연결할 수 있는 이론적 기반을 제공한다.

Table 1. Relationship between prior research domains and research gaps

Research Domain	Primary Function	Relationship to This Study	Identified Gap
Thermal Management	Thermal-state management	Thermal Data / Information	Data
Condition Monitoring	Condition-data acquisition and processing	Condition Information	Data
PHM	Condition monitoring, diagnosis, and prognosis	Health Information	Integration
Prognostics	Future-state prognosis	Prognostic Information	Integration
CBM/CBM+	Condition-based maintenance	Maintenance Decision	Decision
Systems Engineering	Requirements, V&V, and traceability	Evidence / Traceability	Validation

최근 UAV PHM 데이터 연구에서는 비행 telemetry에 진동과 온도, 사용자 입력 및 정밀 운동상태를 결합한 multimodal dataset을 구축하여 물리상태와 제어상태를 함께 해석하려는 접근이 제시되었다[11]. 본 연구는 이러한 최근 흐름을 특정 UAV 알고리즘에 한정하지 않고, 해양 전자시스템에서 다양한 condition information을 thermal information과 함께 구조화할 필요성을 뒷받침하는 사례로 활용한다.

2.3 기존 체계와 METMA의 관계

본 연구에서 METMA는 기존 PHM 또는 CBM 체계를 대체하기 위한 새로운 표준을 의미하지 않는다. IEEE 1856은 전자시스템 PHM의 포괄적인 구현 프레임워크를 제공하며[5], ISO 13381-1은 prognostics 개발 및 적용을 위한 공통적인 요구사항을 제시한다[6]. ISO 13374-2는 상태감시·진단 시스템의 정보 및 처리모델을 제공하고[8], OSA-CBM은 개방형 CBM 아키텍처의 참조개념을 제공한다[9].

METMA의 연구적 위치는 이러한 기존 연구와 표준에 분산되어 있는 thermal information-health information-maintenance information 관계를 해양 전자시스템이라는 도메인에서 명시적으로 구조화하는 것이다. 따라서 METMA는 기존 PHM architecture의 대체체계가 아니라 thermal management와 health management 사이의 정보연계를 설명하기 위한 domain-specific conceptual information framework로 정의한다.

3. 연구방법 및 METMA 설계

3.1 연구방법

본 연구는 공개된 학술문헌 및 국제표준을 기반으로 수행한 개념적 아키텍처 연구이다. 연구절차는 다음과 같다. 첫째, electronics thermal management, PHM, marine PHM, prognostics, CBM 및 systems engineering 관련 문헌과 표준을 검토하였다. 둘째, 각 연구영역에서 사용되는 데이터와 정보의 기능을 분석하여 thermal-condition-health-maintenance 사이의 개념적 관계를 도출하였다. 셋째, 선행연구 분석을 통해 data, integration, decision, validation의

네 가지 research gap을 정의하였다. 넷째, 이러한 연구공백을 구조화하기 위한 METMA 개념적 아키텍처를 설계하였다. 다섯째, RQ-requirement-architecture function-evidence 사이의 추적성을 기반으로 향후 실증연구를 위한 V&V framework를 제안하였다.

본 연구는 공개자료 기반의 개념연구이며 특정 플랫폼 또는 실제 장비의 세부 설계와 성능을 평가하지 않는다. 또한 실제 운용데이터를 이용하여 METMA의 효과를 실증하는 것은 본 연구의 범위에서 제외하였다. 최근의 multimodal PHM 사례는 후속 실증설계의 타당성을 설명하기 위한 문헌적 근거로만 활용한다.

3.2 METMA의 정의 및 설계원칙

METMA(mission electronics thermal management architecture)는 해양 전자시스템에서 획득되는 열환경 및 운용상태 데이터를 condition information과 thermal information으로 구조화하고, 이를 PHM 기반의 health assessment 및 prognostics와 연계하여 maintenance decision support까지 연결하기 위한 도메인 특화 개념적 정보 프레임워크이다.

METMA 설계에는 네 가지 원칙을 적용하였다. 첫째, separation of data and information이다. 원시 데이터와 의미가 부여된 상태정보를 구분한다. 둘째, separation of thermal and health information이다. thermal information을 health information과 동일하게 취급하지 않고 health assessment를 지원하는 하나의 정보영역으로 정의한다. 셋째, multimodal extensibility이다. 전력, 진동, 연산부하, 환경조건 등 비열적 condition information을 동일한 health assessment 구조에 확장할 수 있도록 한다. 넷째, lifecycle information continuity이다. 상태 및 열정보가 진단·건전성평가·예측을 거쳐 유지관리 의사결정을 지원할 수 있도록 정보관계를 연속적으로 구성한다.

4. METMA 통합 정보 아키텍처

4.1 METMA Four-Layer Architecture

METMA는 condition information, thermal information, health information 및 maintenance information의 네 가지 주요 정보영역으로 구성한다.

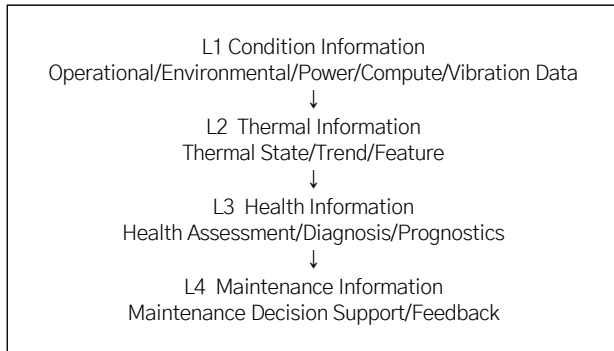


Fig. 1. METMA four-layer conceptual architecture

Fig. 1의 계층은 단순한 직렬 처리과정을 의미하지 않는다. L2 thermal information은 L1의 여러 condition information 가운데 열환경과 관련된 정보를 구조화한 영역이며, L3 health assessment에서는 thermal information과 다른 상태정보가 함께 활용될 수 있다. 특히 전력, 진동, 연산부하 및 환경조건은 후속 실증에서 thermal information의 해석 맥락을 제공하고 다중상태 기반 health assessment로 확장

Table 2. METMA information layers and PHM/CBM relationships

Layer	Purpose	Primary Information	PHM/CBM Linkage
L1 Condition	Representation of operational, environmental, and equipment conditions	Operational / Environmental / Power / Compute / Vibration	HCM
L2 Thermal	Representation of thermal state and trend	Thermal State / Trend / Feature	HCM / FD Support
L3 Health	Health assessment and prognosis	Health / Diagnostic / Prognostic Information	FD/HP
L4 Maintenance	Decision support	Maintenance Information / Feedback	MD

하기 위한 후보 정보이다.

4.2 Thermal-to-Health Information Transformation

METMA에서 가장 중요한 관계는 thermal data를 직접 health information으로 간주하지 않는 것이다. 원시 thermal data는 데이터 처리 및 특징추출 과정을 거쳐 thermal information으로 변환된다. Thermal information은 다른 condition information과 함께 health assessment를 지원하며, 필요할 경우 prognostic information으로 발전하여 유지관리 의사결정을 지원할 수 있다.

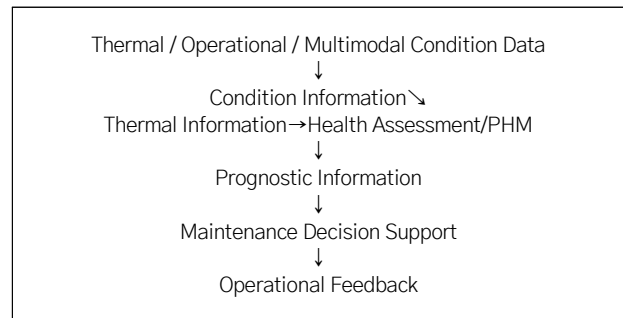


Fig. 2. Thermal-health-maintenance information relationship

이러한 구조의 핵심은 열관리와 건전성 관리를 별개의 활동으로 취급하기보다 두 영역 사이에서 공유될 수 있는 정보의 의미와 관계를 명확하게 표현하는 것이다. 따라서 METMA의 학술적 기여는 새로운 냉각기술이나 PHM 알고리즘 자체를 제안하는 것이 아니라 thermal management에서 생성되는 정보가 PHM 및 상태기반 유지관리의 정보영역과 어떠한 관계를 형성할 수 있는지를 개념적으로 구조화하는 데 있다.

4.3 Multimodal Condition Information과 Health Data Set 개념

후속 실증에서 METMA의 L1은 단일 센서값의 집합이 아니라 시간적으로 정렬된 condition information의 기반으로 구현될 필요가 있다. 본 연구는 이를 향후 mission electronics health data set으

로 발전시킬 수 있는 개념적 데이터 구조로 제안한다. 후보 데이터에는 temperature, power, flow/pressure와 같은 thermal-system 변수뿐 아니라 vibration, compute load, operational state 및 ambient condition 등이 포함될 수 있다.

이러한 데이터셋의 목적은 특정 AI 알고리즘을 학습시키는 데 한정되지 않는다. 동일 시간축, 시험 조건, 장비구성, 운용상태 및 이상상태에 대한 메타 데이터를 함께 관리함으로써 thermal information의 의미변환, health assessment의 입력관계, 실험 반복성 및 V&V evidence를 확보하는 것이 우선 목적이다. 따라서 데이터 품질, 시간동기화, 결측치, 센서 정확도 및 시험조건의 추적성은 향후 실증연구에서 별도의 검증대상이 되어야 한다.

5. METMA V&V 및 논의

5.1 Research Traceability와 V&V

본 연구는 METMA의 개념적 구조를 제안하는 연구이므로 실제 시스템에서 METMA의 성능 또는 효과를 입증하였다고 주장하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 향후 실증연구를 위한 V&V 구조를 제안한다.

Verification은 research requirement와 METMA의 정보기능이 논리적으로 일치하는지를 확인하는 과정으로 정의한다. validation은 제안된 정보구조가 실제 연구대상과 의도된 운용환경에서 연구목적

을 충족하는지를 실증적으로 평가하는 과정으로 정의한다. 이러한 구분은 요구사항에 대한 적합성과 의도된 환경에서의 적절성을 구분하는 시스템공학의 일반적 V&V 원칙에 기반한다[10].

이러한 추적성 구조를 적용하면 후속연구에서 각각의 research question이 어떠한 정보기능과 연결되고 어떤 자료를 이용하여 검증되어야 하는지를 체계적으로 관리할 수 있다.

5.2 단계적 Empirical Validation Concept

METMA의 후속 검증은 단일 단계의 실험보다 연구 성숙도에 따라 evidence를 축적하는 방식이 적절하다. 본 연구에서는 laboratory-TEVV bench-representative marine platform의 세 단계로 구성되는 실증개념을 제안한다.

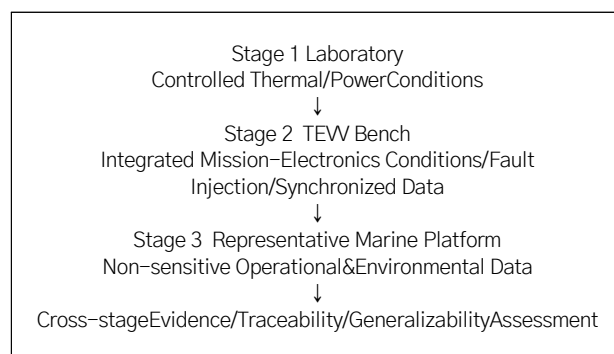


Fig. 3. METMA staged empirical validation concept

Stage 1에서는 통제된 조건에서 센서, 데이터처리 및 thermal information 변환의 반복성과 민감도를 평가한다. Stage 2에서는 대표적 mission-electronics 구성과 운용부하를 사용하여 여러 condition information의 시간동기화, 정보연계 및 시험증거의 추적성을 평가한다. Stage 3에서는 비민감 대표 해양플랫폼 또는 유사 환경에서 환경·운용변화가 METMA 정보관계에 미치는 영향을 평가한다. 이 구조는 현재 논문의 실증결과가 아니라 향후 연구를 위한 validation roadmap이다.

시스템공학 관점에서 검증은 요구사항과 구현 결과의 일치에 대한 객관적 증거를 확보하고, 검증·확인인 시험, 분석, 검사 및 시연 등 적절한 방법을 통해 단계적으로 수행될 수 있다[10]. 따라서 METMA의 후속연구에서도 데이터 수집 자체보다 어떤 re-

Table 3. Research traceability and future validation concept

Research Gap	RQ	METMA Scope	Verification	Future Validation
Data	RQ1	L1-L2	Data-Information relationship	Evaluation based on synchronized data and data quality
Integration	RQ2	L2-L3	Thermal-Health relationship	Multi-modal health-assessment linkage
Decision	RQ3	L3-L4	Health-Maintenance relationship	Decision usefulness
Validation	RQ4	L1-L4	End-to-End Traceability	Staged integrated empirical validation

search requirement를 어떤 evidence로 확인하는지 명시하는 것이 중요하다.

5.3 연구의 차별성 및 의의

본 연구의 첫 번째 차별성은 thermal management와 PHM 사이의 관계를 단순히 기술적으로 연결하는 것이 아니라 정보의 의미변환 관점에서 구조화했다는 것이다. 두 번째는 thermal information을 health information과 동일시하지 않고, health assessment를 지원하는 독립적인 정보영역으로 구분했다는 점이다. 이는 열환경과 장비건전성 사이의 관계를 지나치게 단순화하는 것을 방지하면서 전력, 진동, 연산부하 및 환경조건 등 다양한 condition information을 추가할 수 있는 확장성을 제공한다.

세 번째는 health information에서 maintenance decision까지의 연결을 포함함으로써 thermal management-PHM-CBM+의 생애주기적 정보연속성을 제시했다는 점이다. 네 번째는 research gap과 RQ, METMA 기능 및 V&V 사이의 추적성을 설정하고 laboratory-TEVV bench-representative marine platform의 단계적 evidence 경로를 제시함으로써 개념적 프레임워크를 향후 실증연구로 발전시킬 수 있는 연구구조를 구체화했다는 점이다.

다만 METMA는 현재 단계에서 개념적 프레임워크이다. 따라서 METMA가 장비의 신뢰성이나 가용성을 향상시킨다고 단정할 수 없으며, 특정 health indicator 또는 prognostic algorithm의 우월성을 주장할 수도 없다. 또한 본 연구에서 제시한 multimodal 변수는 후속 검증을 위한 후보 정보이며, 변수별 인과관계나 예측성능은 본 연구에서 실증하지 않았다.

향후 연구에서는 공개 또는 비민감 해양 전자 시스템의 열환경 및 운용데이터를 활용하여 thermal information과 health assessment 사이의 관계를 실증적으로 분석할 필요가 있다. 초기 연구에서는 temperature와 thermal trend를 중심으로 thermal state와 후보 thermal health indicator의 측정타당성을 검토하고, 이후 power, vibration, compute state 및 environment를 결합한 multimodal health assessment로 확장하는 단계적 접근이 적절하다. 더 나아가 복수의 대표 해양플랫폼 또는 서로

다른 mission-electronics 구성에서 동일한 정보관계가 유지되는지 평가함으로써 일반화 가능성을 검토할 필요가 있다.

6. 결론

최근 해양 안보환경의 변화와 함정체계의 첨단화에 따라 함정에 탑재되는 전자장비의 집적도와 운용 복잡성이 증가하고 있으며, 이에 따른 열환경 관리와 장비 신뢰성 확보의 중요성도 높아지고 있다. 특히 핵추진잠수함 도입 논의는 장기간 운용되는 복합 해양 플랫폼에서 임무전자장비의 안정적인 운용과 정비 지원체계를 어떻게 발전시킬 것인가에 대한 연구 필요성을 제기한다.

기존의 함정 전자장비 열관리는 주로 장비에서 발생하는 열을 제거하고 허용 가능한 운용환경을 유지하는 기능에 중점을 두어 왔다. 그러나 전자장비의 고집적화와 지능화가 진행됨에 따라 열관리를 단순한 냉각 기능으로 한정하기보다는 온도 및 운용상태 데이터의 획득, 이상상태 탐지, 장비 건전성 평가, 고장 예측 및 상태기반 정비의사결정까지 연계하는 통합적인 접근이 요구된다.

첨단 해양플랫폼의 발전은 해양 전자시스템의 성능뿐 아니라 장기간 안정적인 운용과 생애주기 건전성 관리의 중요성을 높이고 있다. 특히 핵추진잠수함 도입이라는 해양안보 및 기술환경의 변화는 고복잡도 해양플랫폼에서 전자시스템의 신뢰성과 유지관리 문제를 장기적인 관점에서 연구할 필요성을 제기한다.

본 연구에서는 이러한 문제의식에서 출발하여 thermal management, PHM, prognostics 및 상태기반 유지관리 관련 선행연구와 표준을 분석하고 data, integration, decision 및 validation의 네 가지 research gap을 도출하였다. 이를 바탕으로 해양 전자 시스템의 thermal management와 health management 사이의 정보관계를 구조화하기 위한 METMA를 제안하였다.

METMA는 condition information, thermal information, health information 및 maintenance information의 네 가지 주요 정보영역으로 구성된다. 특히 thermal information을 health information 자체가 아니라 health assessment를 지

원하는 정보영역으로 정의하고, 이를 prognostic information 및 maintenance decision support와 연결하는 개념적 정보흐름을 제시하였다. 또한 전력, 진동, 연산부하 및 환경조건 등 다양한 condition information을 확장할 수 있도록 하여 thermal information의 해석 맥락과 multimodal health assessment의 기반을 제시하였다.

RQ1과 관련하여 열환경 및 운용데이터를 condition 및 thermal information으로 구분하여 구조화하였으며, RQ2와 관련하여 thermal information을 health assessment의 지원정보로 위치시켰다. RQ3에 대해서는 condition-thermal-health-prognostic-maintenance information으로 이어지는 통합 정보관계를 제안하였다. RQ4와 관련해서는 research gap-RQ-requirement-METMA function-evidence-validation으로 이어지는 연구추적성 구조와 laboratory-TEVV bench-representative marine platform의 단계적 실증개념을 제시하였다.

본 연구의 의의는 기존 PHM이나 상태기반 유지관리 표준을 대체하는 새로운 체계를 제안한 데 있지 않다. 기존 thermal management, PHM 및 유지관리 연구에 분산되어 있는 정보관계를 해양 전자시스템이라는 연구영역에서 명시적으로 구조화하고, 후속 실증연구로 발전시킬 수 있는 개념적 기반을 제시하였다는 데 있다.

그러나 본 연구는 공개문헌과 표준을 기반으로 한 개념적 연구라는 한계를 가진다. 실제 운용데이터를 이용한 실증분석을 수행하지 않았으며 thermal information과 health information 사이의 정량적인 관계도 규명하지 않았다. 따라서 후속연구에서는 첫째, 비민감 실험데이터를 이용한 thermal state 및 후보 health indicator의 측정타당성 검증, 둘째, 전력·진동·연산부하·환경조건을 포함한 multimodal condition dataset 기반 health assessment, 셋째, TEVV bench를 통한 통합·고장상태 시험과 evidence traceability 확보, 넷째, 복수의 대표 해양플랫폼 또는 운용 환경에서의 적용성 및 일반화 평가를 단계적으로 수행할 필요가 있다. 이러한 연구가 축적된다면 thermal management와 PHM 및 상태기반 유지관리 사

이의 정보연계를 체계적으로 연구하고, 고집적 해양 임무전자시스템의 생애주기 건전성관리 연구로 확장하기 위한 기반을 제공할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] N. Vichare & M. Pecht, 'Enabling Electronic Prognostics Using Thermal Data,' in Proceedings of the 12th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems, 2006.
- [2] Michael G. Pecht, Prognostics and Health Management of Electronics, John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Ying Peng, Ming Dong, & Ming Jian Zuo, 'Current Status of Machine Prognostics in Condition-Based Maintenance: A Review,' The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, VOL. 50, 2010, pp. 297-313.
- [4] Andrew K. S. Jardine, Daming Lin, & Dragan Banjevic, 'A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance,' Mechanical Systems and Signal Processing, VOL. 20, NO. 7, 2006, pp. 1483-1510.
- [5] IEEE, IEEE Std 1856-2017: IEEE Standard Framework for Prognostics and Health Management of Electronic Systems, 2017.
- [6] ISO, ISO 13381-1:2025, Condition Monitoring and Diagnostics of Machine Systems—Prognostics—Part 1: General Guidelines and Requirements, 2025.
- [7] Peng Zhang, Zeyu Gao, Lele Cao, Fangyang Dong, Yongjiu Zou, Kai Wang, Yuewen Zhang, & Peiting Sun, 'Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy,' Machines, VOL. 10, NO. 2, 2022, Article 72.
- [8] ISO, ISO 13374-2:2007, Condition Monitoring and Diagnostics of Machines—Data Processing, Communication and Presentation—Part 2: Data Processing, 2007.
- [9] MIMOSA, Open System Architecture for Condition-Based Maintenance (OSA-CBM), Version 3.3.1, MIMOSA, 2010.
- [10] Steven R. Hirshorn, Linda D. Voss, & Linda K. Bromley, NASA Systems Engineering Handbook, NASA/SP-2016-6105 Rev. 2, National Aeronautics and Space Administration, 2016.
- [11] Chun Fui Liew, Gengyu Li, Akira Osaka, Samir Khan, Naoya Takeishi, & Takehisa Yairi, 'Development and Sharing of a Multi-Modal Indoor UAV Dataset for PHM Research,' Proceedings of the Asia Pacific Conference of the PHM Society 2025, VOL. 5, NO. 1, 2025.

<https://doi.org/10.36001/phmap.2025.v5i1.4701>