

계층 구조 기반의 무기체계 장비 점검을 위한 범용 BIT 처리 모듈의 설계 및 구현

Design and Implementation of a Generic BIT Processing Module for Hierarchical Equipment Diagnostics in Weapon Systems

박 한 응¹

Han-Woong Park¹

요 약

본 논문은 무기체계에 적용 가능한 범용적인 BIT(built-in test) 상태 판단 모듈의 설계 및 구현 방안을 제안한다. 제안된 모듈은 계층 구조를 갖는 LRU(line-replaceable unit) 기반 장비 구조를 고려하여, 각 LRU 단위의 상태를 비트 수준의 신호정보를 기반으로 정밀하게 판단할 수 있도록 설계되었다. 연동 프로토콜과 상태 판단 로직의 분리를 위해 외부 XLSX 기반의 bit DB 및 LRU DB를 활용하며, 이를 통해 하드코딩 없이도 비트 항목의 추가 및 수정이 가능하도록 구조화하였다. 상태 판단 로직은 DFS 기반 재귀 알고리즘과 composite 디자인 패턴을 도입하여 트리 구조의 LRU 계층 전반에 걸쳐 중복 없는 효율적인 판단이 가능하며, 다양한 장비 및 시험 환경에서 반복 적용 가능한 구조적 확장성과 유지보수 용이성을 동시에 확보하였다.

Abstract

This study proposed the design and implementation of a generic built-in test (BIT) processing module applicable to weapon systems. The module was designed to evaluate the operational status of line replaceable units (LRUs) based on a hierarchical equipment structure using bit-level diagnostic data. To decouple the status evaluation logic from hardware interface protocols, the proposed architecture employed externally manageable XLSX-based bits and LRU databases, enabling flexible updates without software recompilation. The evaluation engine adopted a recursive algorithm inspired by the composite design pattern and depth-first search (DFS), ensuring an efficient and non-redundant state propagation across multilevel LRU trees. Moreover, the module provided a scalable and maintainable foundation, contributing to the standardization and automation of health diagnostics across various weapon platforms.

Key words: Hierarchical BIT Processing, Equipment Diagnostics in Weapon Systems, Recursive Status Evaluation Algorithm, External Database-Driven BIT Module, Prognostics and Health Management (PHM)

I. 서론 및 연구 필요성

현대 무기체계는 점차적으로 시스템 규모가 대형화되고, 탑재 장비 간 상호 연동 및 통합 운용 요구가 증가함에 따라 장비의 운용 상태를 정밀하게 판단하는 기술의

중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히 레이더 시스템과 같은 고집적 통합 장비는 각 구성 요소의 상태 정보를 기반으로 전체 장비의 작전 가능 여부를 정확히 판단할 수 있는 BIT 처리 기술의 고도화를 필요로 한다^[1].

기존의 BIT 처리는 주로 단일 장비 수준의 단순 고장

한화시스템(Hanwha Systems)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0006-3896-1060>)

· Manuscript received October 14, 2025 ; Revised October 24, 2025 ; Accepted November 14, 2025. (ID No. 20251014-122)

· Corresponding Author: Han-Woong Park (e-mail: hwpark4415@hanwha.com)

감지에 초점이 맞춰져 있으며, 판단 로직이 하드코딩 방식으로 구현되어 있어 새로운 장비나 프로토콜이 추가될 경우 통제 소프트웨어 전반에 대한 코드 수정과 재검증이 반복적으로 발생하는 구조였다. 이는 대규모 시스템에서의 확장성과 유지보수성을 저해할 뿐만 아니라, 시험 현장에서 발생하는 신규 요구사항 대응에도 상당한 제약을 유발하였다.

또한, 다양한 시험 환경과 실제 운용 현장에서 BIT 항목의 변경 및 추가가 빈번하게 발생함에도 불구하고, 시스템 운용자나 체계 통제 인력이 직접 수정할 수 없는 구조로 인해 SW 인력이 시험에 상시 참여해야 하는 비효율적인 상황이 반복되고 있었다. 이와 같은 문제는 무기체계 운용의 유연성을 저하시키고, 개발 비용 및 시험 공수 증가라는 실질적인 부담을 초래하고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자, 무기체계 전반에서 재사용 가능한 범용 BIT 처리 모듈을 설계 및 구현하였다. 이 모듈은 구성 장비별 bit 정보를 통합적으로 분석하여 계층적 구조의 LRU(교체 가능한 최소 장비 단위) 단위 상태를 판단하며, DB 기반 설계를 통해 SW 변경 없이도 BIT 항목 추가 및 로직 변경이 가능하도록 구현되었다. 본 연구의 핵심 기여는 다음과 같다.

- 확장성과 유지보수성 확보: 하드코딩 의존 문제를 해소하고 재사용 가능한 모듈 구조를 설계
- 운용 편의성 제고: 체계문서 기반 DB 설계와 일반화된 알고리즘으로 비SW 인력도 대응 가능한 구조 제공
- 실시간 처리 성능 보장: 고속 판단 로직을 통해 실시간 BIT 요구를 만족하고, 향후 예지정비(PHM) 적용 기반 마련

II. 제안 모듈의 설계 및 구조

2-1 설계 개요

본 연구에서 제안하는 BIT 처리 모듈은 무기체계의 구성 장비의 상태를 효과적으로 판단하기 위해 데이터 중심의 유연한 구조와 재귀 기반의 계층적 판단 알고리즘을 결합한 구조로 설계되었다. 기존의 정적 판단 로직과 달리, 연동문서(ICD), 구성정보(BOM, PBS) 기반의 구조화된 DB를 활용하여 판단 조건을 외부화하고, 판단 엔진은 해당 DB를 참조

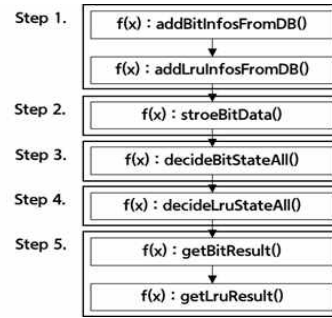


그림 1. 처리구조 표준화 단계별 호출 구조
Fig. 1. Stepwise invocation structure of the standardized processing framework.

하여 장비의 상태를 동적으로 판단하도록 구성되어 있다. 제안된 모듈은 전체 BIT 처리 절차를 그림 1과 같이 다섯 단계로 표준화하여 설계되었다. 초기 단계에서는 체계 문서(ICD, BOM, PBS 등)로부터 자동 생성된 외부 DB를 로딩하고, 운용 중 각 장비로부터 수신되는 BIT 정보를 DB 기반의 구조체 형태로 저장한다. 로딩 단계에서 DB의 오류가 감지되면 오류 로그 리포트 후 판단 엔진을 비활성화한다. 로드 정상인 경우, 상태 판단 시점에 도달하면, 저장된 BIT값에 대해 mask 연산 및 비교 연산을 수행하여 개별 BIT 상태를 평가하고, 이어서 BIT 상태를 참조하는 LRU의 상태를 판단하는 과정을 수행한다.

2-2 BIT DB 및 LRU DB 구조

2-2-1 BIT DB 구성

BIT DB는 무기체계 연동문서(ICD)를 기반으로 구성되며, 각 BIT 항목에 대해 다음과 같은 정보를 포함한다.

- BIT ID (Main ID, Sub ID)
- BIT 명칭 및 장비 소속 정보
- 연동 ICD 정보: byte 위치, mask 값, 연산 방식
- 연산 방식 종류: AND, OR, XOR, NOT, AND_NOT_ZERO 등 커스텀 연산 포함

연산 방식은 특정 위치의 바이트값을 마스크 연산하여 고장/정상 판단에 사용된다. 예를 들어, AND_NOT_ZERO는 마스크 후 값이 0이 아니면 정상으로 판단하는 방식이다. 이러한 로직은 DB화되어 있어 SW 코드 변경 없이 연산 방식이나 기준을 유연하게 변경 가능하다.

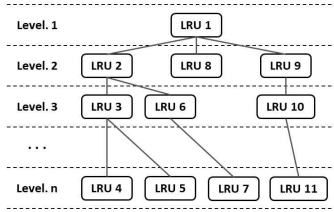


그림 2. LRU 계층 구조 트리도
Fig. 2. Tree diagram of the LRU hierarchical architecture.

2-2-2 LRU DB 구성

LRU DB는 무기체계의 BOM 및 PBS 문서를 기반으로 구성되며, 다음과 같은 필드를 포함한다.

- LRU ID, name, 계층 level 정보
- 상태 판단 항목: 전원 꺼짐, 고장, 성능저하
- BIT ID 리스트: 각 판단 항목별 참조 BIT 정보
- 운용상태 의존성: 시스템 상태에 따른 상태 판단

각 LRU는 트리 구조로, 계층적으로 연결되어 있으며, 하위 LRU의 상태는 상위 LRU 판단에 영향을 미친다. 이 트리 구조는 그림 2로 시각화될 수 있다^[2].

본 연구에서 DB는 비SW 인력의 가독성과 현장 친숙성을 고려해 XLSX 포맷을 채택하였다. 또한, DB는 통제장치 SW에 탑재되어 BIT 담당 엔지니어만 수정 권한을 갖고, 시각 편집은 유지하되 생성 및 탑재는 전용 도구를 통해 통제함으로써 XLSX 형태 DB 운용의 오류 가능성을 줄였다.

2-3 판단 로직 설계

2-3-1 BIT 판단 방식

BIT 판단은 각 구성 장비로부터 수신된 통신데이터에 포함된 BIT 정보에 대해 BIT DB에 정의된 연산 방식 및 기준값에 따라 수행된다. 각 장비에서 수신된 BIT 데이터는 DB 구조 기반의 구조체로 저장되고, 판단 시에는 정의된 mask 연산이 적용되어 고장/정상 상태가 기록된다.

2-3-2 LRU 상태 판단 알고리즘

LRU 상태 판단은 BIT 상태 판단 이후, 트리 구조 기반으로 그림 2의 LRU 번호와 같이 상위 LRU부터 재귀적으로 수행된다. 이 판단은 계층구조에서 후위 집계와 중복 최소화를 효과적으로 만족하는 DFS(depth-first search, 트

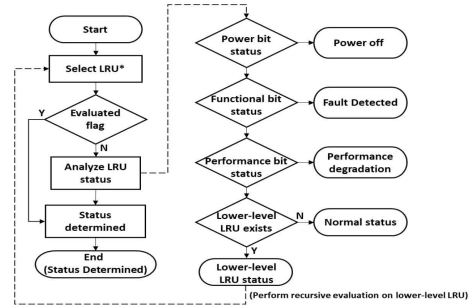


그림 3. 재귀적 LRU 상태 판단 알고리즘 흐름도
Fig. 3. Flowchart of the recursive LRU status evaluation algorithm.

리형 구조에서 하위 결과를 모아 상위 상태를 정하는 탐색 방식) 알고리즘을 기반으로 하며, 각 LRU마다 상태 판단 시 evaluated flag를 기록하여 중복 판단을 방지한다.

- 상태 판단 우선순위: 전원 → 고장 → 성능저하
 - 상위 LRU는 하위 LRU들의 상태를 통합 반영
- 이 구조는 그림 3에 정리되어 있으며, 우선순위에 따른 판단이 모두 정상인 경우, 하위 레벨 LRU에 대해 재귀적 상태 판단을 반복한다.

2-4 모듈화 구조 및 성능 고려사항

본 모듈은 header-only 방식의 라이브러리로 구현되어 별도의 컴파일 의존성이 없으며, 헤더파일 하나만 참조하면 모든 기능을 사용 가능하다. 이는 디버깅 편의성과 배포 효율성 측면에서도 이점이 크다. 또한, 판단 시간 최적화를 위해 중복 연산 제거, 구조체 기반 메모리 접근 등을 설계에 반영하였다.

III. 구현 결과 및 적용 사례

3-1 모듈 구조 및 설계 방식

모듈의 대표적인 구성 요소는 다음 다섯 가지로, 체계 문서 기반으로 DB를 생성하는 DB 파서, DB 로더, 각 구성 외부 장비에서 BIT 데이터 수집·저장하는 수신부, DB 기반의 BIT 상태 판단과 DFS 기반 재귀 알고리즘으로 중복 없는 LRU 상태 평가를 수행하는 판단 엔진, 전체 결과를 DB 기반의 표준 포맷으로 제공하는 결과 인터페이스이다. 특히, 판단 엔진의 구조는 composite 패턴과 DFS 최

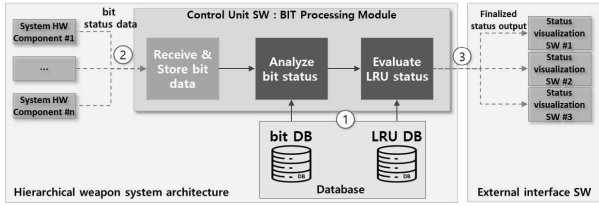


그림 4. BIT 처리 모듈 전체 흐름도
Fig. 4. Overall flowchart of the BIT processing module.

적화 알고리즘을 결합하여, 대규모 LRU 트리에서도 효율적이고 확장 가능한 상태 판단이 가능하다(그림 4).

3-2 성능 검증

성능 시험은 실제 무기체계 통제 SW 환경에서 진행하였다. Intel i7-5700EQ(2.6 GHz), 16 GB DDR3, Linux Embedded 환경에서 시험조건은 BIT 70 k개, LRU 3 k개 기준으로 100 k회 반복 수행하였다.

결과적으로 단일 전체 판단 평균 300 μs 이내 성능을 확보하였다. 이는 대부분의 무기체계에서 운용 중 수행되는 장비점검의 주기가 수초 수준임을 고려하면 실시간 제약을 충분히 만족하는 수치이다. 또한, *evaluated flag* 활용, 트리 캐시 구조 최적화, 재귀 호출 경량화 등을 통해 연산 중복을 제거하였다.

3-3 적용 효과 및 사례

본 모듈은 복수의 무기체계 통제 SW 프로젝트에 적용되어 다음과 같은 효과가 검증되었다. 첫째, 개발 공수 절감: ICD 기반 DB 파싱과 모듈화로 수작업 코드 제거. 둘째, 시험 편의성 향상: BIT 항목 변경 시 DB 수정만으로 대응 가능. 셋째, 구조 변경 대응성: LRU 트리 기반으로 장비 변경에도 유연히 확장 가능. 이를 통해 유지보수 비용 절감과 시스템 확장성이 크게 향상되었다.

3-4 외부 연동 호환성 측면 효과

운용 환경마다 상이했던 외부 장비 연동 구조는 본 모듈을 통해 표준화된 인터페이스로 정리되었다. BIT/LRU 상태 결과를 구조화된 DB 기반으로 직렬화함으로써, 장비 교체 시 외부 SW 영향 최소화, 통제 SW 인터페이스 코드 재사용, 로직과 연동 코드의 완전 분리가 가능해졌다. 이는 곧

표 1. 하드코딩 방식 대비 제안 모듈 비교

Table 1. Comparison between the hard-coded approach and the proposed module.

Category	Hard-coded	Proposed module	Improvement (effort/LOC)
Line of code (LOC)	150,000 (BIT 70 k, LRU 3 k)	1,500 (BIT 70 k, LRU 3 k)	Significantly reduced
Handling rule changes	Recompilation/re-verification	DB Replacement/Update only	Lead time ↓
Testing effort	Requires SW engineers	Can be handle by non-SW personnel	Verification overhead ↓

연동 호환성, 모듈 독립성, 장비 교체 유연성으로 이어져, 전체 무기체계 SW 품질을 높이는 결과를 가져왔다(표 1).

IV. 결론

본 연구는 무기체계 전반에 적용 가능한 계층 구조 기반 BIT 처리 모듈의 설계와 구현 방법을 제안하였다. 제안된 모듈은 DB 기반 구조를 통해 판단 로직의 유연한 변경과 유지보수를 지원하며, DFS 기반 최적화 알고리즘으로 대규모 LRU 트리에서도 실시간 성능을 검증하였다.

이 모듈은 특정 프로젝트나 플랫폼에 종속되지 않고, 다양한 도메인(해상·항공·지상)에서 활용 가능한 범용 BIT 처리 플랫폼으로 확장 가능성을 갖는다. 또한, 표준화된 데이터 구조와 외부 연동 방식은 유지보수성, 도메인 독립성, 재사용성을 크게 향상시켰다.

향후에는 LRU 상태 이력과 운용 데이터를 저장 및 활용한 예지정비 확장, 판단 알고리즘의 적응성 강화, DB 관리 도구 개발을 통해 본 연구의 실용성을 더욱 확대할 수 있을 것이다.

References

[1] H. Yunlai, L. Yuying, B. Ning, and X. Jia, "Research on intelligent monitoring and diagnosis system for radar BIT," in *IET International Radar Conference 2009*, Guilin, Apr. 2009.
[2] A. Colling, M. Dunajski, H. Kunduri, and J. Lucietti, "New quasi-Einstein metrics on a two-sphere," 2024. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.04117>