

무기체계 건전성 프로그램 기반 시제 항공기 잔존자산가치 평가 모델 개발 및 시뮬레이션에 관한 연구

A Study on Developing and Simulating a Residual Asset Valuation Model of Prototype Aircraft Based on Weapon System Integrity Programs

김성익¹⁾ · 유순미^{*,1)}

Sungik Kim¹⁾ · Soonmi Yu^{*,1)}

[초 록]

시제 항공기는 연구개발 단계에서 물리적 노후화와 기술적 진부화가 결합된 복합체계(SoS) 특성을 가지므로, 기존 감정평가 방식으로는 실질 잔존가치를 산정하기 어렵다. 본 연구는 미국 국방부의 무기체계 건전성 가이드(WSIG) 및 4대 계통별 건전성 프로그램(ASIP, ENSIP, MECSIP, AVIP)을 공학적 기초로 하여 계통별 잔존가치 평가 모델을 개발하였다. 세부적으로는 구조의 비가역적 선형 감소, 기계·엔진의 마모 및 오버홀 복원(충격함수), 항공전자의 지수 감쇠 및 진부화(스텝 함수) 모델을 설계하였다. 또한, 형상 유사도(SI)를 활용한 손상차손 보정 모델을 제안하여 기존 내용연수 기반 정률법보다 정밀한 가치 산출이 가능함을 확인하였다. 본 연구는 시제 자산 관리의 합리적 의사결정을 지원하는 방법론을 제시하나, 군사보안 상 시뮬레이션 데이터를 활용한 분석이라는 한계를 지닌다.

[ABSTRACT]

As a System of Systems (SoS) where physical deterioration and technological obsolescence are intertwined during the R&D stage, prototype aircraft pose significant challenges for accurately estimating substantial residual value through conventional appraisal methods. This study developed system-specific residual value evaluation models using the U.S. Department of Defense Weapon System Integrity Guide (WSIG) and four major integrity programs (ASIP, ENSIP, MECSIP, and AVIP) as the engineering foundation. Specifically, the research designed models incorporating irreversible linear reduction for structures, wear and overhaul restoration (impulse functions) for mechanical and engine systems, and exponential decay alongside obsolescence (step functions) for avionics. Furthermore, by proposing an impairment adjustment model based on the Structural Index (SI), this study confirmed that a more precise valuation is possible compared to the conventional declining balance method based on regulatory useful life. While this methodology supports rational decision-making for prototype asset management, it is limited by the use of simulated data due to military security constraints.

Key Words : 시제 항공기(Prototype Aircraft), 잔존 자산가치(Residual Asset Value), 무기체계 건전성 프로그램(Weapon System Integrity Program), 손상차손(Impairment Loss), 경제적 감가상각(Economic Depreciation), 시제품(Prototype)

1. 서 론

최근 방위산업에 대한 관심이 높아지면서, 연구개발 성과를 기반으로 수출시장에 진입하려는 노력이 범정부적으로 추진되고 있다. 무기체계의 특수성에 따라 수출 대상 국가의 요구사항을 추가로 반영해야 하는 필요성이 증가하고 있다. 이에 따라 연구 개발 산출물인 시제품, 특히 전투기와 같은 항공기 시제품의 활용성이 높아지고 있으며, 고도의 첨단 기술이 집약된 시제 항공기는 중요한 전략적 가치를 지니고 있다. 그러나 시제 항공기 관리에 관한 연구와 제도적 기반은 여전히 부족한 실정이다. ^[1]

1) 경상국립대학교 & 방위사업청
(Gyeongsang National University(GNU) & Defense Acquisition Program Administration (DAPA), Korea)

* Corresponding author, E-mail: smyu@gnu.ac.kr
Copyright © The Korean Institute of Defense Technology
Received : March 13, 2026 Revised : March 30, 2026
Accepted : March 30, 2026

연구개발 종료 후 발생하는 시제 자산은 본질적 중요성과 잠재적 활용 가능성에도 불구하고, 제도적 한계와 가치 인식 부족으로 인해 단순한 연구 부산물로 취급되고 있다. 또한, 이를 객관적이고 체계적으로 평가할 수 있는 표준화된 방법론은 아직 정립되지 않았다. 기존 감정평가 실무기준 및 관련 규정은 주로 민간 상용 항공기를 대상으로 개발되었기 때문에, 군용 항공기 특유의 계통별 수명 주기 차이와 성능 개량 중심 운용 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.

선행 연구에서 Hölzel^[2]은 예지 및 건전성 관리(Prognostics and Health Management, PHM) 시스템 기반 생애주기 비용과 편익 분석이 수행되었으나, 외국 사례의 민간 단거리 항공기에 국한되어 군용 시제품의 특수성과 복잡성을 포괄적으로 다루지 못했다. 또한 류지훈^[1]은 무기체계 시제품 관리 및 활용 개선 연구에서 관리 프레임워크의 필요성은 강조하고 활용 방안을 제안 하였으나, 잔존 가치를 정량적으로 산출할 수 있는 구체적 기법과 같은 구체적인 방안을 다루지는 않았다.

시제 항공기는 연구개발 기간 동안 물리적 노후화와 기술적 진부화가 동시에 진행되며, 특정 구성품의 결함이나 성능 저하가 전체 체계의 가치와 운용 가능성을 제한하는 복합체계(System of Systems)적 특성을 지닌다. 명확하고 신뢰할 수 있는 가치 평가 체계가 부재한 상황은 국방 자산 관리의 효율적 의사결정을 저해하고, 불필요한 관리 부담과 자원 배분 비효율을 초래하고 있다.

본 연구는 미국 국방부의 무기체계 건전성 가이드(Weapon Systems Integrity Guide, WSIG)^[3] 및 구조(Aircraft Structural Integrity Program, ASIP)^[4], 엔진(Engine Structural Integrity Program, ENSIP)^[5], 기계(Mechanical Equipment and Subsystems Integrity Program, MECSIP)^[6], 전자(Avionics Integrity Program, AVIP)^[7] 등 계통별 건전성 프로그램에서 제시하는 기술 지표와 평가 방법론을 이론적 기반으로 삼아, 시제 항공기의 잔존 자산가치를 객관적이고 체계적으로 산정할 수 있는 통합 평가 모델을 제시한다.

1.1 연구의 목적

연구에서는 시제 항공기라는 특수 자산의 가치 평가를 위한 공학적·경제적 배경을 고찰하고, 기존 평가 체계의 한계를 극복하기 위한 새로운 모델의 필요성을 연구 목적으로 한다. 국방 시제 자산의 특수성과 기존 평가 모델의 한계는 다음과 같다.

1) 시제 항공기의 특수성

군용 항공기는 고도의 기술집약적 특성을 내포한 국방 자산으로서, 일반 유형자산과는 구조적·운용적 측면에서 본질적 궤를 달리한다. 특히 국가 안보 및 군사 기밀과 직결된 자산 특성상 시장 내 자유로운 거래가 제한되므로, 객관적인 거래 사례를 확보하는 데 구조적 한계가 존재한다. 군용 항공기는 엄격한 보안 체계 하에서 운용 주체와 임무 목적에 따라 자산의 소모 양상이 상이하게 나타나며, 이는 민간 항공기나 일반 기계장치에 적용되는 보편적 평가 기준을 준용하기 어렵게 만드는 원인이 된다. 아울러 군용 항공기는 단일 기능을 수행하는 독립 자산이 아니라 기체 구조(Structure), 엔진(Engine), 기계류(Mechanical), 전자류(Avionics) 등 다수의 계통이 유기적으로 결합된 복합 시스템(System of Systems)이다. 이들 각 계통은 운용 특성,

수명 개념, 정비 방식, 교체 및 정비 주기, 기술진부화 및 성능 개량 주기가 상이한 특성을 보인다. 특히, 시제 항공기는 연구 개발 기간이 장기간 소요됨에 따라 연구개발 과정 중 노후화와 기술 진부화가 동시에 진행되는 복합적인 가치 감쇄 특성을 보인다.

2) 기존 감정평가 방법의 제한성

감정평가의 기본 3방식은 원가방식(비용성), 비교방식(시장성), 수익방식(수익성)으로 구분된다. 「감정평가에 관한 규칙」^[8] 제20조 및 실무기준^[9]에 따르면 항공기 평가는 원가법을 주된 방법으로 설정하고 있다. 그러나 군용 시제 항공기는 국가 안보와 직결된 고도의 기술집약적 자산으로서 일반적인 유형자산과는 다른 특성으로 인해 다음과 같은 제약사항이 존재한다.

첫째, 비교방식(거래사례비교법)은 대상 물건과 유사한 물건의 거래 사례를 통해 가치를 산정한다. 하지만 군용 항공기는 국가 보안 및 기밀성으로 인해 자유로운 시장 거래가 제한되며, 이로 인해 객관적인 거래 사례를 확보하는 데 구조적 한계가 존재한다.

둘째, 수익방식(수익환원법)은 장래 기대되는 순수익이나 현금 흐름을 환원 또는 할인하여 가치를 산정한다. 시제기는 연구개발 단계의 자산으로 미래 현금흐름을 추정하기 어렵고, 군수 자산 특성상 경제적 수익보다는 공익적 가치와 전력 증강 기여도가 우선되므로 수익성 원리를 직접 적용하기 곤란하다.

셋째, 원가방식(원가법)은 제조달원가에서 감가수정을 거쳐 가치를 산정하며, 항공기 평가의 표준으로 활용된다. 그러나 현행 기준은 단일한 경제적 내용연수를 전제로 정률법을 적용하는 경우가 많아, 기체 구조, 엔진, 기계, 전자 계통이 유기적으로 결합된 '복합 시스템(System of Systems)'인 시제기의 특성을 반영하지 못한다. 특히 장기 연구개발 과정에서 물리적 노후화와 기술적 진부화가 동시에 진행되며, 정비 활동을 통한 가치 복원이 계통별로 상이하게 나타나는 점을 기존의 획일적 감가 방식으로는 설명하기 어렵다.

이에 따라 기존의 감정평가 방법론은 시제 항공기의 계통별 수명 차이와 기술적 가치 변동을 정밀하게 반영하는 데 한계가 있다. 따라서 무기체계 건전성 프로그램 데이터와 계통별 가치 감쇄 특성을 수리적으로 결합한 새로운 평가 모델이 필요하다.

본 연구의 핵심 목적은 시제 항공기의 합리적인 자산가치 평가 기준을 수립하는 데 있다. 시제 항공기는 기체구조, 엔진, 기계류, 항공전자류와 같이 다양한 기능 계통으로 구성되어 있으므로, 자산 가치를 객관화하기 위해서는 기능적·운용적 특성에 따른 계층적 가치 분리 가능성을 검토해야 한다. 이를 통해 시제 항공기를 구성하는 요소의 가치 기여도를 명확히 파악하고 평가의 합리성을 제고하고자 한다. 본 연구는 자산의 특성인 계통별 특성을 미국 국방부 군사규격 기준을 기반한 차등적 평가 구조를 제안하고자 한다. 이러한 접근은 군용 시제 항공기 자산의 운용 현실을 충실히 반영한 가치 평가 체계를 마련함으로써, 향후 시제기의 성능 개량이나 재활용, 도태 시기 결정 등 국방 자산 관리의 효율적 의사결정을 지원하는 기초 모델을 제공하는 데 목적이 있다.

2. 본론

본문에서 연구의 방법으로 문헌연구를 통해 시제 항공기를 구성하는 구성 요소별 계통의 특성에 따른 잔존 자산가치를 모델링하는 방법에 대해서 검토한다. 이를 기반으로 체계인 시제 항공기의 잔여 자산가치를 모델링하는 방법을 기본 모델과 보정 모델로 차등화하는 방법을 제시한다.

2.1 문헌 연구를 통한 수식 모델링

군용 항공기는 고도의 기술집약적 특성을 내포한 복합 체계(System of Systems)로서, 그 개발 및 획득 과정은 표준화된 작업분할구조(WBS)를 기반으로 수행된다.

MIL-STD-881E^[10]는 국방 군수품에 대한 작업분할구조(WBS) 표준 지침을 제공하며, 부록 A를 통해 항공기 체계의 계층적 구조를 정의하고 있다. 이 표준에 따라 항공기 체계는 기체(Airframe), 추진(Propulsion), 기체 하위계통(Vehicle Subsystems), 항공 전자(Avionics) 등의 주요 요소로 세분화된다. 이러한 기능적 분류는 본 논문의 관심 주제에 맞춰 구분하되 그림 1.의 무기체계 건전성 가이드인 MIL-HDBK-515(WSIG)의 분류체계를 채택해 활용한다. MIL-HDBK-515는 시스템 엔지니어링 관점에서 개별 건전성 프로그램을 통합하는 역할을 수행하며, 항공기 구성 요소를 기술적·운용적 수명 특성에 따라 구조(ASIP), 엔진(ENSIP), 기계(MECSIP), 항공전자류(AVIP)의 4가지 유형으로 범주화한다. 시제 항공기의 잔존 가치는 구성하는 4가지 분류체계를 통해 그 특성을 그룹화해 반영한다.

WSIG (Weapon Systems Integrity Guide)

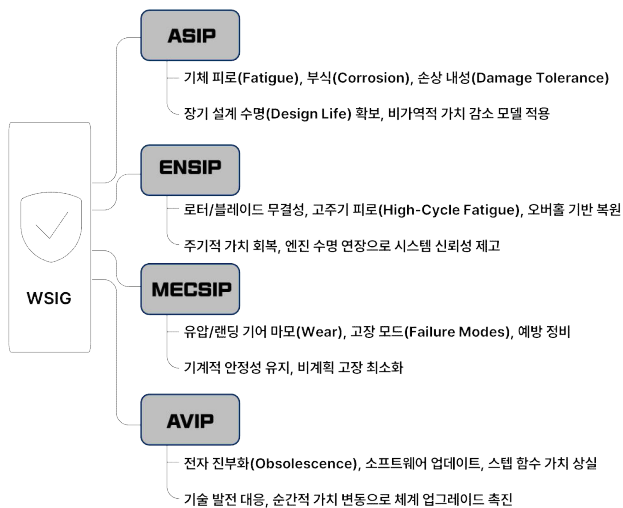


그림 1. 무기체계건전성가이드 소개

Fig. 1. Introduction of Weapon Systems Integrity Guide

기체 구조는 반복 하중에 따른 피로 누적에 의해 가치가 선형적으로 감소하는 특성을 가지고 있다. 전자류는 구성 소재, 부재, 부품의 교환을 통해 원래의 수명을 회복할 수 있어 교환이 지속된다는 전제 하에서는 무한 수명에 가깝게 된다. 다만 현실적으로 소재, 부재, 부품은 단종과 같은 기술 진부화를 통해 더 이상 공급되지 못하면 기능을 구현하지 못해 그 가치가 급격히

하락하는 특성을 보인다. 기계류는 움직이는 부위를 가지고 있어 기본적으로는 구조와 같은 마모적 특성을 가지고 있으나, 오버홀(Overhaul)과 같은 정비 활동을 통해 가치가 복원될 수 있는 특성을 가지고 있다. 엔진류는 구조 같은 부위와 기계류 같은 회전하는 움직이는 부위를 가지고 있으며, 제어는 전자류의 특성을 가지고 있어 복합적이나 마모 특성을 가지고 있으나, 수명에 지배적인 사항은 마모적 특성이다. 다만, 기계류와 같이 오버홀(Overhaul)과 같은 정비 활동을 통해 가치가 복원될 수 있는 특성을 가지고 있다. 이에 대한 세부적인 특성을 수학적으로 모델링하는 방법은 각 계통별 특성을 정의하고 있는 미국 국방부의 무기체계 건전성 가이드를 통해 제시한다.

2.1.1 MIL-STD-1530D 기반 잔존 자산가치 산출

MIL-STD-1530D(Aircraft Structural Integrity Program, ASIP)는 항공기 구조의 안전성, 내구성, 지원성을 보장하며, 생애주기 전반에 걸친 위험 관리와 비용 최적화를 목적으로 한다. ASIP를 수행하는 일련의 과정을 통해 그 특성을 파악하고, 시제 항공기 기체 구조의 노후화 특성을 통해 잔존 자산가치를 측정할 수 있는 수식을 도출할 수 있다.

MIL-STD-1530D에 따라 기체 구조의 특성을 분석하는 과정은 다음과 같다. 첫째, Task I (Design Information)에서 설계 수명(Total Design Life, TDL)을 정의하며, 피로(Fatigue), 부식(Corrosion), 손상 내성(Damage Tolerance)을 고려한다. 구조는 비가역적 감소 특성을 가지며, 누적 비행 시간(Accumulated Flight Hours, AFH)이 주요 변수다. 둘째, Task II (Design Analysis and Development Testing)에서 구조 분석을 통해 TDL을 추정한다. 셋째, Task III (Full-Scale Testing)에서 실제 시험으로 구조 무결성을 검증한다. 넷째, Task IV (Certification & Force Management Development)에서 인증과 유지 계획을 수립한다. 다섯째, Task V (Force Management Execution)에서 운영 데이터로 지속 관리한다. 즉, 기체 구조는 노후화 특성을 가지고 있으므로 전체 수명 대비 사용량을 고려한 잔존 수명을 통해 최초 획득 가치(Acquisition Value, AV) 대비 연구개발 종료 시점 t에서의 잔존 자산 가치(Residual Asset Value Structural, $V_{R,S}$)를 산출할 수 있다. 이를 기반으로 그림 2.와 같은 식을 도출할 수 있다.

$$V_{R,S}(t) = V_{0,S} \times \left(1 - \frac{\text{Accumulated Flight Hours}}{\text{Total Design Life}} \right)$$

그림 2. MIL-STD-1530D 기반 기체 잔존 자산가치 계산식

Fig. 2. MIL-STD-1530D-Based Structure Residual Asset Value Calculation

기체 구조의 가치 감소는 총 수명시간 대비 사용량인 비행 시간에 비례해 연구개발 종료 시점 t를 기준으로 잔존 자산가치를 산출한다. 예를 들어 그림3과 같이 30년 수명을 가진 경우 일정한 사용률에 따른 잔존 자산가치 그래프를 얻을 수 있다. 이는 공학적으로는 MIL-STD-1530D의 Palmgren-Miner 법칙에 따라 손상을 전체수명에 대한 소모비율로 계산하는 데 기인한다. 하중에 의한 균열은 천천히 자라다 일정수준 이상에서

급격히 커지는 비선형적 특성을 보이지만, 항공기 설계 시에는 이 법칙을 기반으로 다양한 원인에 의한 손상을 각각의 분수로 선형적으로 합산하여 평가하고 설계적 여유를 가지고 관리한다. 이를 재무적으로 사용할 때 일반유형자산과 사회기반시설 회계처리지침^[11]에 따라 정액법으로 선형으로 계산하는 것을 고려하였다.

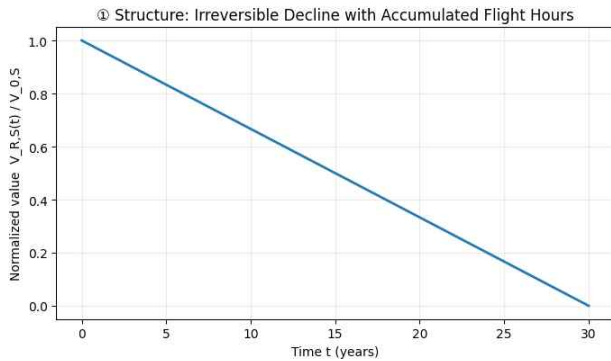


그림 3. MIL-STD-1530D 기반 잔존 자산가치 예시 그래프

Fig. 3. MIL-STD-1530D-Based Residual Asset Value Example Graph

여기에 추가적으로 가혹도와 같이 설계 수명대비 수명의 소모율을 높일 수 있는 k 상수를 추가할 수 있으며, 필요 시 그림 4.와 같이 수명 만료 후 잔존 고철 가치를 고려할 수 있다.

$$V_{R,S}(t) = V_{0,S} \times \left(1 - \frac{k \cdot H_{acc}(t)}{Total_Design_Life}\right) + ScrapValue$$

그림 4. MIL-STD-1530D 기반 가혹도 및 폐기비용 고려 기계 잔존 자산가치 계산식

Fig. 4. MIL-STD-1530D-Based Structure Residual Asset Value Calculation Formula Considering Severity and Scrap Value

2.1.2 MIL-STD-1798C 기반 잔존 자산가치 산출

MIL-STD-1798C(Mechanical Equipment and Subsystems Integrity Program, MECSIP)를 통해 항공기 기계 요소의 내구성(Durability), 안전성(Safety), 신뢰성(Reliability), 지원성(Supportability)을 보장하며, 생애주기 전반에 걸친 위험 관리(risk management)와 비용 최적화(cost optimization)를 목적으로 한다. 기계류는 움직이는 부위로 인해 구조와 유사한 마모(Wear) 특성을 가지지만, 오버홀(Overhaul)을 통해 가치 복원이 가능하다. 다만, 오버홀은 원래의 상태로 복원을 지향하지만, 100%가 아닐 수 있다. 부분 열화가 잔존할 수 있음을 고려할 수 있다. MIL-STD-1798C에 따라 기계류의 특성을 분석하는 과정은 다음과 같다. 첫째, Task I (Design Information)에서 설계 기준(design criteria)을 정의하며, 마모, 피로(fatigue), 부식(corrosion)을 주요 노후화 요인으로 식별한다. 기계류는 움직이는 부위로 인해 구조와 유사한 점진적 가치 감소를 보이지만, 오버홀을 통해 복원이 가능하다. 둘째, Task II (Design Analysis and Development Testing)에서 분석과 시험을 통해 생애주기(lifecycle) 내구성을 추정한다. 셋째, Task III (Full-Scale Testing)에서 실제 시험으로

무결성(integrity)을 검증한다. 넷째, Task IV (Certification & Force Management Development)에서 인증과 유지 계획을 수립한다. 다섯째, Task V (Force Management Execution)에서 운영 데이터로 지속 관리한다. 이러한 과정에서 기계류의 가치 감소는 시간 t에 비례하는 δ (마모율, 노화율, 할인율)로 모델링되며, 오버홀 시점 $t_{maintenance}$ 에서 가치 복원(Value Restoration)이 발생한다. 이런 기계 요소의 노후화 특성을 통해 최초 획득 가치(Acquisition Value, AV) 대비 연구개발 종료 시점 t에서의 잔존 자산 가치(Residual Asset Value Mechanical, $V_{R,M}$)를 산출할 수 있다. 이를 기반으로 그림 5.와 같은 식을 도출할 수 있다.

$$V_{R,M}(t) = V_{0,R} \times (1 - \delta \cdot t) + \sum_k Value_Restoration_k \cdot \delta(t - t_{maintenance,k})$$

그림 5. MIL-STD-1798C 기반 기계 잔존 자산가치 계산식

Fig. 5. MIL-STD-1798C-Based Mechanical Residual Asset Value Calculation

기계 요소의 가치 감소는 사용시간 대비 마모율/노화율/할인율인 δ 에 따라 누적되다가, 오버홀을 통해 복원을 지향하되 100%가 아닐 수 있음을 복원량(Value_Restoration)으로 반영한다. 오버홀 정비가 이루어지는 순간에만 급격한 가치 변화를 표현하기 위한 충격함수(Impulse Function) 형태로 산출될 수 있다. 예를 들어 연간 10%로 노후화 되고, 오버홀의 복원률이 0.9인 경우는 그림 6.과 같은 잔존 자산가치 그래프를 얻을 수 있다. 다만, 여기에 추가적으로 단종과 같은 기술진부화와 더불어 연식 증가에 따른 경제적 진부화를 고려할 수 있으나, 본 연구에서는 물리적 노후화에 따른 가치변화를 중점으로 설계되었다.

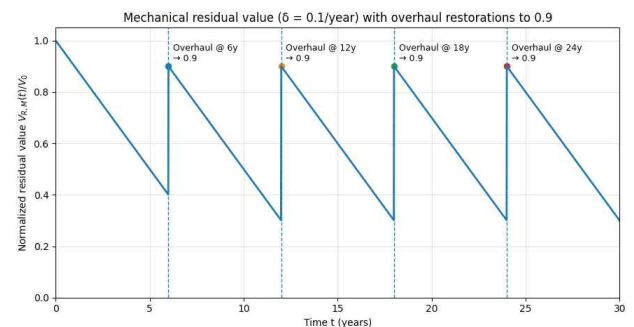


그림 6. MIL-STD-1798C 기반 기계 잔존 자산가치 예시 그래프

Fig. 6. MIL-STD-1798C-Based Mechanical Residual Asset Value Example Graph

2.1.3 MIL-HDBK-1783B 기반 잔존 자산가치 산출

MIL-HDBK-1783B (Engine Structural Integrity Program, ENSIP)는 엔진의 구조 무결성(Structural integrity)을 보장하며, 생애주기 전반에 걸친 위험 관리(Risk management)와 비용 최적화(Cost optimization)를 목적으로 한다. 엔진은 구조적 요소(예: casing)와 기계적 회전 부위(예: turbine blades)를 복합적으로 가지며, 제어 측면에서 전자적 특성을 보유하나, 마모(wear)가 지배적이다. 그러나 오버홀(overhaul)을

통해 가치 복원이 가능하여 기계류와 유사한 특성을 보인다. MIL-HDBK-1783B에 따라 엔진의 특성을 분석하는 과정은 다음과 같다. 첫째, Task I (Design Information)에서 설계 기준(design criteria)을 정의하며, 고주기 피로(high-cycle fatigue), 열응력(thermal stress), 마모를 주요 노후화 요인으로 식별한다. 엔진은 회전 부위로 인한 마모가 지배적이며, 구조적 무결성과 전자 제어의 복잡성을 고려한다. 둘째, Task II (Design Analysis and Development Testing)에서 분석과 시험을 통해 생애주기(lifecycle) 내구성을 추정한다. 셋째, Task III (Full-Scale Testing)에서 실제 시험으로 무결성(integrity)을 검증한다. 넷째, Task IV (Certification & Force Management Development)에서 인증과 유지 계획을 수립한다. 다섯째, Task V (Force Management Execution)에서 운영 데이터로 지속 관리한다. 이러한 과정에서 엔진의 가치 감소는 시간 t 에 비례하는 δ (마모율/노화율/할인율)로 모델링되며, 오버홀 시점 $t_{\text{maintenance}}$ 에서 가치 복원(Value Restoration)이 발생한다. 이런 엔진의 노후화 특성을 통해 최초 획득 가치(Acquisition Value, AV) 대비 연구개발 종료 시점 t 에서의 잔존 자산 가치(Residual Asset Value Engine, $V_{R,E}$)를 산출할 수 있다. 이를 기반으로 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$V_{R,E}(t) = V_{0,E} \times (1 - \delta \cdot t) + \sum_k \text{Value_Restoration}_k \cdot \delta(t - t_{\text{maintenance},k})$$

그림 7. MIL-HDBK-1783B 기반 엔진 잔존 자산가치 계산식

Fig. 7. MIL-HDBK-1783B-Based Engine Residual Asset Value Calculation

엔진의 가치 감소는 사용시간 대비 δ (마모율/노화율/할인율)에 따라 누적되다가, 오버홀을 통해 복원을 지향하되 100%가 아닐 수 있음을 복원량(Value_Restoration)으로 반영하되, 오버홀 정비가 이루어지는 순간에만 급격한 가치 변화를 표현하기 위한 충격함수(Impulse Function) 형태로 산출될 수 있다. 예를 들어 시간당 0.1%로 노후화 되고, 500시간마다 수행하는 오버홀의 복원률이 0.9인 경우는 다음과 같은 잔존 자산가치 그래프를 얻을 수 있다. 여기에 추가적으로 단종과 같은 기술진부화를 통한 가치의 급격한 하락을 고려할 수도 있다.

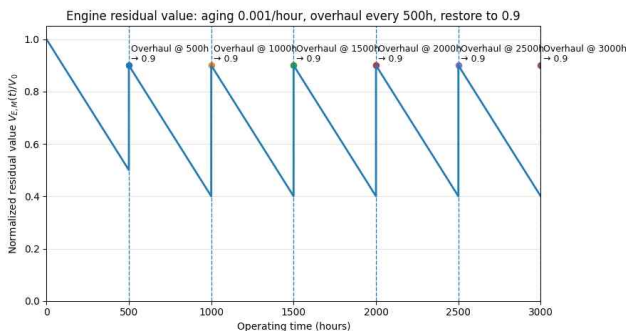


그림 8. MIL-HDBK-1783B 기반 엔진 잔존 자산가치 예시 그래프
Fig. 8. MIL-HDBK-1783B-Based Engine Residual Asset Value Example Graph

2.1.4 MIL-STD-1796A 기반 잔존 자산가치 산출

MIL-STD-1796A(Avionics Integrity Program, AVIP)는 항공전자(전자) 요소의 신뢰성(Reliability), 내구성(Durability), 지원성(Supportability)을 보장하며, 생애주기 전반에 걸친 위험 관리(Risk management)를 목적으로 한다. 항공전자(전자)는 구성 소재, 부재, 부품의 교환을 통해 원래 수명을 회복할 수 있어, 지속적 교환을 전제하면 무한 수명에 가까운 특성을 보인다. 그러나 현실적으로 단종과 같은 기술 진부화(Obsolescence)로 공급이 중단되면 기능 구현이 불가능해 가치가 급락한다. MIL-STD-1796A에 따라 항공전자의 특성을 분석하는 과정은 다음과 같다. 첫째, Task I (Design Information)에서 설계 기준(design criteria)을 정의하며, 기술 진부화와 교환 가능성을 주요 노후화 요인으로 식별한다. 항공전자는 전자적 제어 특성을 가지며, 부품 교환으로 수명 회복이 가능하나, 진부화로 가치 상실이 순간적이다. 둘째, Task II (Design Analysis and Development Testing)에서 분석과 시험을 통해 생애주기(lifecycle) 신뢰성을 추정한다. 셋째, Task III (Full-Scale Testing)에서 실제 시험으로 무결성(integrity)을 검증한다. 넷째, Task IV (Certification & Force Management Development)에서 인증과 유지 계획을 수립한다. 다섯째, Task V (Force Management Execution)에서 운영 데이터로 지속 관리한다. 이러한 과정에서 전자 요소는 교환정비를 통한 기능 회복 가능성 때문에 구조/기계 처럼 “물리적 수명=가치수명”이 되지 않으며, 가치수명은 오히려 부품 공급 가능성(기술진부화)에 의해 지배된다. 따라서 잔존 자산 가치 운영유지·정비부담 누적에 따른 완만한 지수감쇠와 핵심부품 단종/미확보에 따른 불연속적 가치 단절의 곱으로 표현될 수 있다. 단종 등으로 지속적인 교환정비가 수행되지 않은 경우는 완전 가치가 0이 아닌 부품 회수, 시험용 전환, 제한적 운용(비임무용) 등에서 발생 가능한 최소 잔존 자산 가치로 정의할 수 있다. 이런 전자 요소의 특성을 통해 최초 획득 가치(Acquisition Value, AV) 대비 연구개발 종료 시점 t 에서의 잔존 자산 가치(Residual Asset Value Avionics, $V_{R,A}$)를 산출할 수 있다. 이를 기반으로 그림 9와 같은 식을 도출할 수 있다.

$$V_{R,A}(t) = V_{0,A} \times e^{-\delta_p t} \times \begin{cases} 1 & \text{if } t < t_{\text{obsolescence}} \\ \epsilon & \text{if } t \geq t_{\text{obsolescence}} \end{cases}$$

그림 9. MIL-STD-1796A 기반 항공전자(전자) 잔존 자산가치 계산식

Fig. 9. MIL-STD-1796A-Based Avionics(Electronic) Residual Asset Value Calculation Formula

δ_p = 물리적 감쇠율(시험/운용데이터 기반 고장·정비부담의 유효 감쇠율로 추정할 수 있다. 예를 들어 MTBF 추세, BIT false alarm, 정비시간/가동률 지표 등).

ϵ = 잔존 자산가치(정책, 운용목적에 따라 설정 가능)

$t_{\text{obsolescence}}$ = 기술 진부화 시점

예를 들어 물리적 감쇠율(δ)이 0.03/year이고, 단종으로 인한

기술진부화가 10년으로 기대되고, 잔여 자산 가치(ϵ)가 0.05인 경우 다음과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 즉, 부품 교체를 통해 수명을 연장하더라도 발생하는 미세한 성능 노후화만을 반영하며 완만하게 하락하다가 기술 단종이 발생하는 순간, 가치는 비연속적(Discontinuous)으로 급락한 후 가치가 거의 사라진 상태(ϵ)를 유지한다는 것이다.

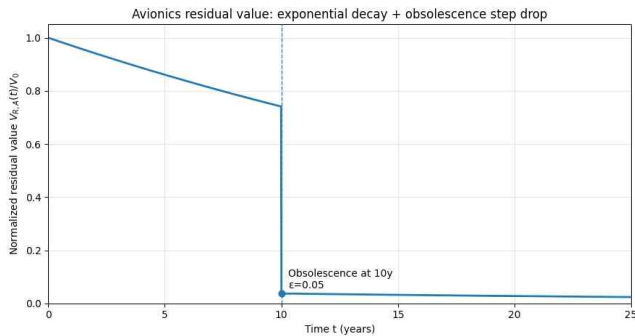


그림 10. MIL-STD-1796A 기반 항공전자(전자) 잔존 자산가치 예시 그래프

Fig. 10. MIL-STD-1796A-Based Avionics (Electronic) Residual Asset Value Example Graph

2.2 시제 항공기 잔존 자산가치 산출 기본 모델

시제 항공기는 구조(Structure), 기계(Mechanical Equipment and Subsystems), 엔진(Engine), 항공전자(전자, Avionics)의 4가지 유형으로 구성된 복합 체계이다. 각 유형은 연구개발 종료 시점 t 에서 각각의 잔존가치 $V_{R,S}(t)$, $V_{R,M}(t)$, $V_{R,E}(t)$, $V_{R,A}(t)$ 를 가지며, 해당 유형의 구성품 개수는 N_S , N_M , N_E , N_A 이다. 시제 항공기의 잔존 자산가치(RV_{total})는 그림 11.과 같이 각 구성품별 잔존 자산가치의 개별 합의 총합으로 산출할 수 있다. 가용 데이터가 제한적이거나 개략 가치평가 단계를 수행할 때 적용 가능한 기본 모델은 각 유형별 잔존가치를 해당 유형의 구성품 수만큼 곱한 후 합산하는 형태로 표현될 수 있다.

$$RV_{total}(t) = \sum_{j=1}^{N_S} V_{R,S,j}(t) + \sum_{k=1}^{N_M} V_{R,M,k}(t) + \sum_{l=1}^{N_E} V_{R,E,l}(t) + \sum_{m=1}^{N_A} V_{R,A,m}(t)$$

(또는)

$$RV_{total}(t) = \sum_{i \in \{S, M, E, A\}} \left(\sum_{p=1}^{N_i} V_{R,i,p}(t) \right)$$

(where)

$V_{R,i,p}(t)$: 계통 i 에 속한 p 번째 구성품의 시점 t 에서의 잔존 가치

N_S, N_M, N_E, N_A : 각각 구조(S), 기계(M), 엔진(E), 항공전자(A) 계통에 포함된 세부 구성품의 총 개수

그림 11. 시제 항공기 잔존 자산가치 산출 기본 모델

Fig. 11. Basic Model for Calculating Residual Asset Value of Prototype Aircraft

2.3 시제 항공기 특성을 고려한 잔존 자산가치 산출 보정 모델

시제 항공기의 잔존 자산가치인 장부가액을 연구개발 종료 시 노후화만을 고려한 잔존 자산가치 산출 기본 모델로 산정할 때 불합리한 요소가 존재한다. 시제 항공기는 연구개발 중 활용되는 특성에 따라 다음과 같은 특수성이 존재한다.

- 1) 시제 항공기는 연구개발 목적의 형상으로 연구개발 중 시험착오 및 시험목적의 형상으로 인해 양산 항공기와 형상이 상이함
- 2) 신규 조달계약에 의한 양산 항공기와 달리 장기간의 연구개발 계약에 의해 조달되므로 단종으로 인한 기술진부화가 양산 항공기 대비 빠름
- 3) 양산 항공기와 달리 구성품의 후속군수지원 형태와 수준이 달라 운영유지비용이 양산 항공기 보다 높음
- 4) 예상하지 못한 결함을 수리형상을 임시적으로 조치하거나 다양한 설계방안 적용으로 향후 활용되지 않을 형상을 영구적으로 적용해 가치 하락 요인 존재

이에 따라 보다 정교한 시제 항공기의 잔존 자산가치를 산출하기 위해서는 추가적인 요소를 손상차손(Impairment Loss) 형태로 보정이 필요하다. 일반적인 장부가액은 “잔존 자산가치 = 취득원가-누적 감가상각-누적손상차손” 형태로 산출할 수 있다. 손상차손은 자산의 회수가능액이 장부가 보다 낮아지는 경우 인식하는 손실로 시제 항공기의 특성을 반영할 필요가 있다.

시제 항공기의 실제 장부가액이 낮게 인식해야 하는 핵심 요인은 시제와 양산 항공기 간의 형상 차이에서 기인한다. 형상 차이에 의해서 기술진부화에 대한 민감도, 운영유지 비용의 영향성, 일부 기능/성능의 차이가 유발되기 때문이다. 이에 따라 각 구성품 형상의 유사도를 정량화하여 손상차손 요소로 반영할 필요가 있다. 시제 항공기와 양산항공기 간 형상 유사도 지표(Similarity Index, SI)는 다음과 같은 요소를 통해 수식(1)과 같이 정량화할 수 있다.

- 1) SI_C : 부품 공통도(공통 품목수/전체 품목수)
- 2) SI_M : 정비도 일치성(교체 장작 정비도 비교, 시제/양산 정비도)
- 3) SI_O : 기술진부화 노출도(단종 발생여부 발생1, 미발생0)
- 4) SI_I : 인터페이스 대체 가능성(대체가능 1, 불가능0)
- 5) SI_E : 임시조치 또는 기능/성능 불필요 형상 여부(존재1, 미존재0)

$$SI_i = w_1 \times SI_C + w_2 \times SI_M + w_3 \times SI_O + w_4 \times SI_I + w_5 \times SI_E \quad (1)$$

where

$$0 \leq SI_i \leq 1$$

가중치: w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 (프로젝트 특성에 따라 부여)

시제 항공기의 형상 유사도 지표를 고려한 잔존 자산가치 산출 보정 모델은 그림 12.와 같이 표현될 수 있다.

$$RV_{total}(t) = \sum_{i \in \{S, M, E, A\}} \left(\sum_{p=1}^{N_i} V_{R,i,p}(t) \times SI_{i,p} \right)$$

그림 12. 잔존 자산가치 산출 보정 모델

Fig. 12. Corrected Model for Calculating Residual Asset Value

2.4 기존 감정평가 방법과 비교 적합성 검증

시제 항공기와 같은 항공기에 관한 감정평가는 「감정평가에 관한 규칙」^[8] 제20조 및 실무기준^[9]에 따라 원가법과 정률법으로 감가수정하여 산정한다. 또한, 감가 수정을 할 때에는 경제적 내용연수를 기준으로 적용하는데, 유형 고정자산 내용연수표^[12]를 적용한다. 조진형·오현승·이세재(2023)^[13]의 지적과 같이 현행 내용연수 산정에 대한 부족한 부분과 경제적 내용연수의 정확도를 높이기 위해 Hulten-Wyckoff식 경제적 감가상각 추정과 같이 중고 시장가를 고려한 경제적 내용연수 산정이 필요하지만, 현재 제도적으로 허용된 기존의 감정평가 방법과 본 논문에서 제시한 방법과 비교를 통해 그 적합성을 검증한다.

1) 기존 감정평가 방법 적용

한국감정원(2013)^[12]의 「유형고정자산 내용연수표」와 「감정평가 실무기준」^[9](항공기 감정평가)에서는 항공기를 이동성 유형자산으로 분류하고, 원가법(Cost Approach)을 기본으로 하여 내용연수를 12년으로 규정하고 있다. 이에 따라 감가상각은 정률법(Declining Balance Method)을 적용하도록 하고 있다. 정률법은 매년 일정한 감가상각률(r)을 잔존 장부가액에 곱하여 감가상각비를 산정하는 방법으로, 초기 가치 하락이 크고 후반으로 갈수록 감가상각액이 감소하는 특징을 가진다. 항공기의 경우 잔존을 10%를 기준으로 할 때 감가상각률(r)은 $(1-r)^{12}$ 로 계산하여 약 0.192이다.(매년 19.2% 하락) 이에 따라 t 년 경과 후 잔존 자산가치는 수식(2)와 같이 지수함수 형태로 표현된다.

$$RV(t) = C_0 \times (1-r)^t = C_0 \times (0.808)^t \quad (2)$$

where

C_0 : 취득원가 (Acquisition Cost)

r : 정률 감가상각률 ($\approx 19.2\%$)

t : 경과 연수 ($0 \leq t \leq 12$)

2) 시제 항공기 잔존 자산가치 산출 기본/보정 모델 적용

기본 모델과 기존 감정평가방법을 비교하기 위해 다음과 같은 시나리오와 가정사항을 기반으로 비교한다. 방법론의 비교를 위해 체계의 특성에 영향을 주는 요소를 최소화해 보수적으로 비교했다.

<시나리오와 가정사항>

- 항공기의 설계 수명은 3,000시간이고, 연구개발은 10년 동안 2,000시간 운영되었다.
- 기체, 기계, 엔진, 항공전자도 동일한 2,000시간 운영되었다.
- 기체, 기계, 엔진, 항공전자 구성품은 각 10개 품목으로 구성되었다.
- 기체, 기계, 엔진, 항공전자 구성품의 초기 획득 가치는 모두 동일하다.
- 모든 구성품은 오버홀을 수행하지 않았다.
- 항공전자 구성품인 감가율은 미국의 Hulten-Wyckoff 방법의 컴퓨터·전자장비 기준 0.3을 적용한다.
- 시제 항공기와 양산 항공기의 유사도는 0.8이다.

분석비교 결과 그림 13.과 표 1.에서 보는 바와 같이 기존 단순 내용연수에 의한 정률법 대비 본 논문의 기본모델은 2.17배, 보정모델은 1.73배 높은 잔존 자산가치가 산출되었다. 기존 정률법은 항공기 전체를 단일 자산으로 보고, 시간에 따라 지수감가하므로 운용 시간, 사용 강도들을 고려하지 못하고, 항공전자와 같은 기술진부화 등의 특성을 반영하는데 구조적으로 어렵다. 이로 인해 자산의 재활용이나 매각 시 불합리한 근거가 될 수 있다. 보정모델은 비교를 위해 단순한 형상 유사도 지표를 사용하였으나, 형상 차이에 의한 손상차손을 도입하여 양산형 대비 열위를 정량적으로 보정해 보았다는 데 의의가 있으며, 항공전자의 특성을 고려해 개발적 요소를 분리하여 적용함으로써 보다 합리적 가치를 도출할 수 있는 가능성을 열었다. 다만, 본 모델에서는 물리적 상태에 대한 가치 변화를 중점으로 하고 있어 시간의 흐름과 물가 상승 등에 따른 시장의 경제적 가치 하락은 포함하고 있지 않다.

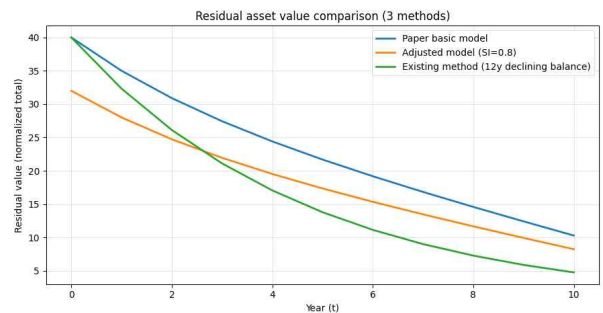


그림 13. 기본 모델/보정 모델과 기존 감정평가 방법 비교 그래프
Fig. 13. Comparison Graph of Basic Model/Adjusted Model and Conventional Appraisal Method

표 1. 기본 모델/보정 모델과 기존 감정평가 방법 비교
Table 1. Comparison of Basic/Adjusted Model and Conventional Appraisal Method

Year (t)	Hours	Basic Model					Adj. Model	Existing Total
		RV _S	RV _M	RV _E	RV _A	RV Total		
0	0	10.00	10.00	10.00	10.00	40.00	32.00	40.00
1	200	9.33	9.33	9.33	7.00	35.00	28.00	32.32
2	400	8.67	8.67	8.67	4.90	30.90	24.72	26.11
3	600	8.00	8.00	8.00	3.43	27.43	21.94	21.10
4	800	7.33	7.33	7.33	2.40	24.40	19.52	17.05
5	1000	6.67	6.67	6.67	1.68	21.68	17.34	13.78
6	1200	6.00	6.00	6.00	1.18	19.18	15.34	11.13
7	1400	5.33	5.33	5.33	0.82	16.82	13.46	8.99
8	1600	4.67	4.67	4.67	0.58	14.58	11.66	7.27
9	1800	4.00	4.00	4.00	0.40	12.40	9.92	5.87
10	2000	3.33	3.33	3.33	0.28	10.28	8.23	4.74
Comparison						2.17	1.73	1

4. 결 론

본 연구는 복합체계(System of Systems) 자산이자 군사적, 전략적으로 중요한 군용 시제 항공기의 적절한 잔존 가치 평가 방법을 연구하고자 하였다. 이를 위해 미국 국방부의 무기체계 건전성 가이드(WSIG) 및 계통별 건전성 프로그램(ASIP/MECSIP/ENSIP/AVIP)에서 제시하는 수명·정비·진부화 개념을

잔존 자산가치 평가에 이식함으로써, 시제 항공기의 잔존 자산 가치를 계통별로 분해·모형화한 후 체계 수준에서 재통합하는 평가 모델을 제안하였다. 기체 구조는 누적 비행시간 기반의 비가역적 가치 감소, 기계·엔진은 마모 기반 감소와 오버홀에 의한 가치 복원(충격함수), 항공전자는 물리적 감쇠와 기술진부화에 의한 불연속적 가치 단절이라는 이질적 가치 소멸 메커니즘을 반영하여, 기존 원가법 중심의 획일적 감가 체계가 포착하지 못하는 시제기 특성을 수리적으로 설명할 수 있도록 하였다. 또한 본 연구는 가용 데이터 수준을 고려하여 기본모델(계통별 잔존가치의 합산)과, 시제기-양산기 형상 차이에 따른 회수가능액 저하를 손상차손 관점에서 반영한 보정모델(Similarity Index 기반 가치 조정)을 제시하였다. 이는 시제기의 형상 차이가 기술진부화 민감도, 운영유지 부담, 기능/성능 제약으로 연결되어 장부가액이 과대 인식될 수 있다는 문제의식을 정량 변수로 구조화한 점에서 시제기 특수성을 회계적 조정 논리와 공학적 근거 사이에서 연결하는 방법론을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 모델을 비교 검증해 보수적 가정에도 기존 감정평가의 단일 내용연수(12년)-정률법 대비 본 연구의 기본 모델이 2.17배, 보정모델이 1.73배 높은 잔존 자산가치를 산출함을 확인하였다. 이는 기존 방식이 시간 경과 중심의 지수감가로 인해 운용시간, 사용강도, 항공전자 진부화 민감성, 계통별 수명 차를 구조적으로 반영하기 어렵다는 한계를 실증적으로 뒷받침하며, 본 모델이 시제 항공기 자산의 재활용·회환·도태 의사결정에서 설명력 있는 근거를 제공할 수 있음을 시사한다. 더욱이 오버홀을 통한 가치 회복을 반영하는 경우 기존 모델보다 높은 잔존가치를 보일 수 있다. 이는 기체구조와 달리 탈부착이 가능해 다른 항공기에 장착하여 가치를 유지할 수 있는 현실적인 여건을 모델링 할 수 있는 가능성을 제시하였다.

본 연구와 같은 국방 관련 연구는 군사보안 문제로 실제 데이터 사용해 모델을 검증하는 데 제한이 있지만, 단순화된 수리적 모델을 통해 다양하게 응용, 보정할 수 있는 기초 이론을 제시했다는 부분에서 큰 의의가 있다.

다만 본 연구는 비교의 보수성을 위해 일부 변수를 단순화(오버홀 미수행, 진부화 시점의 확률적 불확실성 미반영, SI 단 일값 적용 등)하였으며, 핵심 변수의 추정에는 향후 실제 정비·고장·가동률 데이터(예: MTBF 추세, 정비시간, BIT 지표 등)와 연계하여 정교화할 필요가 있다. 또한 SI 가중치는 사업·체계 특성에 따라 달라질 수 있으므로 델파이/AHP 기반 전문가 합의 절차, 불확실성(구간·확률분포) 반영, 민감도 분석을 통해 신뢰도를 확보하는 후속 연구가 요구된다. 또한, 시간의 흐름과 물가 상승에 따른 경제적 가치하락을 반영하고, 4가지 계통별 상이한 경제적 가치 하락의 수준을 반영하며, 순현재가치(NPV)와 같은 방법을 응용하여 경제적 미래가치를 현재화하는 방안을 추가 연구를 통해 수행할 필요가 있다.

결론적으로, 본 연구는 시제 항공기 잔존가치 평가의 새로운 방법으로 건전성 프로그램 기반의 계통별 가치평가와 형상 차이 보정이라는 논리를 제시하였으며, 향후 실데이터 기반의 모수 보정과 제도 적용성 검토를 통해 국방 시제 자산의 합리적 가치평가 표준화에 기여할 수 있을 것이다.

References

- [1] Ryu, J. (2025). A study on improving the management and utilization of weapon system research and development prototypes (Doctoral dissertation, Kwangwoon University).
- [2] Hölzel, N. B., Schilling, T., & Gollnick, V. (2014). An aircraft lifecycle approach for the cost-benefit analysis of prognostics and condition-based maintenance based on discrete-event simulation. Annual Conference of the PHM Society, 6(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2014.v6i1.2441>
- [3] U.S. Department of Defense. (2007). Weapon system integrity guide (WSIG) (MIL-HDBK-515).
- [4] U.S. Department of Defense. (2016). Aircraft structural integrity program (ASIP) (MIL-STD-1530D).
- [5] U.S. Department of Defense. (2002). Engine structural integrity program (ENSIP) (MIL-HDBK-1783B).
- [6] U.S. Department of Defense. (2013). Mechanical equipment and subsystems integrity program (MIL-STD-1798C).
- [7] U.S. Department of Defense. (2011). Avionics integrity program (AVIP) (MIL-STD-1796A).
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2023). Rules on appraisal (Ordinance No. 01253). (September 14, 2023).
- [9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2023). Practical standards for appraisal (Notice No. 2023-522). (September 13, 2023).
- [10] U.S. Department of Defense. (2020). MIL-STD-881E: Work breakdown structures for defense materiel items. Department of Defense Standard Practice.
- [11] Ministry of Economy and Finance. (2023). Accounting guidelines for general property, plant, and equipment (Chapter 2). <https://www.kipf.re.kr>
- [12] Korea Appraisal Board. (2013). Useful life table (tangible fixed assets). Real Estate Research Institute, Korea Appraisal Board.
- [13] Jin-Hyung Cho, Hyun-Seung Oh, Sae-Jae Lee. (2023). Present Status and Prospect of Valuation for Tangible Fixed Asset in South Korea. Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering, 46(1), 91-104.