

SLM 및 RAG 기반 형상 정보를 활용한 항공 엔진 정비 분석체계 구축 방안 연구

A Study on the Establishment of Aircraft Engine Maintenance Analysis System Using Shape Information based on Small Language Model and Retrieval-Augmented Generation

오득현^{*1)}, 안순탁²⁾, 이유경³⁾

DeukHyun Oh^{*1)}, Suntak Ahn²⁾, Yukyung Lee³⁾

[초 록]

항공기 엔진 창정비는 노후화에 따른 예기치 않은 결함 증가로 정비 판단의 난이도가 높아지고 있다. 센서 기반 CBM+는 운용 중 상태 지표를 활용한 단기 이상 탐지에 유효하나, 군 운용에서는 센서 데이터의 창정비 단계 연계가 제한될 수 있어 분해 후 형상·치수 기반 판정 근거와의 연결 및 추적에 한계가 있다. 본 연구는 폐쇄망·자원 제약 환경을 전제로, 정형 측정데이터(치수 및 3D 형상 기반 Feature 결합 데이터)와 비정형 기술자료를 공통 식별자(부품ID/측정부위ID)와 근거ID(문서ID-장/절/항)로 연계하는 통합 DB 및 SLM/RAG 기반 ‘근거 제시형 판단 보조’ 워크플로우를 제안한다. 또한 규격판정·경향성 분석·FMEA 산출물을 Q&A/리포트 단일 채널에서 근거ID와 함께 제시하는 출력 형식과 근거 부족 시 결론 단정을 제한하는 가드레일을 가상 시나리오 예시로 정리한다.

[ABSTRACT]

Aircraft engine depot-level maintenance is increasingly difficult as aging drives unexpected defects and more complex decisions. Although sensor-based CBM+ is effective for short-term anomaly detection, in military operations the linkage of operational sensor data to the depot-level maintenance stage may be limited, constraining connection and traceability to post-disassembly geometry- and dimension-based judgment evidence. Under an air-gapped, resource-constrained setting, we propose an integrated database and an SLM/RAG-based evidence-grounded decision-support workflow that links structured measurements (dimensions and feature-level fused 3D geometry) with unstructured technical documents via shared identifiers (part ID, measurement-FeatureID) and evidence IDs (document ID with chapter/section/paragraph). We further provide hypothetical Q&A/report outputs for specification judgment, trend analysis, and FMEA, with guardrails to avoid definitive conclusions when evidence is insufficient.

Key Words : 형상 정보(Shape Information), 소형언어모델(Small Language Model), 검색 기반 생성(Retrieval-Augmented Generation), 근거추적(Evidence Traceability), 폐쇄망 운용(Closed-Network Deployment)

1. 서 론

본 연구에서는 기존 항공기 엔진 정비 체계가 갖는 구조적 제약과 최근 정비 환경 변화에 따른 한계를 살펴보고 SLM(Small Language Model)과 RAG(Retrieval-Augmented

Generation) 기반 형상 정보를 활용한 항공기 엔진 정비 분석 체계의 구성 방안을 개념적으로 정리하고 그 적용 가능성을 논의한다.

항공기 정비(Maintenance, Repair and Overhaul; MRO)는 항공기 운용의 신뢰성과 지속성을 유지하는 핵심 활동으로 사후정비에서 예방정비 중심으로 전환되어 왔으나 주기/기준 중심 운용으로 비계획·다빈도 결함 반영에 한계가 있어 비용 증가와 비가용 시간 확대 등이 지적된다.

이러한 배경에서 최근에는 예지정비(Predictive Maintenance)로의 전환이 주요 흐름으로 논의되고 있으며 특히 고가·고위험 자산인 군용 항공기 엔진의 경우 정비 방식의

1.3) 공군 군수사령부 81항공정비창(81st Aircraft Maintenance Depot, Air Force Logistics Command)

2) 공군 군수사령부 항공자원관리단 KF-21 체계과(KF-21 Branch, Aircraft Resources Management Wing, Air Force Logistics Command)

Corresponding author, E-mail: mcpoop@naver.com
Copyright © The Korean Institute of Defense Technology
Received : December 15, 2025 Revised : March 29, 2026
Accepted : March 30, 2026

변화는 자산 관리뿐 아니라 전력 유지 측면에서도 중요한 의미를 갖는다. 항공기 및 엔진 정비 분야에서는 CBM+ 체계의 도입이 점차 확대되고 있으며, 참고문헌^[1]은 운용 중 내장 센서 기반 상태 평가를 주요 데이터 원천으로 제시하고 있다. 그러나 센서 기반 CBM+는 단기 이상 탐지에 유호한 반면, 창정비 단계에서는 분해 후 획득되는 치수·형상 기반 판정 근거와 문서 근거 추적이 핵심이 될 수 있어 적용 범위와 근거 형식에서 차이가 존재할 수 있다. 항공기 노후화에 따른 결함 증가로 정비사의 고책임 판단 부담이 커지고 있으나, 기존 연구는 센서 기반 이상 탐지, 디지털 트윈, 개별 형상 분석 등 단위 기술 중심으로 보고되는 경향이 있으며, 창정비 단계의 정형 측정데이터와 비정형 기술자료를 공통 식별자로 연계하고 근거ID를 병기하여 판단 추적성을 확보하는 통합 구조가 체계적으로 제시된 사례는 충분하지 않은 실정이다.

이러한 논의를 바탕으로 본 연구에서는 정비 판단 지원에 활용될 수 있는 형상 정보(Shape Information)를 3D 스캐너로 획득한 3차원 형상 데이터와 좌표측정기(Coordinate Measuring Machine)로 측정된 부위별 치수 값을 동일 기준(FeatureID 등)으로 매핑(Mapping)하여 결합한 통합 데이터 구조로 정의한다. 이는 기존 기록 방식에서 상대적으로 소실되기 쉬운 측정 위치(부위) 정보를 보완하여, 수치 데이터에 공간적 문맥(Spatial Context)을 부여하기 위함이다. 나아가 숫자 중심의 정비 기록을 위치(Feature) 기반 데이터로 재구조화함으로써 결함 발생 부위의 비교나 정비 시점별 측정에 따른 변화 양상 등과 관련하여 동일 부위의 상태 변화를 기하학적으로 대조·해석할 수 있는 분석 관점을 제공할 수 있다.

현재 국내 정비 환경에서는 창정비 단계에서 치수 데이터는 확보되나, 3D 형상 데이터 운용 사례가 제한적이다. 따라서 형상 정보 기반 분석을 정비 판단 지원에 적용하기 위한 데이터 구성과 운용 구조를 제시할 필요가 있다.

최근 폐쇄망·보안 요구 환경에서 SLM-RAG 기반 문서 질의응답 적용 사례가 보고되고 있으며^{[2][3]}, 국방 분야에서도 군 정비 매뉴얼 기반 질의응답 구현·평가 연구가 수행된 바 있다.^[4]

본 연구는 창정비 환경의 ‘정형 측정데이터(치수·형상)·비정형 기술자료’를 하나의 판단 보조 흐름으로 연결하기 위해, (1) 부품ID/FeatureID/문서ID-문단·항 기반의 통합 참조 구조를 정의하고, (2) 규격판정·경향성·FMEA^[5] 등 분석 모듈의 산출물을 근거ID와 함께 동일 출력 채널(Q&A/리포트)로 제시하는 출력 템플릿을 제안하며, (3) 폐쇄망 운용을 전제로 버전/로그 및 근거 부족 시 응답 제한(불확실성 표기·추가 점검 권고) 규칙을 포함한 운영 관점을 함께 정리하였다.

본 연구의 목적은 폐쇄망 환경 제약을 전제로 통합 DB-분석 모듈-출력으로 이어지는 구성과 근거 추적 가능한 출력 형식을 중심으로 정비 판단 지원의 적용 가능성을 논의하는 데 있다. 특히 문서 개정·데이터 갱신을 고려해 근거ID의 버전/시점 관점까지 포함한 운용 관점의 논의 범위를 명확히 한다.

본 연구는 2장 한계, 3장 제안 구조, 4장 가상 시나리오 기반 적용 논의, 5장 논의, 6장 결론·향후 연구로 구성된다.

2. 기존 정비 체계의 한계

기존에는 부품의 사용 가능 여부를 판단하기 위해 마이크로

미터, 보어매틱 등 전통적인 측정 장비를 활용한 상태검사가 수행되어 왔다. 상태검사는 부품의 교환 또는 수리 여부를 판단하기 위한 검사 행위로서 육안 검사와 치수 검사를 포함하며, 측정자의 숙련도와 측정 조건에 따라 결과의 정확도와 재현성에 편차가 발생할 수 있다. 이로 인해 측정 결과의 객관성과 판단 기준의 일관성을 체계적으로 유지하는 데 구조적 제약이 존재한다.

항공기 엔진 창정비에서 생성되는 치수 데이터는 수리부속 청구 및 정비 강화 필요성 판단에 활용되지만, 분석 결과가 정책 또는 수명 판단으로 환류되는 체계는 미정립 상태이다. 또한 좌표 측정기 기반 치수 데이터의 수집과 누락은 초기 단계에 머물러 정량 분석의 적용은 검토 중이다.

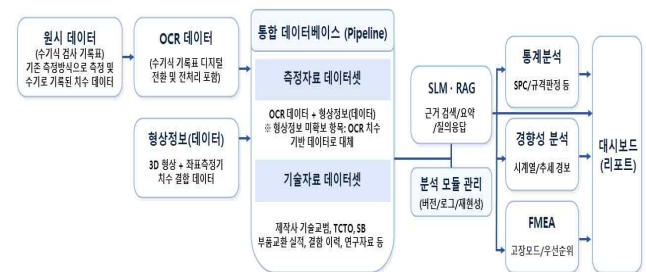
정비사들은 제작사가 명시한 부품 규격한계에 근접한 구성품을 마주할 때 과거 결함이력, 청구·소모 자재, 개인 경험을 종합해 재사용 여부를 결정해야 하는 상황에 놓인다. 이러한 판단은 단순 정비 품질 문제가 아니라 비행 중 결함 등 잠재적 사고 가능성과 연결될 수 있는 고위험 의사결정으로서 정비사의 심리적 부담과 책임 리스크를 높일 수 있으며, 경험적·주관적 판단에 대한 의존이 커질 경우 정비사 변경 시에도 일관된 평가 결과를 조직 차원에서 확보하는 데 한계가 발생할 수 있다.

3. AI 기반 분석 체계 개념 및 구성 구조

3.1 시스템 개요

본 연구의 체계는 창정비 단계 정비 데이터를 구조화해 규격판정·경향성 분석·FMEA 등 분석 모듈과 연계·활용하는 구성 방안을 다룬다. 기술교범, 형상 정보, 결함·교환 이력 등 이질 데이터를 통합 구조로 정리하는 방안을 제안하며, 유사도 검색 벡터 DB와 SLM-RAG 기반 근거 검색/질의응답을 결합해 각 모듈이 공통 데이터를 참조하도록 한다.

본 연구의 구성 요소는 (1) 통합 DB 참조 구조(부품ID/측정부위ID(FeatureID) 및 문서ID-문단/항 기반), (2) 규격판정·경향성 분석·FMEA 연계 워크플로우, (3) 근거 식별자 병기 기반 Q&A/리포트 출력 템플릿(그림 1>~그림 3>)이며, 가상 시나리오 출력 예시를 포함한다. 또한 근거 제시형 Q&A는 규격판정·경향성 분석·FMEA 산출물을 동일 형식으로 제시하기 위한 공통 출력 채널로 정의한다.



※ 본 그림은 제안 분석체계의 개념적 구성과 데이터 흐름을 도식화한 것으로 실제 시스템 구축·운용 결과를 의미하지 않는다.

그림 1. 정비 분석체계 개념적 프레임워크

Fig. 1. Conceptual Framework of an Aircraft Engine Maintenance Analysis System Based on SLM and RAG with Geometric Information

그림 1은 통합 DB-분석 모듈-근거 제시형 Q&A/리포트로 이어지는 데이터 흐름과 모듈 간 공통 참조 관계(부품

ID/FeatureID/근거ID)를 개념적으로 나타낸다.

3.2 데이터 확보 및 전처리

기존의 검사 기록은 템플릿 기반 수기 자료로 존재하므로 OCR 기반 추출이 필요하다. 본 연구에서는 수기식 엔진 부품 상태검사 기록표를 디지털화하기 위한 구조로서 OCR 기반 추출 후 인식 신뢰도 점검, 필수 항목·범위 검증, 이상값 탐지·필터링 및 표본 대조를 포함한 단계적 품질 점검을 가정하고, 품질 기준 미달 데이터는 재검증 또는 분석 제외로 처리하여 오류 전파를 제한한다. 한편 3D 스캐너 및 좌표측정기를 활용한 형상 정보 확보는 형상 복잡도, 부품 중요도, 분석 우선순위(측정 효율성)에 따라 적용이 제한될 수 있다. 따라서 우선 적용 대상 부품은 복잡 형상 또는 판단 영향도가 큰 주요 부품으로 설정하며 기타 부품은 기존 측정 방식(수기/치수 중심 기록)의 활용을 전제로 한다.

3.3 통합 데이터베이스(DB) 구조

정비 과정에서 생성되는 측정 데이터와 기술자료를 공통 기준으로 관리하기 위한 통합 DB를 가정한다. 통합 DB는 사실 데이터와 기준 정보를 함께 관리해 모듈 간 참조 일관성을 확보한다. 데이터셋은 측정자료 데이터셋과 기술자료 데이터셋으로 구분하는 것을 전제로 한다.

첫째, 측정자료 데이터셋은 좌표 측정기의 좌표값, 3D 스캔 형상 정보, OCR 기반 치수 기록 등 부품 측정 과정에서 생성되는 데이터를 분석용으로 정리·가공하는 구조로 설정한다.

둘째, 기술자료 데이터셋은 제작사 기술교범, 결함 원인 분석 문서, 민간 항공엔진 정비 관련 논문·보고서 등을 포함하여, 정비 판단에 참고 가능한 자료를 체계적으로 정리하는 구조로 설정한다. 기술자료 데이터는 통합 관리 구조 내에서 문서 단위로 벡터화되어, 검색 가능한 형태로 관리된다는 전제하에 RAG 방식의 적용 가능성을 검토한다. 이를 통해 자연어 질의에 대해 관련 근거 문서를 탐색하고, 정리·제시하는 응답 흐름을 구성할 수 있는 분석 구조를 제시한다.

3.4 분석 모듈 구성

각 모듈은 도메인 특화 SLM^[6] 활용을 상정하되 정량 분석은 로직이 수행, SLM은 결과·근거 통합 서술을 보조한다.

첫째, 규격판정 모듈은 형상 정보 및 수기 기록 등으로부터 생성되는 수치 데이터를 기반으로, 동일 부품에서 반복 측정된 값의 변동 수준과 측정 결과의 방향성 있는 변화(경향)를 점검하기 위한 분석 절차/구성을 검토한다. 반복 측정값은 중앙값을 대표값으로 사용하여 규격 기준값 $\pm$ 공차 대비 적합 여부를 판정하고, 규격 기준값 대비 편차와 규격 한계까지의 여유를 산출하며, 변동 수준은 표준편차 또는 사분위 범위(Q3-Q1)로 요약하고 이상치 후보는 3σ 또는 사분위 범위 기준으로 표기해 재검증 대상으로 분리한다. 형상 분석이 가능한 항목은 3D 스캔과 좌표측정을 활용하여 분포 특성을 확인할 수 있도록 구성하는 방식을 제안하며, 형상 정보 확보가 제한적인 항목은 디지털 전환 치수 중심 분석을 가정한다.

둘째, 경향성 분석 모듈은 동일 Feature에서 반복 측정된 치수의 시계열 데이터를 누적하여 시간에 따른 변화 양상을 파악할 수 있도록 설계한다. 이때 규격판정 결과를 보조 입력

으로 포함할 수 있으며, 필요 시 노이즈 완화 처리를 선택적으로 적용할 수 있다. 이를 바탕으로 추세(증가/감소) 및 규격한계 접근 여부를 평가할 수 있는 기준/절차를 정의하는 구성을 제안한다. 구체적으로 반복 측정값은 중앙값으로 요약하고, 이동평균 또는 선형 추세 요약으로 변화 방향을 산출하며, 규격 기준값 대비 편차와 규격 한계까지의 여유 감소를 경보 기준으로 활용한다. 결과는 추세·경보·점검 권고를 출력하는 형식으로 제시하며, 관련 기술교범·결함 이력 등 근거 문단의 근거ID를 함께 병기하는 형태를 가정한다.

셋째, FMEA 모듈은 결함·교환 이력과 기술교범/사례 문단 등 문서형 정보를 입력으로 활용하여 고장 모드와 영향 요소를 체계적으로 정리·연결하는 구성을 상정한다. 이때 RAG를 통해 관련 근거 단위를 회수할 수 있으며, SLM이 이를 표준 FMEA 항목(고장모드/영향/통제, S/O/D, RPN)으로 매핑·구조화할 수 있도록 구성하는 방식을 제안한다. 특히 본 연구에서는 FMEA 수행이 아니라 조화·검증 관점의 활용을 전제로, 조화·검증 중심의 FMEA 요약표를 생성하는 방식을 가정하며, 요약표에는 심각도(S)·발생도(O)·검출도(D)를 부여하고 RPN을 $S \times O \times D$ 로 산정하여 우선순위를 제시하는 절차를 포함할 수 있다. 결과에는 근거ID를 병기하여 추적성 및 사후검증 가능성을 지원할 수 있다.

아울러 규격판정, 경향성 분석, FMEA 모듈은 동일한 데이터 관리 구조를 공통 기반으로 활용하는 것으로 가정하며, 각 모듈 결과가 상호 참조되도록 연계함으로써 판단 지원 정보의 맥락 일관성을 강화할 수 있는 구조를 제시한다. 또한 공통 출력 채널(Q&A/리포트)에서 근거ID를 병기하고, SLM이 결과의 의미 해석과 근거 연결 서술을 보조하는 방식으로 조화·검증을 지원하는 구성을 상정한다.

3.5 통합 DB 기반 근거 제시형 질의응답(Q&A) 구조

본 절에서는 측정·기술 데이터셋을 통합한 통합 DB를 대상으로 SLM·RAG 기반 근거 제시형 질의응답(Q&A) 구조를 제안한다. 표 1은 제안 체계가 전제로 하는 ‘폐쇄망 운용·근거 추적·재현성 확보’ 요구를 설계요소·산출물/형식으로 매핑하여, 본 연구의 논의 범위(개념 연구)와 제안 구조의 차별점을 정리한 표이다.

표 1. 요구사항과 설계요소 간 요약 매핑(대응 관계)

Table 1. Summary mapping of requirements to design elements

요구사항	설계요소	산출물/형식
폐쇄망·자원제약	도메인 특화 SLM, 로컬 RAG, 벡터DB	질의 응답(Q&A), 근거 병기
이질데이터 통합·추적	통합 DB, 부품ID/측정부위ID (FeatureID), 문서ID-장/절/항	리포트/대시보드, 근거ID
재현·안전	버전관리, 로그, 불확실성 표기/점검 권고	버전/시점, 점검 권고
모듈연계·결과제시	워크플로우, 출력템플릿, 근거ID(문서ID-장/절/항), 시나리오	대시보드/리포트, 근거 제시형 질의 응답

통합 DB는 치수 측정값과 3D 스캔 기반 형상 측정값(Feature별), 판정 결과·추세 등 정량 데이터와 기술교범·결함

/정비 이력 등 문서 데이터를 부품ID/측정부위ID(FeatureID) 및 문서ID-문단/항으로 연결해 관리하는 구조를 전제로 한다. 근거 제시형 Q&A는 (1) 정형 데이터의 조건 조회로 규격판정 요약·판정·추세를 산출하도록 구성할 수 있으며, (2) 비정형 문서는 RAG로 관련 근거 단위를 회수하고, (3) SLM이 두 결과를 근거 식별자(문서ID-문단/항)와 함께 통합 서술하는 흐름으로 설계될 수 있다. 각 응답에는 사용한 근거 식별자를 병기해 검토·추적 가능하도록 한다.

3.6 MLOps 개념을 참조한 분석 모듈 관리

규격판정·경향성 분석·FMEA 등 분석 모듈을 하나의 관리 흐름으로 연계하기 위해 MLOps 개념을 참조한 운영·관리 구조를 제안한다. 여기서 MLOps는 상용 배포가 아니라 버전 관리·로그·변경 이력·재현성 점검을 위한 관리 범위로 한정한다. 측정자료·기술자료 데이터셋은 누적·갱신되는 자료로 가정하고, 문서ID-문단/항 등 근거 식별자를 부여해 추적 가능하도록 구성한다. 기술자료 개정으로 문단 구성이 달라질 수 있음을 고려해 근거 인용 단위(문서ID-문단/항) 기준의 버전 매핑과 변경 이력 기록 원칙을 포함할 수 있다. 관리 범위는 모델 재학습뿐 아니라 임베딩/벡터 인덱스, SLM, 프롬프트·응답 템플릿, 근거 병기 규칙 등 RAG 구성요소의 갱신 이력까지 포괄하며, 분석/질의응답 시 사용 데이터셋 버전과 회수 근거 메타정보를 로그로 남기는 운영을 가정해 재현 및 사후검증 가능성을 보조한다.

3.7 시각화 및 리포팅 시스템

분석 결과는 대시보드 또는 리포트 형태로 정리·제시될 수 있는 구성을 전제로 하며, 각 분석 모듈 결과와 RAG로 연계되는 기술자료·과거 사례를 함께 참조하여 정비 판단에 필요한 맥락 정보를 보조적으로 확인하는 흐름을 포함할 수 있다. 상위 화면에서는 분석 요약과 위험도 항목을 우선 표시하고, 필요 시 규격판정·경향성·FMEA 세부 정보로 단계적으로 접근하는 구성을 가정하며, 자연어 질의를 통해 기준 정보·관련 이력·판단 근거를 함께 확인하는 응답 흐름으로 활용 확장 가능성을 논의한다.

3.8 가상 시나리오 기반 산출물(출력 형식) 예시

본 연구는 가상 시나리오 기반 출력 형식을 통해 제안한 데이터 구조(측정자료·기술자료 데이터셋)와 분석 모듈(규격판정·경향성 분석·FMEA)이 단일 워크플로우로 연계될 때 제공될 수 있는 결과물의 형태(출력 형식)를 구체화하는 개념적 정리에 초점을 둔다.

이 출력 형식은 <그림 1>의 데이터 흐름(정형 데이터 조회, RAG 기반 근거 회수, SLM 통합·해석)을 최종 결과물의 표현 형태로 구체화한 것으로 정의한다.

<그림 2>는 동일한 측정부위에 대해 측정자료 데이터셋의 통계적 정리(예: 중앙값, 편차, 규격판정)와 기술자료 데이터셋의 근거(예: 기술교범의 장/절/항)를 동일 화면(대시보드/리포트)에서 병기하여 확인하는 상세 출력 형식을 예시한다.

첫째, 규격판정 요약(예시)에서는 측정부위(Feature) ID가 3D 형상에서 정의된 측정부위와 좌표측정기에서 생성된 치수를 매핑하는 참조키로 사용되는 것으로 가정하며, 규격 기준값 대비 편차와 판정(OK/NG), 근거 문서 식별자(문서ID-문단/항)

를 함께 제시하는 출력 형식을 전제로 한다.

둘째, 경향성 분석(예시)에서는 반복 측정값의 추세가 규격한계(예: LSL/USL)에 접근할 경우 경보를 표시하는 형식을 전제로 하되, 해당 경보는 교환 여부를 자동 결정하는 신호가 아니라 정비 판단을 보조하기 위한 참고 신호로 해석 범위를 제한하는 구성을 가정한다.

셋째, FMEA 리포트(예시)에서는 결함코드·원인·영향·통제(예시)와 S/O/D, RPN을 표준 형식으로 정리하여 우선 검토 대상을 제시하며, 관련 근거를 문서 식별자(문서ID-장/절/항) 단위로 추적할 수 있도록 구성되는 출력 형식을 전제로 한다.



그림 2. 가상 시나리오 기반 예시 산출물(규격판정·경향성 분석·FMEA 출력 형식)

Fig. 2. Hypothetical Scenario-Based Example Outputs (Specification Judgment, Trend Analysis, and FMEA Formats)

그림 3의 근거 제시형 Q&A는 '정형 조회(규격판정·추세 산출)-RAG 기반 근거 회수-SLM의 결과-근거 통합 서술-근거ID 병기-근거 부족 시 불확실성 표기 및 추가 점검 안내'의 흐름으로 구성될 수 있다. 본 예시는 출력 형식과 근거 추적 방식을 설명하기 위한 가상 시나리오 기반 예시이다. 본 연구에서 근거 부족은 회수된 근거의 유사도 점수가 임계치에 미달하거나, 기준을 만족하는 유효 근거 문단 수가 최소 개수에 미달하는 경우로 정의한다.

사용자가 특정 부품/측정부위의 상태와 관련 근거를 질의하면 (1) 측정자료 데이터셋에서 치수·분포·규격 판정 또는 시계열 추세·경보 결과를 조건 기반으로 조회·요약하고, (2) 기술자료 데이터셋에서 관련 기준 문단을 검색(RAG)하여 근거 문단을 확보한 뒤, (3) SLM이 두 결과를 함께 통합·해석하여 응답과 근거(문서ID-장/절/항)를 병기하는 출력 흐름을 가정할 수 있다.

예를 들어 규격판정 질의에는 규격 기준값 대비 편차와 판정, 근거 문서 식별자가 함께 제시될 수 있으며, 경향성 분석 질의에는 추세(증가/감소), 규격한계 접근 경보, 점검 권고 및 근거 문서 식별자가 함께 제시될 수 있다. 이는 제안 구조에서 근거 제시형 판단 보조가 적용될 때의 출력 형식과 근거 추적 방식을 구체화하기 위한 설명이다.

또한 회수된 근거가 부족하거나 불명확한 경우에는 결론을 단정하기보다 불확실성을 표기하고, 추가 점검 항목 또는 필요

한 자료를 안내하는 응답 정책을 적용하는 것으로 가정할 수 있다.^[7] <그림 3>의 질의응답 출력은 통합·해석 결과와 근거 식별자(문서ID-장/절/항)를 제공하며, 필요 시 <그림 2>와 같은 상세 리포트/대시보드 화면으로 단계적으로 확장(연결)되는 사용 흐름을 전제로 한다.

FMEA 질의응답(가상 예시)

사용자 질의

이번에 측정된 RGB Bearing Bore(Feature ID: F-004) 치수가 5.0005 inch이고 RPN=162로 산정되었는데, 기술자료 데이터셋(기술교범/정비이력/결함이력)을 근거로 조치(수리 가능/추가검사/교환 등)를 요약하고 근거 문서(장·절 등)를 함께 제시해줘(예시)

체계 응답

기술교범 2J-TPT6A-3 x장 x절의 수리/허용 기준에 따라 해당 WEAR(보어 마모/확대) 현은 (예시) 재측정을 통한 추가검사로 적합 여부를 재확인한 뒤 수리 가능 여부를 판단하며, 기준 초과 또는 마모 진행 징후가 확인되면 교환을 권고한다; 관련 근거: 2J-TPT6A-3 x장 x절, SB-lyyyyyy, 정비이력, 결함이력, 항공엔진안전공학 과정 요약(예시)

※ 본 그림의 질의응답 및 수치(RPN 포함)는 <그림 2>의 가상 시나리오(가상 데이터)에서 구성된 예시이며 실제 운용 데이터 기반 검증 또는 성능 결과가 아니다.

그림 3. 통합 DB 기반 근거 제시형 질의응답(Q&A) 예시

Fig. 3. Example of an Evidence-Cited Q&A Output Based on an Integrated Database

그림 2와 그림 3은 모두 가상 시나리오 기반 출력 예시로서, 제안 체계가 제공할 수 있는 리포트/질의응답 형식과 근거 ID 병기 방식(추적 방식)을 구체화하기 위한 것이다. 이를 명확히 하기 위해 표 2에는 가상 시나리오 기반 최소 예시를 대상으로, 입력-분석-출력 간 단일 연결 관계(부품 ID/FeatureID/근거ID)를 요약하여 제시한다.

표 2. 최소 가상 예시: 단일 입력-분석-출력 연결 관계

Table 2. Minimal hypothetical example: a single input-analysis-output linkage

구분	내용(예시)	식별자/근거ID(문서 ID-장-절-항)
입력	정형: 치수(최근 n회), 기준 정보(LSL/USL) / 비정형: 기술교범 관련 문단	부품ID: A-XXXX / FeatureID: F-034 / 근거ID: 2J-TPT6A-3 5장 2절 1항
분석	경향성 분석(추세 및 규격 한계 접근 여부) + 필요 시 FMEA 조 회·검증 연계/분석결과 요약(예): F-034 값 증가 경향으로 확인, LSL 근접	(동일 참조기 기반) A-XXXX, F-034
출력	판단보조 형식으로 권고(결론 단 정 지양) + 근거ID 병기 / 출력 (예): 추가 점검·재측정 권고	근거ID: 2J-TPT6A-3 5장 2절 1항, SB-133045

4. 가상 시나리오 기반 적용 논의

본 장에서는 성능(정확도·효율) 자체의 실증 검증을 수행하기보다, 창정비 단계에서 확보 가능한 치수·형상 정보와 정비 이력·기술자료를 공통 식별자로 연계하고 근거ID를 병기한 Q&A/리포트 출력으로 판단의 추적성과 맥락 일관성을 보조할 수 있는 적용 가능성을 정리한다. 아울러 향후 연구에서는 동일 정비 시나리오 질의 집합과 동일 문서·이력 자료를 기준으로 기존 방식(수기 탐색·대조)과 제안 체계를 비교하여 근거ID 병기율/누락률, 관련 근거 회수 적합률, 응답 보류율 등을 정량 평가할 계획이다. 형상정보의 실측 수집 및 정량 성능 검증은 본 논문 범위에서 제외하며, 가상 시나리오 기반 출력 예시 범위에서 논의를 수행한다.

4.1 규격판정 기반 판단 보조(근거 병기)

가상 시나리오 출력 형식(규격판정 요약+근거 병기) 관점에서, 형상 정보와 치수 데이터가 통계적 정리 구조와 함께 활용될 경우 단일 치수의 적합 여부 판단을 넘어 부품 상태의 공간적 분포 또는 반복 측정에 따른 변화 양상을 함께 검토할 수 있는 가능성이 논의될 수 있다. 또한 기존 판단 과정에서 경험적 노하우에 의해 적용되던 기준을, 근거 식별자와 함께 동일 형식으로 정리·제시함으로써 판단 근거의 확인 및 사후 검토를 보조하는 표현 방식으로 활용될 여지가 있다.

4.2 경향성 분석 기반 추세/경보 및 점검 권고

가상 시나리오 출력 형식(추세/경보+점검 권고) 관점에서, 정비 판단 자료의 정리·재확인 과정을 표준화된 형식으로 제시할 수 있는 가능성을 검토한다. 정비 업무 과정에서 생성되는 수기 기록과 검사 자료를 디지털 데이터로 전환하고 분석 구조와 연계할 경우, 판단에 사용되는 정보의 정리 및 재확인 과정이 일정 수준 체계화될 수 있으며, 동일 부품에 대한 반복 측정 또는 중복 검토의 부담을 완화하는 방향으로 활용될 수 있다. 또한 부품 수명 한계와 관련된 공학적 판단 과정에서 자료 탐색·재확인에 소요되는 부담을 줄이는 보조 수단으로 작동할 가능성을 논의한다.

4.3 FMEA 조 회·검증 보조(근거 병기)

가상 시나리오 출력 형식(FMEA 항목 요약+근거 병기) 관점에서, 기술자료 데이터셋에 축적된 정비 이력·기술교범·결함 사례 등 문서형 근거를 활용하여 FMEA를 ‘수행’이 아니라 ‘조 회·검증’ 중심으로 보조하는 활용을 상정할 수 있다. 기존 FMEA 관련 검토는 정비사가 분산된 문서를 개별적으로 탐색·대조해야 하고, 참조 근거의 출처가 체계적으로 기록되지 않아 동일 고장 모드에 대해서도 판단 근거와 과정의 추적성이 저하될 수 있다. 본 구성에서는 과거 결함 사례, 적용 기준, 대응 이력 등을 문서ID-장/절/항 단위의 근거ID로 구조화하고 RAG 기반으로 관련 근거를 자동 회수하여, 규격판정·경향성 분석 결과와 함께 참조 가능한 형태로 제시하는 것을 가정한다. 이를 통해 근거ID 병기로 사용 근거의 출처를 명시하고, 근거 제시형 자연어 질의응답을 포함할 경우 비계획 정비나 기준이 불명확한 상황에서도 관련 근거를 함께 제시하는 방식으로 조 회·검증을 보조할 수 있다. 이러한 개선 효과의 정량 평가는 향후 연구에서 근거ID 병기율/누락률, 관련 근거 회수 적합률, 응답 보류율 등의 지표로 검토할 계획이다.

4.4 데이터 기반 정비 환경 관점에서의 보조적 활용 가능성

가상 시나리오 출력 형식(요약 리포트/Q&A) 관점에서, 정비 정책 또는 자원 운용과 관련된 검토 과정은 다양한 운용·정비 이력이 종합적으로 고려되며 판단 기준도 상황과 대상에 따라 유연하게 적용될 필요가 있다. 본 연구에서 제시한 분석 구조는 정비 과정에서 생성되는 치수 데이터, 경향성 정보, 결함 이력 등을 동일한 참조 구조(부품ID/측정부위ID 및 근거 식별자)로 정리하여, 관련 검토 과정에서 참고 가능한 보조 정보의 형태로 제공될 수 있다는 점에서 의미가 있을 수 있다.

5. 연구의 논의

5.1 제안 구조의 의의 및 기존 접근과의 관계

본 연구는 정비 기록·형상 정보·기술교범·결함 이력 등 이

질적 데이터를 부품ID/측정부위ID(FeatureID) 및 문서ID-장/절/항이라는 공통 식별자로 연결하고, 규격판정·경향성·FMEA 분석 모듈과 연동하는 통합 참조 구조를 제시하였다. 이는 운용 중 단계 이상 탐지에 초점을 두는 기존 CBM+ 체계를 대체하는 것이 아니라, 창정비 단계에서 확인되는 누적 마모·형상 변화와 같은 장기·정밀 판단 영역에서 근거 추적이 가능한 보조 분석 구조를 병행 적용하는 방향에 해당한다.

폐쇄망 환경에서 SLM-RAG 기반 문서 질의응답 적용 사례[2][3]와 군 정비 매뉴얼 기반 질의응답 연구[4]가 보고된 바 있으나, 정형 측정데이터와 비정형 기술자료를 하나의 판단 보조 흐름으로 연결하고 근거ID를 병기하는 통합 출력 구조가 체계적으로 제시된 사례는 제한적이었다는 점에서 본 연구의 차별성이 존재한다. 다만 이질 데이터 통합의 적용 수준은 용어·단위·Feature 정의 표준화와 승인·갱신·검증 절차의 성숙도에 좌우될 수 있으며, 형상 정보 활용의 범위·정밀도는 데이터 축적 수준과 측정 체계에 따라 달라질 수 있어 후속 검토가 필요하다.

5.2 적용 범위의 제약 및 후속 과제

본 연구는 폐쇄망 환경을 전제로 하므로 상용 클라우드 연산이나 대규모 언어모델과의 연동에는 제약이 존재할 수 있다. 다만 선행연구[2][3]에서는 소형 언어모델과 RAG의 결합이 제한된 연산 환경에서도 문서 질의응답 과업을 수행할 수 있음을 보고하고 있으며, 본 연구에서도 정량 분석은 로직이, SLM은 RAG로 회수된 근거의 해석·서술을 담당하는 역할 분리를 통해 추론 부하를 억제하는 구성을 상정한다. 구체적인 모델 선택 및 성능 검증은 후속 연구에서 검토할 계획이다.

수기 기록의 OCR 결과는 문서 품질·표기 방식·용어 불일치 등에 따라 추출 정확도 편차가 발생할 수 있으며, 이질 문서 통합 과정에서 정제·정규화·검증 부담이 수반되고 일부 항목은 수작업 검토가 병행될 수 있다. 또한 기존별 엔진 보유 대수와 창정비 빈도 특성상 충분한 누적 관측치 확보에 구조적 제약이 있으므로 분석 적용 대상은 현장 여건과 우선순위에 따라 단계적으로 확대할 필요가 있다.

본 연구는 창정비 단계 판단 지원을 중심으로 논의하였으므로 수명주기 전반의 장기 예측이나 정비 정책과의 직접 연계까지 포괄하지 않으며, 이는 별도의 모델 설계·검증을 포함한 후속 연구에서 검토되어야 한다. RAG/SLM 기반 질의응답의 경우 근거 문서의 범위·최신성 및 버전 관리 수준에 따라 출력 품질이 달라질 수 있으므로 근거 버전관리, 인용 단위 고정, 근거 부족 시 응답 제한 등 운영 규칙의 구체화가 후속 과제로 요구된다.

6. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구는 수기 기록과 경험 의존적 항공기 엔진 정비 환경에서 판단 일관성 확보가 어렵다는 문제를 출발점으로, 형상·치수 데이터와 기술자료를 공통 참조기(부품ID/측정부위ID) 및 근거 식별자로 연계하는 통합 데이터 구조와 근거 제시형 판단 지원 워크플로우를 개념적으로 제안하였다. 또한 폐쇄망 운용 제약을 전제로 통합 DB-분석 모듈-출력(리포트/Q&A)으로 이어지는 운영 구성을 정리하고, 표 1~2와 그림 1~3의 가상 시나리오 기반 출력 예시로 근거 추적 방식과 산출물 형태를

구체화하였다. 본 논문은 실측 기반 성능 검증이 아니라 구조·워크플로우·출력 템플릿의 체계화에 초점을 두며, 제안 내용은 향후 연구의 데이터 수집·모듈 구현·검증 설계를 위한 참조 프레임워크로 활용될 수 있다.

향후 연구는 모듈별 분석 로직과 SLM의 역할을 분리하고 MLOps 관점의 버전·로그·템플릿 관리 범위를 정식화하며, 메타데이터/스키마 확장과 사용자 유형별 출력 형식의 정교화를 단계적으로 검토하는 방향으로 설계될 필요가 있다. 또한 기존 방식과의 비교를 통해 근거ID 병기율/누락률, 관련 근거 회수 적합률, 응답 보류율 등의 KPI로 실효성을 정량적으로 검토하고, 결과에 따라 운용 기준(예: 응답 보류 기준) 조정 절차를 함께 검토할 필요가 있다. 아울러 수명주기 및 군수 성과 분석으로의 적용 가능성은 데이터 축적 수준과 운영 조건을 전제로 별도 범위에서 검토되어야 한다.

References

- [1] U.S. Department of Defense, Defense Acquisition University, Condition-Based Maintenance Plus (CBM+) Guidebook, Aug. 2024.
- [2] H.-W. Lee, K. J. Kim, and Y.-S. Lee, "Small Language Model-Based RAG for Document Question Answering in Education," *Journal of Intelligence and Information Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 211-225, 2025.
- [3] G. H. Kim and D. K. Kim, "Performance Comparison between Domain-Specific Fine-Tuning of Small Language Models and Retrieval-Augmented Generation: Focusing on Question Answering and Sentiment Analysis," *Smart Media Journal*, vol. 14, no. 6, pp. 50-59, 2025.
- [4] Y.-r. Nam, H.-s. Choi, J.-g. Choi, H.-j. Kwon, and Y.-h. Lee, "Small Language Model and RAG-Based Military Maintenance Manual Curation System," *Journal of Internet Computing and Services (JICS)*, vol. 26, no. 1, pp. 181-192, 2025.
- [5] U.S. Department of Defense, MIL-STD-1629A: Procedures for performing a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis, Nov. 24, 1980.
- [6] Suchin Gururangan, Ana Marasović, Swabha Swayamdipta, Kyle Lo, Iz Beltagy, Doug Downey, and Noah A. Smith, "Don't Stop Pretraining: Adapt Language Models to Domains and Tasks," *Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, pp. 8342-8360, 2020.
- [7] J. Buchmann, X. Liu, and I. Gurevych, "Attribute or Abstain: Large Language Models as Long Document Assistants," in *Proceedings of the 2024 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, Miami, Florida, USA, Nov. 2024, pp. 8113-8140.