

CBM+ 적용을 위한 설계초기단계 센서선정 추론 연구

신백천¹⁾, 허장욱^{2)*}

1) 금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합공학전공)

2) 금오공과대학교 기계시스템공학과(항공기계전자융합공학전공)

A Study of Sensor Reasoning for the CBM+ Application in the Early Design Stage

Baek Cheon Shin¹⁾, Jang Wook Hur^{2)*}

1) Department of Mechanical Engineering(Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic
Convergence Engineering of Mechanical Engineering), Kumoh National Institute of Technology

2) Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

Abstract : For system maintenance optimization, it is necessary to establish a state information system by CBM+ including CBM and RCM, and sensor selection for CBM+ application requires system process for function model analysis at the early design stage. The study investigated the contents of CBM and CBM+, analyzed the function analysis tasks and procedures of the system, and thus presented a D-FMEA based sensor selection inference methodology at the early stage of design for CBM+ application, and established it as a D-FMEA based sensor selection inference process. The D-FMEA-based sensor inference methodology and procedure in the early design stage were presented for diesel engine sub assembly.

Key Words : Early Design Stage, Condition Based Maintenance, Sensor Reasoning, System Functional Analysis, Design Failure Mode and Effect Analysis

Received: April 7, 2022 / **Revised:** June 20, 2022 / **Accepted:** June 22, 2022

* 교신저자 : Jang Wook Hur / Kumoh National Institute of Technology / hhjw88@kumoh.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

1. 서론

CBM(Condition Based Maintenance) 활동은 센서와 정보기술의 발전에 따라 장비의 상태를 진단 및 예측하여 제반 행정요소의 의사결정을 지원하는 선제적인 정비 및 보급 개념이다.[1],[2] 그리고 CBM+는 CBM에 추가하여 광범위한 기술과 행정 요소를 포함하는 포괄적인 기술정책이며, 건전성관리 개념에 따라 요구되는 데이터에 기반한 장비 상태의 고장진단 및 예지 활동으로 시스템 관점에서의 접근이 필수적이다.[1]

이를 위해서는 시스템의 기능에 기반한 분석이 수행되어 적용대상 파라미터가 식별되어야 하나, 상태를 모니터링하고 진단해야 할 대상 선정의 명확한 기준이 정해지지 않아 필요치 않은 데이터를 획득하도록 시스템이 구성되는 경우가 많다.[1],[3] 그리고 대부분의 경우에 시스템 분석 과정의 중요성을 간과하고 있으며, 적합한 절차 없이 실시되는 감시 대상과 파라미터의 선정은 시스템 구축에 많은 비용이 소요되고 있음에도 불구하고 상관성이 낮아 사용이 제한되는 데이터를 생산하는 결과를 초래하고 있다.[4],[6]

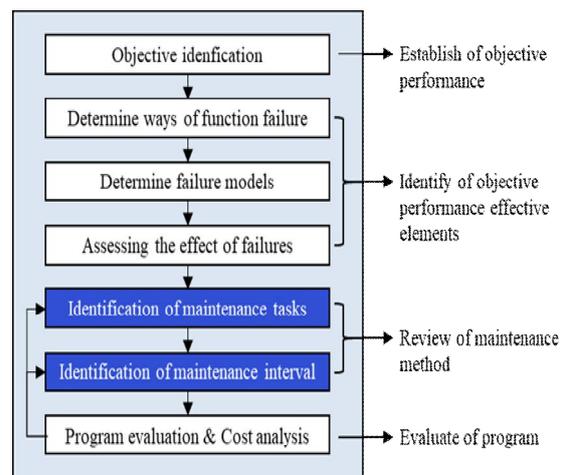
D-FMEA(Design-Failure Mode Effect Analysis)는 설계 초기 단계에서 적용이 가능한 고장 관련 모드와 영향을 분석하는 수법으로 건전성 관리 대상이 가진 파라미터를 최종적으로 고장으로 진행되는 파라미터들을 대상으로 하기 때문에 D-FMEA를 통해 도출된 고장 관련 요인들은 예지적 건전성 관리를 위한 파라미터로 활용할 수 있다. 더불어, 이 요인들을 유발하는 물리적 단위들은 각각 감지할 수 있는 대상으로 식별되고, 센서 선정은 해당 파라미터별 적합도 분석을 통해 대상을 선정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 CBM과 CBM+ 관련 내용을 조사하고, 시스템의 기능분석 업무와 절차를 정립하였으며, 대부분의 무기체계, 철도, 항공에 적용할 수 있는 CBM+ 적용을 위한 설계초기단계에서 D-FMEA 기반 센서선정 추론 방법론을 제시하고자 한다.

2. CBM과 CBM+

미군의 CBM+ 가이드북에 따르면, CBM+는 CBM과 RCM(Reliability Centered Maintenance) 활동의 조합으로 정의하고 있으며, RCM 활동을 통해 식별된 상태기반 정비 아이템들을 대상으로 하고, 자산 상태의 시각화 등 통합된 상태 정보 시스템을 구축하여 군수품 유지보수의 최적화를 추구하고 있다.[1]

이를 통해 미군은 시스템 또는 구성품의 가용도와 정비도를 기술 및 지식에 기반해 최적화하고, 고장발생 이전에 정비를 실시하여 가동률 향상 및 수명주기비용 절감을 달성할 수 있을 것으로 기대하고 있다.[1]

CBM+ 가이드 북의 지침에 따라 시스템을 분석하는 과정은 그림 1의 RCM 분석 절차를 적용할 수 있으며, 이 절차는 목표성능 식별, 목표성능 구현 영향요소 도출, 정비방법 검토 및 프로그램 평가로 이루어져 있다.[8] 여기서, 목표성능 구현 영향요소 도출은 발생가능한 기능 고장과 이때 미치는 영향을 평가하고, 정비방법 검토에서는 정비업무와 정비주기의 적절성을 반영하며, 프로그램 평가에서는 비용 분석을 포함하도록 하고 있다.

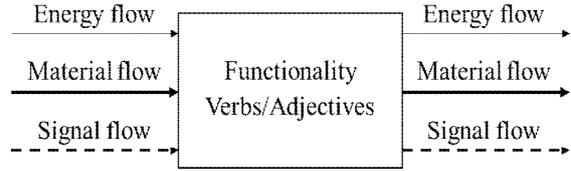


[Figure 1] RCM analysis process

3. 시스템과 기능 분석

3.1 기능 모델 구성

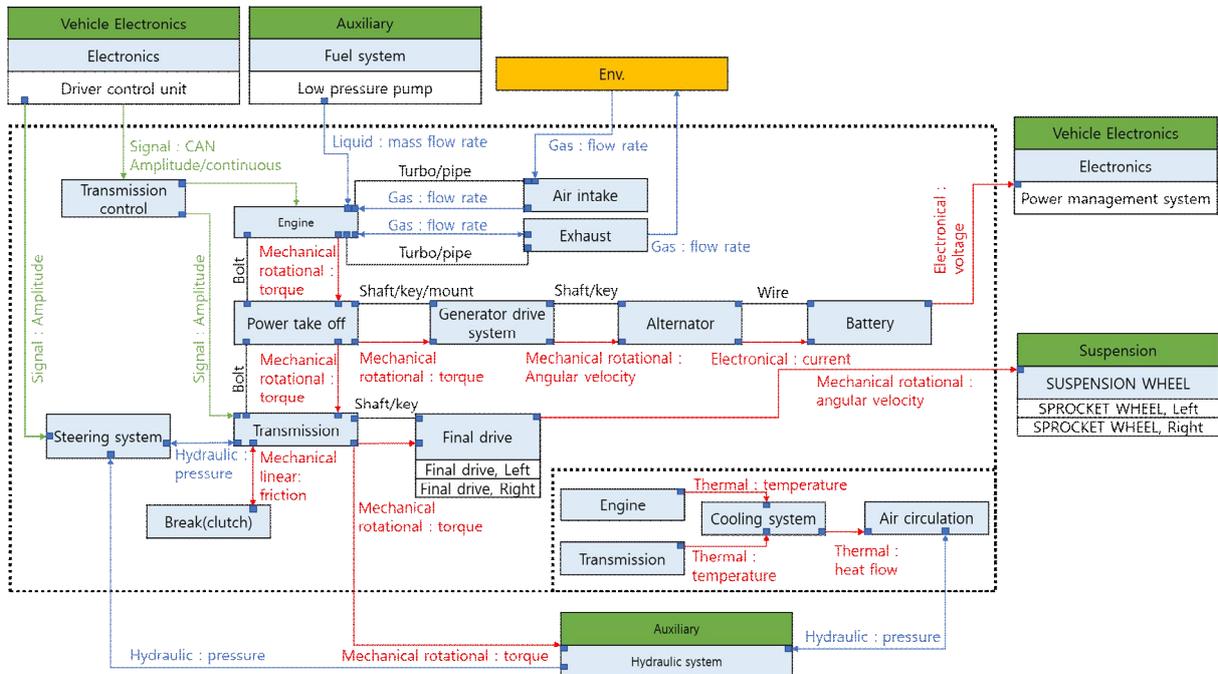
시스템 기능분석 방법은 상태기반 방법과 흐름기반 방법으로 구분할 수 있으며, 흐름기반 방법은 기능을 그림 2와 같이 에너지, 물질 및 신호에 대해 입력과 출력사이의 관계를 이용하여 나타내며, 기능 아키텍처의 표현에 적합하여 널리 사용되고 있다. 흐름기반 기능 언어를 시스템 기능을 정의하는 기준으로 사용할 수 있고[4],[5], 기능에 기초하여 트리 구조로 분류할 수 있게 한다. 흐름기반 방법의 기능 모델 도출은 입력과 출력 흐름으로 제품 기능을 표현한 모델로 만들어야 하며, 입력과 출력 흐름은 제품에 대한 고객 요구사항에 따라 설정되고, 각각의 고객 요구사항은 제품에 대한 하나 이상의 입력 또는 출력 흐름을 식별할 수 있게 해준다. 일반적으로 고객은 제품 내부의 흐름보다는 투입과 최종출력 흐름에 관심을 가지고 있으므로 출력 흐름은 요구사항에 따라 기대되는 제품의 결과물을 표시해야 한다.[5]



[Figure 2] Black box functional model

3.2 기능간 연결 및 통합

과워팩은 외부로부터 연료를 공급받아 동력을 생산하는 장치로 세부 기능은 ‘물질의 질량 유량을 기계적 회전 운동의 크기인 토크로 변환’으로 정의할 수 있다. 과워팩의 1차 대기능을 만족하기 위한 2차 소기능은 질량 유량의 공급, 물질의 연소에 의한 에너지 변환 및 손실, 기계적 운동을 외부로 전달로 나눌 수 있다. 각각에 대해 설정될 수 있는 시스템의 경계 즉, 주요 관심 범위는 그림 3에 표시한 점선 내외부의 상호작용과 같이 나타내었으며, 질량 유량의 공급은 외부 체계인 연료계통의 저압 연료펌프로부터 질량유량을 공급받아 디젤엔진 조립체로 이송되는 과정으로 표현이 되었다. 물질의 연소에



[Figure 3] Sensor reasoning task

의한 에너지 변환 및 손실은 디젤엔진 조립체로 공급된 질량 유량이 토크로 변환되어, 동력 분배장치로 공급되는 과정으로서 기능이 표현되었다. 이때의 손실은 어떤 열의 형태로 나타나기 때문에 냉각장치를 통해 엔진으로부터 전달되는 과정으로 기능이 표시되었고, 이는 다시 공기 순환 장치를 통해 외부로 배출되는 열 유동으로 변화되었다. 기계적 회전 운동이 외부로 전달되는 과정은 동력 분배장치를 통해 분배된 토크가 변속기를 통해 다시 종감속기로 전달되는 과정이며, 이 과정의 최종 결과는 종감속기가 외부의 스프라켓으로 각 속도를 전달하는 과정으로 이해할 수 있다.

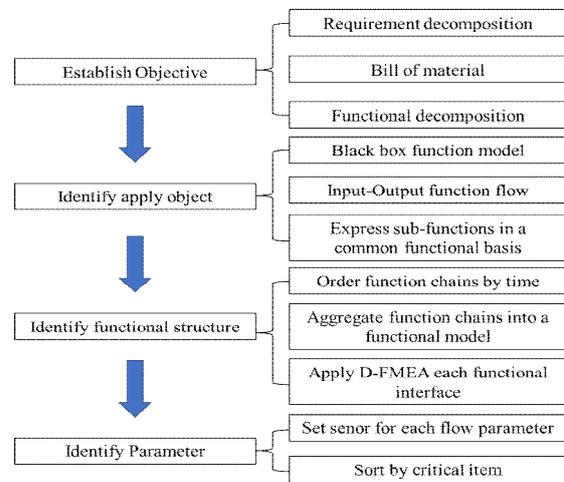
과워팩의 1차 대기능 외의 부기능으로 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 전력생산, 변속기 내부의 유동의 균형을 변경함으로 시스템의 운동방향을 변경하는 조향, 기계적 마찰력을 통해 시스템의 운동을 정지하는 제동으로 분류되었으며, 각 기능에 대해 전력생산의 경우 동력 분배장치가 발전기 구동시스템을 통해 기계적 회전력의 크기인 토크를 알터네이터의 회전 속도인 각속도로 변환하는 과정으로 나타났고, 이는 회전속도를 따라 유도되는 전자기력에 의해 발생하는 전류흐름으로 변환되어, 배터리로 전달되어 전압을 형성한다. 조향기능의 경우 장치가 발생시키는 유압이 변속기로 전달되는 과정으로 표시되었고, 제동의 경우 브레이크가 변속기로 전달하는 마찰력이다.

이때 시스템의 물리적 결합은 회전체의 경우 축결합으로 표시되었고, 고정하는 기능을 가진 결합은 볼트/너트 결합으로 표시되었다. 이때 근접하거나 결합하고 있으나 약한 상호작용을 가지고 있는 시스템간의 결합은 점선으로 연결되었고, 직접 결합하면서 강한 상호작용을 하는 시스템은 실선으로 연결되었다. 예를 들어 엔진과 종감속기는 동력전달 기능 내에서 상호작용은 하나 동력 인출 장치와 트랜스미션을 거쳐 간접적으로 결합하고 있기 때문에 약한 상호작용이다. 엔진과 동력 인출 장치는 물리적으로 축결합하고 있고, 기능 구조 또한 직접 결합하고 있기 때문에 강한 상호작용이다.

4. D-FMEA 기반 센서 추론

4.1 적용 프로세스

시스템에 필요한 센서를 추론하기 위해서는 시스템 아키텍처에 따른 기능을 명확하게 분석해야 하며, 이는 그림 4의 4단계 센서추론 절차를 통해 달성할 수 있다. 먼저, 센서추론을 위해 목표 설정이 필요하며, 고객의 요구사항을 할당하고, BoM(Bill of Materials)을 통해 하드웨어 또는 소프트웨어로 기능 요소를 분할한다.



[Figure 4] Sensor reasoning task

두번째는 적용 대상 식별로 운용형태와 운용이 요구되는 임무상황에 따라 기능의 중요도순으로 기능모델을 작성하고, 입력과 출력의 기능흐름을 연결하며, 기능에 기초하여 하부기능을 파악한다. 세 번째는 기능 구조파악을 수행하게 되며, 시간 순서로 기능을 연결 및 통합하며, 각각의 기능 인터페이스에 대해 D-FMEA를 적용한다. 마지막으로 파라미터식별 절차로 이 단계는 FMEA의 고장모드에 대한 MIL-STD-1629A 정의로부터 파라미터에 적합한 치명 품목을 도출하고 센서를 선정한다.[7]

4.2 D-FMEA 수행

기능에 기반한 D-FMEA 수행은 추론된 기능적 고장리스트와 영향으로부터 각각 탐지대상과 탐지

방법의 도출을 의미한다. 따라서 이러한 프로세스를 준용하는 경우 시스템의 목표를 인식하고, 목표에 따라 파생되는 시스템 기능 구조를 파악할 수 있다. 이때, 파악된 기능은 잠재적 감시대상이 되고, 감시대상의 확정은 D-FMEA를 통해 추론하게 되며, 최종 감시대상은 적합한 센서를 선정하여 고장 전과경로에 따라 진단규칙이 결정된다.[8]

기능과 관련된 입력과 출력 흐름은 파라미터로 분석되고, 흐름에 의해 도출된 인터페이스 관계로부터 파라미터 도출간 D-FMEA 방법론을 따라 분석할 수 있다.[8],[9] 디젤엔진을 대상으로, D-FMEA 예시를 표 1에 나타내었다.

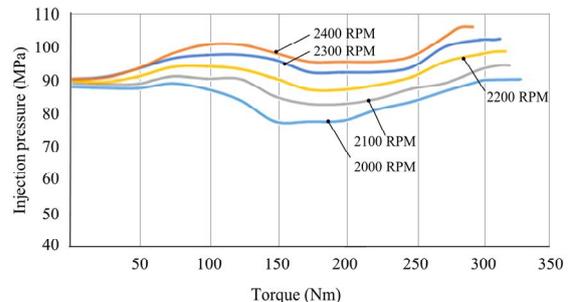
<Table 1> D-FMEA of diesel engine

| Item | Potential Failure Mode(s) | Potential Effect(s) of Failure | Potential Cause(s)/ Mechanism(s)of Failure |
|--------------------------------|--|--|--|
| Fuel injection system | Limited power generation | Decrease maneuver performance and limit maneuver | Injector nozzle damaged |
| | | | Common rail cracked |
| Engine oil circulation system | Limited power generation | Decrease maneuver performance and limit maneuver | Engine oil contamination |
| | Limited power transmission | | |
| | Noise and heat | | Engine oil leakage |
| Cooling system | Noise and vibration | Reduced cooling performance and limited starting performance | Assembly leakage |
| | Heat exchange and emission limiting | | Water pump damage |
| Fuel system | High frequency noise | Decrease maneuver performance and limit maneuver | Tube cracked |
| | Fires on system | Emergency stop | |
| | Pressure loss | Decrease maneuver performance and limit maneuver | Tube cracked |
| | | | Connector damaged |
| High pressure or Pressure loss | Decrease maneuver performance and limit maneuver | Pump outlet blocked | |
| | | Valve fault | |
| | | Enable to start | Pump degradation |
| Crank shaft | Noise and impulse | Enable torque transmit | Crank shaft shear |
| | Enable rotate | | Crank shaft adhesive wear |

4.3 센서추론

D-FMEA 분석을 활용하면 고장에 영향을 미치는 요소의 데이터를 측정하기 위해 어떤 센서를 부착시킬지와 우선순위 도출이 가능해진다. 즉, D-FMEA 결과와 기능모델을 통해 고장 파라미터에 대한 진단 규칙이 도출되며, 이때, D-FMEA의 탐지방식은 센서선정간 우선적으로 고려된다. 이러한 예시로 디젤엔진을 대상으로 D-FMEA의 예시를 나타낸 표 1중 연료분사계통을 예시로 D-FMEA를 통해 분리된 고장인 동력 생성 불가 고장모드 발생에 대한 연료분사 노즐 및 인젝터 손상, 커먼레일 균열 원인과 시스템 발생하는 영향인 기동 불가를 대상으로 표 2의 센서 장착 위치와 같이 커먼레일의 압력 센서를 통해 탐지하도록 제시하였다. 일반적으로 커먼레일은 그림 5에 나타난 커먼레일의 압력 프로파일과 같이 엔진의 회전수에 따라 기대 분사량 및 압력이 결정되기 때문에 고장의 진단간 인젝터와 커먼레일의 상태 지표를 결정하는 방법은 엔진의 각 RPM에 따른 커먼레일 압력의 프로파일과 현재 수집된 엔진의 RPM과 커먼레일 압력의 프로파일을 비교함으로써 상태를 진단할 수 있고, 주요 성능지표는 압력 및 맥동에 관한 데이터를 감시대상으로 한다. 더불어 동작이 주기적이고, 동일 상태에 대해 재현성이 있기때문에 예측 분석의 적용간 주기적 데이터의 예측에 높은 적합성을 가진 LSTM(Long Short Term Memory)필터를 적용할 수 있다.[10]

5. 결론



[Figure 5] Injection pressure profile(1,500HP engine)

<Table 2> Sensor for diesel engine fuel injection system

| Sensor Name | Politics | Subjects and rules | | | | Purpose and basis | |
|-----------------|-----------|--------------------|-----------|------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| | | Sensor location | Interface | Data measurement | Data manipulation | Sensor purpose | Sensor selection basis |
| Pressure sensor | Prognosis | Common rail | J1939-73 | Static pressure | State screen on operation profile | Check pneumatic pressure normal | Measure pressure of inlet and outlet |
| | | | | | LSTM regression predict | | |

5.1 적용 프로세스

시스템 개발을 위한 설계초기단계에서 D-FMEA 기반의 센서선정 추론 방법론을 제시하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시스템의 유지보수 최적화를 위해서는 CBM과 RCM을 포함한 CBM+에 의한 상태정보 시스템 구축이 필요하다.
- 2) CBM+ 적용을 위한 센서 선정은 설계초기단계의 기능 모델구성과 기능간 연결 및 통합 프로세스의 체계적인 수행이 요구된다.
- 3) 설계초기단계의 D-FMEA 기반 센서추론 방법론과 절차를 디젤엔진 구성품을 대상으로 제안하였다.

사 사

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성(Grand ICT연구센터) 사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2022-2020-0-01612).”

References

1. USDoD, “Condition Based Maintenance Plus DoD Guidebook”, pp. 6-10 2018.
2. MIMOSA, “Open Systems Architecture for Condition-based Maintenance primer”, pp.

2-12, 2006.

3. S. D. Rudov-Clark, J. Stecki, “The Language of FMEA: on the Effective Use and Reuse of FMEA Data, AIAC-13 Thirteenth Australian International Aerospace Congress, pp. 2-7, 2009.
4. Stone, R. B., Tumer, I. Y., Van Wie, M., “The Function Failure Design Method” ASME Journal of Mechanical Design, pp. 127-397, 2005.
5. Kirschman, C. F., Fadel, G. M., Jara Almonte, C. C., “Classifying Functions for Mechanical Design”, in Proc. The 1996 ASME Design Engineering Technical Sixth DSTO International Conference on Health & Usage Monitoring, 96-DETC/DTM1504, Irvine, pp. 18-22, 1996.
6. USNAVY, “NEAVSEA RCM”, 1993, pp. 49-71
7. US DoD, Mil-STD-1629A, pp. 18-28, 1998.
8. AIAG, Failure Mode and Effects Analysis 4th Edition Overview, pp. 15~66, 2013.
9. Bidokhti, N., “How to Close the Gap between Hardware and Software using FMEA”, in Reliability and Maintainability Symposium, pp. 167-172, 2007.
10. Schmidhuber, Jurgen, “Deep Learning in Neural Networks: An Overview”, Neural Networks, Vol. 61, pp 85-117, 2015.