

디젤엔진 터보 과급기 CBM+ 적용을 위한 설계초기단계 센서선정 추론 연구

신백천¹, 허장욱^{2*}

¹금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합전공), ²금오공과대학교 기계시스템공학과

A Study of Sensor Reasoning for the Diesel engine TurbochargerCBM+ Application in the Early Design Stage

Baek-Cheon Shin¹, Jang-Wook Hur^{2*}

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

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

요약 과학기술의 급속한 발전으로 인공지능에 대한 관심이 날로 확산되고 있는데, 이런 흐름에 발맞춰 미군은 모든 행정요소의 의사결정을 지원하는 선제적 정비·보급 개념인 CBM(Condition Based Maintenance-CBM)을 강조하고 있다. 이에 따라 CBM+ 정책을 적용하기 위해 요구되는 시스템 최적화 과정을 위해 기존의 RCM 분석 프로세스를 대상으로, 기능분석방법은 요구사항에 대해 만족하는 기능요소를 에너지, 물질, 신호의 분류와 메커니즘에 기반하는 흐름기반 분석법이 사용되었고, 발생 가능한 기능 고장과 이때 미치는 영향을 평가는 설계초기단계에서 요구사항에 따라 정의된 흐름기반 기능에 대해 기능에 발생할 수 있는 고장과 고장이 진행되는 메커니즘, 고장에 따른 상하위레벨로 전파되는 영향을 기록하는 고장 분석방법인 D-FMEA(Design Failure Mode and Effect Analysis)에 기반해 수행되어, 시스템 개발을 위한 설계초기단계에서 D-FMEA기반의 센서선정 추론 방법론을 제시하였다. 제안을 통해 기존의 행위기반 기능 분석 방법에 대해 물리량에 기반한 흐름기반 분석 방법으로 대체하여, 더 과학적 근거에 기반한 기능 표현이 가능해지고, D-FMEA의 수행간 요구되는 기능 분해간 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract With the rapid development of science and technology, interest in artificial intelligence is spreading daily. In line with this trend, the U.S. military emphasizes Condition Based Maintenance (CBM), a concept that supports the decision-making of all administrative elements. Therefore, the existing RCM analysis process is targeted for the system optimization process required to apply the CBM+ policy. As for the functional analysis method, a flow-based analysis method based on the classification and mechanism of energy, material, and signal of functional elements satisfying the requirements was used. The assessment of possible functional failures and their impact on these issues is based on the design failure mode and effect analysis (D-FMEA), which records the failure and mechanisms that can occur in the function and the effect of propagation to the upper and lower levels of failure, for flow-based functions defined according to the requirements in the early stages of design. The proposal is expected to replace the existing behavior-based functional analysis method with a flow-based analysis method based on physical quantity, enabling scientifically basis-based functional expression and applying the required functional decomposition between the D-FMEA performances.

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

*Corresponding Author : Jang-Wook Hur(Kumoh National Institute of Technology)

email: hhjw88@kumoh.ac.kr

Received April 20, 2022

Revised June 21, 2022

Accepted July 7, 2022

Published July 31, 2022

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.

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[1-4]. 그리고 대부분의 경우에 시스템 분석 과정의 중요성을 간과하고 있으며, 적합한 절차 없이 실시되는 감시대상과 파라미터의 선정은 시스템 구축에 많은 비용이 소요되고 있음에도 불구하고 상관성이 낮은 사용이 제한되는 데이터를 생산하는 결과를 초래하고 있다[4-9].

따라서 본 연구에서는 CBM과 CBM+ 관련 내용을 조사하고, 시스템의 기능분석 업무와 절차를 정립하였으며, CBM+ 적용을 위한 설계초기단계에서 D-FMEA 기반 센서선정 추론 방법론을 제시하고자 한다.

2. CBM+와 RCM 분석 절차

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

이에 따라 CBM+의 구현을 위해서는 최적화의 관점에서 시스템을 분석하여, 적용이 필요한 것으로 판단되는 시스템을 고립시켜야하며, CBM+ 가이드 북의 지침에 따라 시스템을 분석하는 과정간 Fig. 2의 RCM 분석 절차를 적용해 최적화한다. 이 절차는 목표성능 식별, 목

표성능 구현 영향요소 도출, 정비방법 검토 및 프로그램 평가로 이루어져 있다[9].

여기서, 목표성능 구현 영향요소 도출은 기능분석방법을 통해 도출되고, 기능분석방법은 요구사항에 대해 만족하는 기능요소를 에너지, 물질, 신호의 분류와 메커니즘에 기반하는 흐름기반 분석법이 사용된다. 발생 가능한 기능 고장과 이때 미치는 영향을 평가는 D-FMEA(Design Failure Mode and Effect Analysis)에 기반해 수행되고, D-FMEA는 설계초기단계에서 요구사항에 따라 정의된 흐름기반 기능에 대해 기능에 발생할 수 있는 고장과 고장이 진행되는 메커니즘, 고장에 따른 상하위레벨로 전파되는 영향을 기록하는 고장 분석방법이다. 정비방법 검토에서는 정비업무와 정비주기의 적절성을 반영하며, 이때 D-FMEA를 통해 분석된 RPN으로부터 계산된 사건 발생 확률로부터 주기를 반영한다. 프로그램 평가에서는 비용분석을 포함한다.

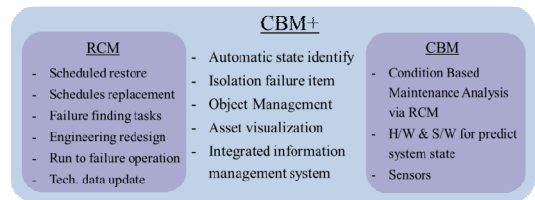


Fig. 1. CBM+ objective

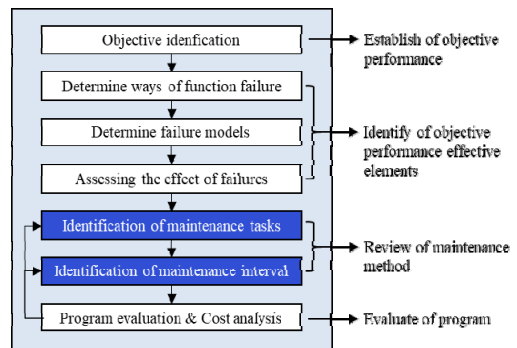


Fig. 2. RCM analysis process

3. 시스템과 기능 분석

3.1 기능 모델 구성

시스템 기능분석 방법은 상태기반 방법과 흐름기반 방법으로 구분할 수 있으며, 상태기반 방법은 기능-행동-상태 모델링으로 표시할 수 있고, 행동들의 상관관계로

연결하고, 연결 관계로부터 기능 흐름을 유추해내는 방법이며, 다중 상태 시스템의 기능을 표현하기 위한 모델 구성에 유리하다[4,6].

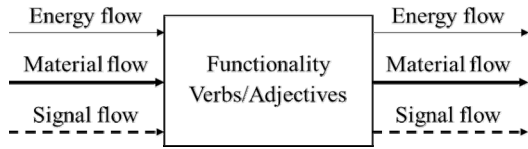


Fig. 3. Black box functional model

그리고 흐름기반 방법은 기능을 Fig. 3과 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[7-9], 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 설정되

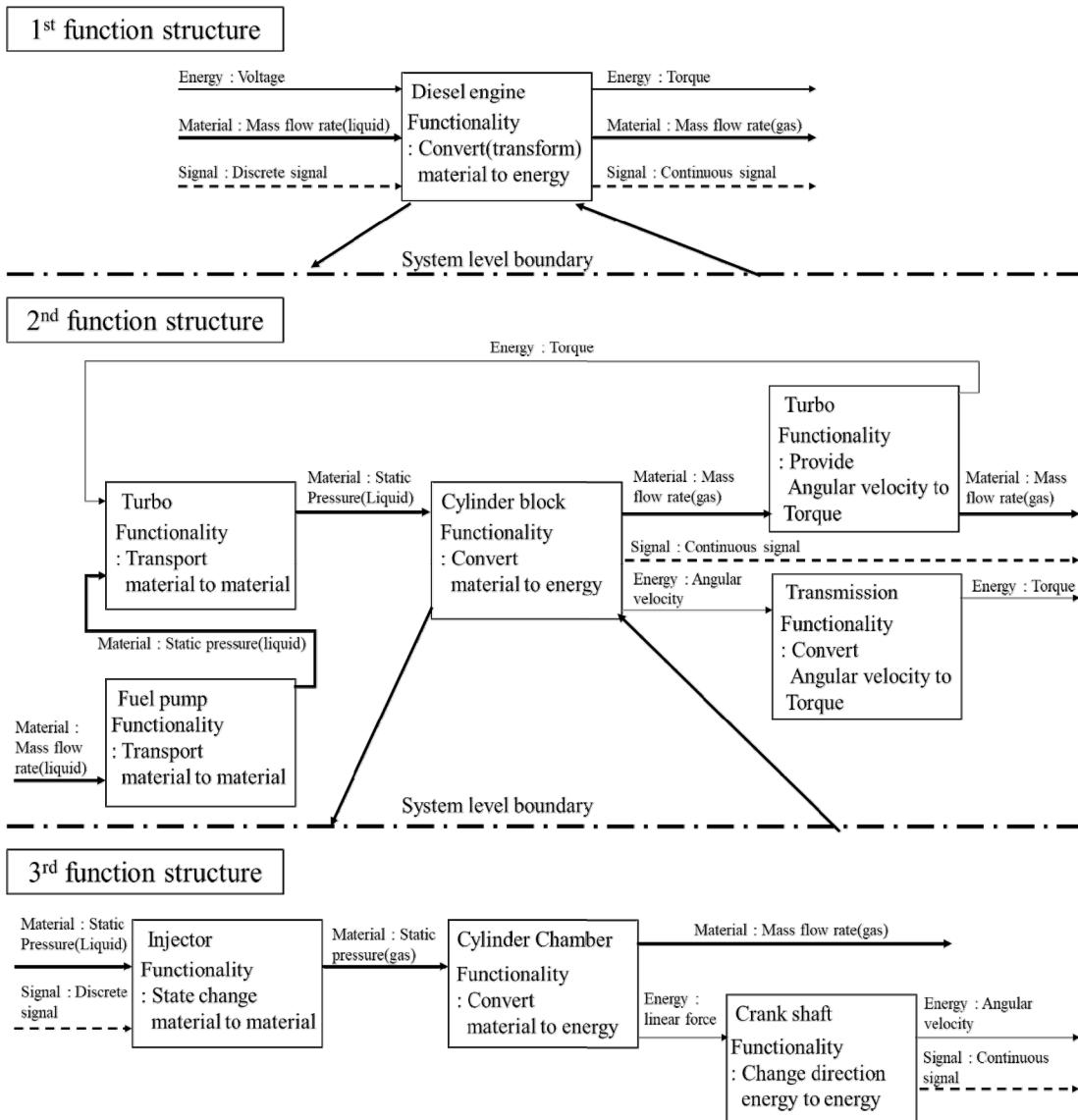


Fig. 4. Functional model and sub-functional model chain

고, 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[4-8].

3.2 기능간 연결 및 통합

각각의 입력에 대해 시스템 아키텍처를 따라 작동하는 하위 기능 흐름이 매끄럽게 이어지도록 하위 함수로 표현하게 되는데, 잘못된 매칭은 자연스럽게 연산이 불가능한 결과로 나타나게 된다. 이러한 작업의 부수적인 효과로 설계의 물리적 형태가 잘못 구성된 경우 설계간 핵심 기능 요구사항이 미반영된 것을 알 수 있게 해주며, 흐름이 다른 유형으로 변환된 경우 모델의 업무 흐름이 종료될 때까지 변환된 흐름에 대한 작업을 추가 수행한다.

상위 기능에 기반한 하위 기능 표현을 위한 연결은 MIL-STD-1629의 표준 기능 정의를 사용하며, 구체적인 형태로 기능적 모델을 표현하면 반복 가능한 기능 구조로 재사용이 가능한 이점을 얻을 수 있고, 기능 모델에 대한 표준 적용으로 물리적 시스템의 일관성과 정확성을 유지할 수 있다[10]. 이러한 기능 모델은 시간에 따라 배치 순서를 정하는 것이 권장되는데, 일반적인 기법은 하위 기능으로 흐름추적을 수행하며, 시간에 대해 순차적 또는 병렬적으로 기능 모델의 하위 기능과 흐름으로 확장한다.

기능모델에 대한 기능 연결의 예를 디젤엔진을 사용하여 Fig. 4에 나타내었다. 기능 흐름의 연결을 통해 디젤엔진의 동력변환이라는 기능이 물질의 이송과 에너지 변환, 그리고 물질의 전달로 구현된 세부 기능으로 아키텍처가 구성됨을 알 수 있다. Fig. 4는 3차 기능까지의 기능 아키텍처로서, 구성품들의 기능이 모여 1차 기능으로 동작함을 표시하고 있다. 이러한 기능연결은 원하는 결과를 얻기 위해 특정 시간-상태 순서로 하위 기능을 표시하며, Fig. 4에서 2차 기능은 실린더 블록과 터보 장치 및 트랜스미션에 대해 입력 흐름은 공통이지만, 출력은 순차 흐름으로 연결된 하나의 병렬 기능 사슬을 나타내고 있다.

기능모델 도출의 최종 목표는 상위기능과 하부 기능 모두를 기능 사슬의 단일 모델로 통합하는 것이며, 이때 제품의 특성에 따라 시스템 모델의 사슬들이 서로 연결되어야 한다. 이에 따라 Fig. 4에서 3차 기능 정의의 예로 실린더 블록에서 발생하는 일련의 에너지 변환과정을 작업 순서에 따라 인젝터-실린더 챔버-크랭크 샤프트로 배치하고 있다.

4. D-FMEA 기반 센서 추론

4.1 적용 프로세스

시스템에 필요한 센서를 추론하기 위해서는 시스템 아키텍처에 따른 기능을 명확하게 분석해야 하며, 이는 Fig. 5의 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. 두 번째는 적용 대상 식별로 운용형태와 운용이 요구되는 임무상황에 따라 기능의 중요도 순으로 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[10].

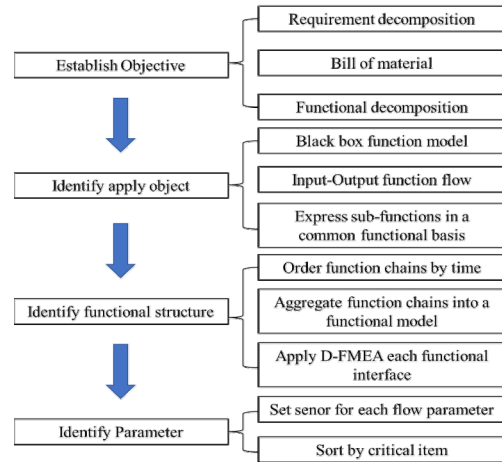


Fig. 5. Sensor reasoning task

4.2 D-FMEA 수행

기능에 기반한 D-FMEA 수행은 추론된 기능적 고장 리스트와 영향으로부터 각각 탐지대상과 탐지방법의 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 전파경로에 따라 진단규칙이 결정된다[11].

Table 1. D-FMEA of diesel engine turbo charger

Item	Potential failure mode	Potential effect of failure	Severity	Potential cause/mechanism of failure	Current Design				
					Occurrence	Current design controls prevention	Current design controls detection	Detectability	RPN
Turbine housing	Wear	Turbo charger damage	5	Thermal - mechanical load	1	Used in similar applications	Exhaust flow control	2	10
Compressor wheel	Erosion	Loss of power	2	Dust - fine particles	1.5	Torque specification	Process control	2	6
Exhaust gasket	Wear	Exhaust gas leakage	2	Wear	1	Fitting specification	Material selection	2	4
Oil circulation	Crack	Poor oil supply	2	Thermal - mechanical load	1	Used in similar application	Full load operation	2	4
Exhaust manifold	Crack	Over heat	2	Thermal - mechanical load	1	Torque specification	Design thermal and cyclic loading	2	4

Table 2. Sensor for diesel engine turbo charger

Sensor Name	Politics		Subjects and rules			Purpose and basis	
	CBM	Prognosis	Sensor location	Interface	Data measurement	Sensor purpose	Sensor selection basis
Acceleration sensor	Y	Y	Turbine housing	J1939-73	Applied outer force	Check degradation of the system	Monitor vibration index to predict the future state
Microswitch	Y	N	Compressor wheel	J1939-73	Alignment	Check degradation of the system	Microswitch inserted in the surface between abrasion face, wear under allowable level is considered to failure
Pressure sensor	N	Y	Oil circulation	J1939-73	Static pressure	Check pneumatic pressure normal	Measure pressure of inlet and outlet

기능과 관련된 입력과 출력 흐름은 파라미터로 분석되고, 흐름에 의해 도출된 인터페이스 관계로부터 파라미터 도출간 D-FMEA 방법론을 따라 분석할 수 있다[11,12].

디젤엔진 터보차저를 대상으로, D-FMEA 예시를 Table 1에 나타내었다. D-FMEA는 Current Design Controls Prevention과 Current Design Controls Detection을 포함하고 있는데, 설계에 의해 제시되는 예방책과 검출방법을 제시하도록 하고 있다. 이에 따라 D-FMEA 분석을 통해 어떤 장치의 정비방법, 운용한계, 고장 및 이상의 검출방법이 도출되고, 시스템의 심각도가 결정될 때 적용할 수 있는 센서를 알 수 있다. 또한, 정비 및 운용기준으로 설계에 의해 제시되는 검출방법이 고장의 감지방법으로 활용될 수 있으며, 이는 다시 제품의 고장 및 영향에 대해 CBM+를 적용하기 위한 센서에 포함될 수 있다.

4.3 센서추론

D-FMEA 분석을 활용하면 고장에 영향을 미치는 요소의 데이터를 측정하기 위해 어떤 센서를 부착시킬지와 우선순위 도출이 가능해진다. 즉, D-FMEA 결과와 기능

모델을 통해 고장 파라미터에 대한 진단 규칙이 도출되며, 이때, D-FMEA의 탐지방법은 센서선정간 우선적으로 고려된다. 이러한 예시로 디젤엔진의 터보차저를 대상으로 D-FMEA의 예시를 나타낸 Table 1에 대해 센서의 종류와 부착위치 등 센서 선정 결과를 Table 2에 나타내었다.

5. 결론

CBM+ 정책을 적용하기 위해 요구되는 시스템 최적화 과정을 위해 기존의 RCM 분석 프로세스를 대상으로, 기능분석과 D-FMEA에 기반한 최적화 방법을 개발하였다. 이에 따라 시스템 개발을 위한 설계초기단계에서 D-FMEA기반의 센서선정 추론 방법론을 제시하였으며, 얻어진 결과는 첫째, 시스템의 유지보수 최적화를 위해서는 CBM과 RCM을 포함한 CBM+에 의한 상태정보 시스템 구축이 필요하다. 둘째, CBM+ 적용을 위한 센서 선정은 설계초기단계의 기능 모델구성과 기능간 연결 및 통합 프로세스의 체계적인 수행이 요구된다. 셋째, 설계

초기단계의 D-FMEA 기반 센서추론 방법론과 절차를 디젤엔진 터보차저를 대상으로 제안하였다.

이러한 방법론의 제안을 통해 기존의 행위기반 기능분석 방법에 대해 물리량에 기반한 흐름기반 분석 방법으로 대체하여, 더 과학적 근거에 기반한 기능 표현이 가능해지고, D-FMEA의 수행시 요구되는 기능 분해간 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 추후 연구는 현재의 터보차저 단일 품목뿐만 아니라 장갑차의 전 체계를 대상으로 실시될 예정이다.

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.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1862678>
- [5] Chandrasekaran, B., Goel, A. Iwasaki, Y. "Functional Representation as Design Rationale" Computer, 26(1), pp. 48-56, 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1109/2.179157>
- [6] Umeda, Y., Kondoh, S., Shimomura, Y., Tomiyama, T., "Development of Design Methodology for Upgradable Products Based on Function Behaviour State Modelling", Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol 19, Cambridge University Press, pp. 161-182, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890060405050122>
- [7] Chittaro, L., Guida, G., Tasso, C., Toppano E., "Functional and Teleological Knowledge in the Multimodeling Approach for Reasoning about Physical Systems: A Case Study in Diagnosis." in IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 23(6), pp. 1718-1751, 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1109/21.257765>
- [8] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2829176>
- [9] USNAVY, "NEAVSEA RCM", 1993, pp. 49-71

- [10] US DoD, Mil-STD-1629A, pp. 18-28, 1998.
- [11] AIAG, Failure Mode and Effects Analysis 4th Edition Overview, pp. 15~66, 2013.
- [12] Bidokhti, N., "How to Close the Gap between Hardware and Software using FMEA", in Reliability and Maintainability Symposium, pp. 167-172, 2007.

신 백 천(Baek-Cheon Shin)

[정회원]



- 2017년 3월 : 금오공과대학교 기계시스템 공학과 (기계공학석사)
- 2017년 10월 ~ 2019년 10월 : 프론티스 대리
- 2022년 7월 : 금오공과대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2022년 7월 ~ 현재 : FD&P 엔지니어링 이사

<관심분야>

국방 체계 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, CBM+

허 장 욱(Jang-Wook Hur)

[정회원]



- 1987년 3월 ~ 1989년 2월 : 일본 동경공대 기계공학과 (박사)
- 2009년 1월 ~ 2011년 12월 : 방사청 KHP사업단 체계종합/사업총괄담당 (중령)
- 2012년 1월 ~ 2012년 8월 : 탄약사 기술관리처장(대령)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>

국방 체계 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, CBM+