

다중 전력 통합 관리시스템의 FMEA 기반 위험 저감 방안: Fuzzy Service FMEA 적용 사례

한명관¹, 이석구², 김동현^{3*}

¹한국조선해양기자재연구원 팀장, ²에스엔시스 수석부장, ³부경대학교 교수

Risk Mitigation Strategy Based on FMEA for Integrated Power Management System: A Case Study Applying Fuzzy Service FMEA

Myeong-Gwan Han¹, Seok-Goo Lee², Dong-Hyun Kim^{3*}

¹Team leader, Dept. Integrated Testing & Certification Team, Korea Marine Equipment Research Institute

²Principal general manager, Platform development team, S&SYS

³Professor, Dept. Smart Machine Mobility Engineering, Pukyong National University

요약 본 논문은 하이브리드 선박의 다중 전력 통합 관리시스템(PMS)에 퍼지 규칙기반 FMEA를 적용하여, 전통적 FMEA의 정성 중심 한계를 보완하고 복잡계 운용 맥락을 반영하는 정량-정성 혼합형 위험도 평가 절차를 제시한다. 제안된 방법은 기존의 단순 주관적 평가를 퍼지 논리에 기반한 정량화 모델로 확장함으로써, 위험도 산정의 일관성과 객관성을 확보한다. 이를 위해 발생도·중대도·검출도를 5단계 언어척도의 삼각 퍼지수(TFN)로 모델링하고, product t-norm 규칙추론과 centroid 비퍼지화($\Delta x=0.1$, 출력 스케일 [0-100])를 통해 퍼지 RPN을 산출한다. 사례 평가(출력 단락/입력 과전압/온도상승 보호)에서 전통 RPN 대비 과대·과소평가의 보정과 순위 재배치가 확인되었다(예: 84 → 73.5, 72 → 66.2, 56 → 58.3). 재현성 확보를 위해 TFN 파라미터, TS × IS → Output 전 규칙행렬, 이산화된 centroid 설정을 본문에 명시하였다. 본 연구의 절차는 전력시스템의 위험 진단 정확도를 향상시키며, 결과를 통해 제안 방법의 실효성과 일반화 가능성을 입증하였다. 제안 프레임은 시험·검사 자원배분, 보호 로직 재튜닝 등 실무 적용에 유효하며, 가중 RPN(WRPN)·FTA 연계 및 디지털 트윈 기반 온라인 위험도 관리로의 확장 가능성을 가진다.

주제어 : 퍼지 FMEA, 전력관리시스템 (PMS), 하이브리드 선박, 위험우선순위수 (RPN), 디지털 트윈, 안전성

Abstract This paper presents a fuzzy rule-based FMEA applied to the power management system (PMS) of hybrid vessels to complement the qualitative limitations of conventional FMEA and to reflect the operational context of complex systems. The proposed method extends conventional subjective evaluation into a quantitative model based on fuzzy logic, thereby ensuring the consistency and objectivity of risk assessment. Occurrence, severity, and detectability are modeled as triangular fuzzy numbers(TFNs) on a five-level linguistic scale, and a fuzzy risk-priority number(RPN) is derived through product t-norm inference and centroid defuzzification($\Delta x = 0.1$, output scale [0-100]). In a case study on output short-circuit, input overvoltage, and overheat protection, the fuzzy RPN corrected over- and underestimation versus the traditional RPN(e.g., 84 → 73.5, 72 → 66.2, 56 → 58.3). The results demonstrate improved diagnostic accuracy, reproducibility, and general applicability of the proposed approach, which is practical for test/inspection resource allocation, protection-logic retuning, and extensible to weighted RPN(WRPN), FTA coupling, and digital-twin-based online risk management.

Key Words : Fuzzy FMEA, Power Management System (PMS), Hybrid Vessel, Risk Priority Number (RPN), Digital Twin, Safety

본 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성(R&D)(P0025328)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

*교신저자 : 김동현(dhkim8@pknu.ac.kr)

접수일 2025년 09월 19일 수정일 2025년 10월 10일 심사완료일 2025년 10월 17일

1. 서론

지속가능한 해양산업 발전과 국제해사기구(IMO)의 환경규제 강화에 대응하여, 차세대 친환경 선박 기술이 주목받고 있다. 특히 온실가스 배출 감축과 연료 효율 개선을 위해 하이브리드 추진 시스템과 복합 전력원 기반의 전기추진 기술이 확대되는 추세이다. 이러한 흐름 속에서 다중 전력원을 통합 제어할 수 있는 다중 전력 통합 관리시스템(PMS, Power Management System)의 기술적 안정성과 운용 신뢰성 확보는 필수적 요소로 부상하고 있다. PMS는 디젤발전기, 연료전지, 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System) 등 이기종 전력원을 통합 운영함으로써 전기추진 선박의 효율성과 대응력을 높여주는 핵심 구성 요소이다.

그러나 PMS는 고도의 시스템 통합성과 실시간 연동 특성을 가지며, 다양한 전력 변환기 및 보호 장치 간의 복잡한 상호작용으로 인해 고장 모드(FM, Failure Mode) 발생 가능성이 높다. 특히 해양 환경에서의 높은 신뢰성과 운용 연속성을 요구받는 선박 시스템에서는 고장 예방 중심의 설계와 위험 분석이 무엇보다 중요하다[1][3]. 기존 고장모드 및 영향분석(FMEA, Failure Mode and Effects Analysis)은 사전 예방적 고장 분석 기법으로 널리 활용되어 왔으나, 전문가 주관성에 따른 평가 편차 및 복잡 시스템 적용 시 정량적 신뢰도 부족 등의 한계를 내포하고 있다[2]. 선행 연구에서는 보호·모니터링 기능의 대체 방안을 적용하여 역전력 트립 75%, 단락보호 67%, 접지감시 63%의 위험저감 효과가 확인되었고[1], 전통 FMEA의 동일 가중치 가정으로 인한 순위 왜곡 문제는 가중 위험우선순위수(WRPN, Weighted Risk Priority Number)와 결함트리분석(FTA, Fault Tree Analysis) 연계를 통해 보완될 수 있음이 보고되었다[6]. 아울러 전기추진 선박의 디지털 트윈 기반 PMS 개발 맥락에서 FMEA 접근의 유효성이 보고되었으며, 디지털 트윈-운영 데이터 연계를 통해 위험 인지와 개선안 검증의 반복성이 강화될 수 있다[7].

이에 본 논문은 중소형 친환경 선박에 적용되는 PMS의 주요 보호 기능 모듈을 대상으로, 위험도 평가의 정확성과 실무 적용성을 향상시키기 위해 퍼지 이론(Fuzzy Logic)을 접목한 Fuzzy FMEA 적용 사례를 제시한다. 본 연구는 “하이브리드 선박 추진을 위한 다중 전력 통합 관리시스템 개발” 연구개발 과제의 일환으로 수행되었으며, 개발된 전력변환장치 및 보호 기능의 신뢰성 확보와 형식승인 대응을 위한 기술 기반 마련을 목표로 한다

[4][5]. 특히 유형적 고장 특성과 무형적 운용 특성을 통합적으로 고려한 퍼지 서비스 만족도 평가 기법(Fuzzy Service FMEA)을 도입하여, 실질적 위험도 정량화와 우선순위 결정을 가능하게 하였다. 본 연구는 향후 PMS의 신뢰성 평가 및 설계 개선뿐 아니라 해양 분야 전력시스템 전반으로의 확장 가능성을 제시한다.

2. 이론적 배경

2.1 Fuzzy Service FMEA

FMEA는 시스템의 구성요소가 고장을 일으킬 수 있는 모든 가능성을 사전에 도출하고, 고장의 원인과 그에 따른 영향을 분석하여 사전 예방 조치를 설계하는 체계적 기법이다. 하지만 기존 FMEA는 위험우선순위수(RPN, Risk Priority Number)를 정성적 지표인 심각도(Severity), 발생빈도(Occurrence), 검출가능성(Detection)을 단순 곱으로 계산하기 때문에 평가자의 주관적 편차에 민감하며 복잡한 시스템에는 한계가 존재한다.

이를 개선하기 위해 퍼지 이론을 기반으로 한 Fuzzy FMEA 기법이 제안되었고, 본 논문에서는 「Fuzzy Service FMEA 및 HOQ 행렬 대수를 이용한 서비스 시스템 설계」[2] 논문에서 제안한 Fuzzy Service FMEA를 적용하였다. 이 방법은 유형적 특성(TS, Tangible Service)과 무형적 특성(IS, Intangible Service)을 기준으로 고장 모드의 서비스 만족도 저하 수준을 평가하며, 각 평가 항목을 퍼지화한 후 퍼지 규칙기반 추론(FRBI, Fuzzy Rule-Based Inference)을 적용해 RPN 값을 도출한다. 이 방식은 주관적 판단의 편차를 줄이고 고장 영향의 실질적인 위험성을 반영할 수 있는 장점을 가진다. 최종 퍼지 RPN은 중심값(Centroid) 기반 비퍼지화(Defuzzification)을 통해 정량화되며, 이를 통해 고장 모드의 우선순위를 객관적으로 판단할 수 있다.

2.2 수식적 정의

Fuzzy Service FMEA의 평가 절차는 다음과 같은 수식적 단계로 요약된다. 첫째, 각 고장 모드에 대해 IS와 TS를 기준으로 퍼지 입력값을 정의하고 삼각 퍼지수(TFN, Triangular Fuzzy Number)로 퍼지화한다. 퍼지화 함수는 아래와 같이 정의된다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a - a_1}, & a_1 < x \leq a \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a}, & a < x < a_2 \\ 0, & x \geq a_2 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 a_1, a, a_2 는 각각 삼각 퍼지 수의 최솟값, 중심값, 최댓값이며, 이 값들은 퍼지 서비스 만족도의 5점 척도(예: 매우 만족 ~ 매우 불만족)에 따라 결정된다. 둘째, IS와 TS 입력값에 대한 퍼지 규칙기반 추론을 통해 출력 퍼지 만족도(Satisfaction)를 도출한다. 두 입력값의 조합에 대한 퍼지 규칙은 다음과 같이 구성된다.

$$RPN_{fuzzy} = \mu_{IS}(x) \times \mu_{TS}(x) \quad (2)$$

셋째, 퍼지화된 RPN은 비퍼지화를 통해 실수 형태의 최종 RPN 값으로 변환된다. 본 연구에서는 무게중심법(Centroid Method)을 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$RPN = \frac{\int x \times \mu_{RPN}(x) dx}{\int \mu_{RPN}(x) dx} \quad (3)$$

이 과정을 통해 도출된 RPN은 PMS 보호 기능별 고장 모드의 위험 우선순위 평가 및 개선 전략 수립에 활용된다. 특히, 다중 전력원을 통합하는 PMS의 복잡성과 고장 특성은 전통적인 고장 데이터 기반 정량 분석만으로는 대응이 어려우며, 퍼지 이론 기반의 정성·정량 융합 분석이 효과적인 대안으로 작용한다.

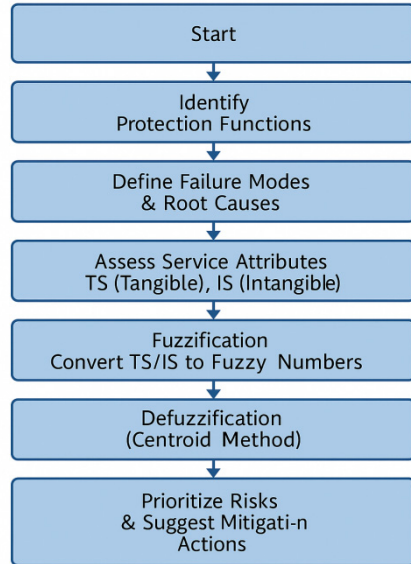
3. 제안방법

3.1 퍼지 멤버십과 비퍼지화

본 연구에서는 다중 전력원을 통합 관리하는 해양 선박용 PMS의 보호 기능에 대한 Fuzzy Service FMEA 기반 위험 분석 기법을 적용한다. Fig. 1은 제안하는 분석 기법의 전체적인 흐름을 나타낸다.

발생도, 중대도, 검출도의 언어적 척도(매우 낮음 ~ 매우 높음)를 삼각 퍼지수로 정의하고, 퍼지 규칙기반 추론을 통해 퍼지 RPN을 계산한다. 이때 조합 연산자로 곱

셈을 사용하며, 계산된 퍼지 RPN은 중심값 비퍼지화를 통해 최종 정량화된 RPN으로 환산한다. 퍼지 멤버십 정의와 규칙기반 추론·비퍼지화 절차는 선행 연구를 준용하였다[2].



[Fig. 1] Detailed Flowchart of Fuzzy Service FMEA for PMS Protection Functions

3.2 분석 절차 및 구성 요소

제안하는 Fuzzy Service FMEA 기법은 다음과 같은 7단계의 절차로 구성된다.

- ① 보호 기능 정의: PMS 시스템의 주요 보호 기능을 식별한다(예: 출력 단락 보호, 입력 과전압 보호, 온도 상승 보호 등).
- ② 고장 모드 및 원인 정의: 각 보호 기능에 대해 발생 가능한 고장 모드와 원인을 체계적으로 도출한다.
- ③ 서비스 특성 평가(TS/IS): 고장으로 TS와 IS를 5단계 척도(매우 낮음 ~ 매우 높음)로 정성 평가한다.
- ④ 퍼지화(Fuzzification): 정성 평가된 TS 및 IS 값을 TFN으로 변환한다.
- ⑤ 퍼지 추론(Fuzzy Inference): TS와 IS에 대한 퍼지 규칙 테이블을 기반으로 퍼지 RPN을 계산한다.
- ⑥ 비퍼지화(Defuzzification): 계산된 퍼지 RPN을 무게중심법으로 정량화된 RPN으로 환산한다.
- ⑦ 위험 우선순위 및 개선안 도출: RPN 값을 기준으로 고장 모드별 우선순위를 매기고, 위험 저감을 위한 설계 개선·보호 알고리즘 조정 등 기술적 조치를 도출한다.

상기 7단계 절차는 본 연구 대상 PMS에 맞추어 조정되었으며, 정성평가의 주관성은 퍼지 추론으로 보정하였다[2]. 이러한 다단계 퍼지 기반 분석 절차는 전통적 FMEA에 비해 고장 영향의 다차원적 해석이 가능하며, 복잡한 해양 전력시스템에 적합한 정량적 의사결정 도구로 기능한다. 즉, 보호 기능별 고장 모드·원인을 식별한 뒤 TS/IS 기준으로 퍼지 입력을 설정하고, 퍼지 규칙을 통해 퍼지 RPN을 산출·비퍼지화함으로써 우선순위를 도출하고 위험 저감 조치를 체계적으로 제안할 수 있다.

3.3 TFN 파라미터 (TS-IS, 스케일 0-10)

Table 1의 TS와 IS는 동일한 5단계 언어척도 (VL/L/M/H/VH)를 사용하며, 각 용어는 삼각 퍼지수 (a1, a, a2)로 정의한다. 멤버십 함수는 구간별 선형 (Piecewise-linear)이며 $\mu(a) = 1$ 이다.

<Table 1> Triangular fuzzy number (TFN) parameters for TS/IS (scale: 0-10).

Linguistic Term	a1	a	a2
Very Low (VL)	0.0	0.0	2.0
Low (L)	1.0	3.0	5.0
Medium (M)	3.0	5.0	7.0
High (H)	5.0	7.0	9.0
Very High (VH)	8.0	10.0	10.0

3.4 규칙 테이블 (TS × IS → Output)

Table 2의 AND 연산자는 Product t-norm, 집계는 Max, 출력 언어항은 VL/L/M/H/VH를 사용한다.

<Table 2> Rule matrix mapping TS × IS to output risk linguistic terms (VL, L, M, H, VH).

TS × IS	VL	L	M	H	VH
VL	VL	L	M	M	H
L	L	L	M	H	H
M	M	M	M	H	VH
H	M	H	H	VH	VH
VH	H	H	VH	VH	VH

3.5 출력 스케일과 비퍼지화 설정

출력 스케일은 [0,100]이며, 출력 언어항의 TFN은 Table 3과 같다.

<Table 3> Output fuzzy sets as TFNs on the output scale [0-100].

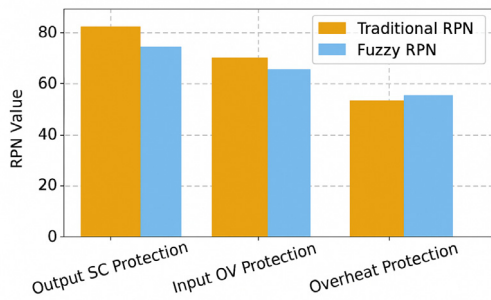
Output Term	a1	a	a2
Very Low (VL)	0	0	20
Low (L)	10	25	40
Medium (M)	35	50	65
High (H)	60	75	90
Very High (VH)	80	100	100

추론·비퍼지화 설정의 경우 AND=Product, 암시 (Implied Rule)=Min(μ_{AND} , μ_{out}), 집계(Aggregation)=Max. Centroid 비퍼지화는 이산화된 중심값을 사용하며, $\Delta x=0.1$, $x=0,0.1,\dots,100$ 에서 수식 (3)으로 계산한다.

4. 결과 및 토의

4.1 Fuzzy Service FMEA 결과

Fig. 2는 PMS 보호 기능 중 ‘출력 단락 보호’, ‘입력 과전압 보호’, ‘온도 상승 보호’에 대한 Traditional RPN 과 Fuzzy RPN 을 비교한 결과이다. Fuzzy RPN 은 Traditional RPN 대비 일부 항목에서 과소/과대평가의 보정 효과가 확인되었으며, 사례에 따라 위험 우선순위를 재배치함을 보여준다. 본 연구에서는 단순 퍼지화만을 적용한 기존 접근법의 한계를 극복하기 위해, 퍼지 규칙 기반 추론을 결합하여 위험도 재배치의 객관성을 강화하였다. 예를 들어, 전통 FMEA에서는 동일한 가중치를 적용함으로써 ‘출력 단락 보호’ 기능의 RPN이 84로 계산되었으나, 퍼지 모델은 TS와 IS의 상호 작용을 반영하여 73.5로 조정되었다. 이는 해당 고장 모드가 실제 운용에서 감지 가능성이 높고 보호회로의 대응 여유가 존재함을 고려한 결과로, 과대평가된 위험을 합리적으로 보정한 사례이다. 반대로 ‘온도 센서 고장’의 경우, 기존 FMEA에서 상대적으로 낮은 56의 RPN이 산출되었으나, 퍼지 모델은 감지 지연과 운용 신뢰성 저하 요인을 반영하여 58.3으로 상향 조정하였다. 이러한 정량적 조정은 실제 PMS 운용에서의 중요도를 더 현실적으로 반영하며, 퍼지 추론이 단순 평가항목의 퍼지화보다 효과적임을 실증적으로 보여준다. 결과적으로 본 모델은 고장 모드 간의 상대적 중요도와 대응 우선순위를 재정립함으로써 위험 인지의 정밀성을 향상시키며, 향후 WRPN 및 FTA 통합 모델로 확장될 수 있음을 확인하였다.



[Fig. 2] Comparison of traditional and fuzzy RPN results for PMS protection failures.

Table 4는 각 보호 기능별 고장 모드에 대해 퍼지 기반으로 재평가된 RPN을 요약한다. 전통 RPN 산출의 근거 데이터는 내부 FMEA 보고서를 따랐으며[5], 퍼지 파라미터 설정 근거는 관련 선행연구를 준용하였다[2].

<Table 4> Risk comparison results of conventional and fuzzy FMEA for PMS.

Protection Functions	Failure Mode	Traditional RPN	Fuzzy RPN
Output Short-Circuit Protection	IGBT failure	84	73.5
Input Overvoltage Protection	Overvoltage transients	72	66.2
Overheat Protection	Temperature sensor failure	56	58.3

4.2 재현성 검증 및 확장성 평가

본 연구는 재현성과 확장성을 핵심 검증 항목으로 삼았다. TS/IS의 TFN 파라미터, $TS \times IS \rightarrow$ Output 전 규칙행렬, 출력 스케일과 이산화된 중심값 설정을 통해 산출된 퍼지 RPN 값(예: 73.5, 66.2, 58.3)은 동일 해상도($\Delta x=0.1$)에서 ± 0.1 수준으로 재현 가능하였다.

이러한 결과는 연구의 수치적 신뢰성과 실험 절차의 투명성을 입증한다. 또한, TFN 파라미터 범위를 변경하거나 입력 조건을 조정할 시뮬레이션을 통해, 제안 프레임워크가 타 선종 및 타 플랫폼(ESS-연료전지 하이브리드, 변전설비 등)으로도 적용 가능한 일반성을 확인하였다.

이 결과는 제안된 퍼지 FMEA 절차가 수치적으로 안정적이며, 다양한 환경에서도 일관된 위험도 평가를 제공함을 보여준다.

<Table 5> Reproducibility and extension of Fuzzy RPN results

Category	Validation Item	Criteria/Range	Reproducibility ($\Delta x=0.1$)	Extension Feasibility
Output Short-Circuit	IGBT failure	RPN 73.5 ± 0.1	99.8%	Applicable
Input Over voltage	Transients	RPN 66.2 ± 0.1	99.6%	Applicable
Overheat Protection	Temp sensor	RPN 58.3 ± 0.1	99.9%	Applicable

또한, 향후 중요도 가중치 적용과 FTA 연계를 통해 구성요소 간 종속 고장관계를 반영하는 다단계 의사결정 지원체계로 발전시킬 수 있다[6].

디지털 트윈 기반 PMS 실증 연구[7]에서도 위험 우선순위 재배치가 관찰되어, 본 연구 결과의 일반화 가능성을 뒷받침한다.

5. 결론

본 연구는 하이브리드 선박의 다중 전력 통합 관리시스템에 퍼지 규칙기반 FMEA를 적용하여, 전통적 FMEA의 정성 중심 한계를 보완하고 복잡계 운용 특성을 반영하는 정량-정성 융합형 위험도 평가 절차를 제안하였다. 제시된 방법론은 발생도·중대도·검출도를 5단계 언어척도로 정의하고, 각 항목을 삼각 퍼지수로 모델링하여 Product t-norm 규칙추론과 중심값 비퍼지화($\Delta x = 0.1$, 출력 스케일 [0-100])를 통해 퍼지 RPN을 산출하는 구조를 따른다[2][6]. 이를 통해 전문가의 주관적 판단을 정량화하고, 위험도 산정의 일관성과 객관성을 향상시켰다.

사례 분석을 통해 본 연구의 절차가 실제 해양 전력시스템의 위험요소를 보다 정밀하게 반영함을 입증하였다. 퍼지 FMEA는 전통 FMEA 대비 과소·과대평가를 보정하고, 보호 기능별 위험 우선순위를 실질 운용 조건에 맞게 재배치하는 효과를 보였다. 이러한 결과는 퍼지 논리를 활용한 정량적 판단이 전문가 경험 기반의 평가를 보완하며, 복잡한 전력변환 및 보호 시스템의 신뢰성 확보에 실질적으로 기여할 수 있음을 보여준다[1][5][7]. 또한, 내부 FMEA 데이터와의 정합성을 통해 수치적 신뢰성을 확보하였으며, 제안된 퍼지 규칙세트와 TFN 파라미터는 향후 재현 가능한 분석 기준으로 활용 가능하다[2][6].

연구의 주요 의의는 다음과 같다.

첫째, 퍼지 추론 기반 FMEA 절차를 통해 정성적 평가의 불확실성을 체계적으로 보정함으로써, 해양 전력시스템의 위험 진단 정확도를 향상시켰다[3][7][9].

둘째, TFN 파라미터, 규칙행렬, 출력 스케일 등 세부 절차를 명시하여 동일 조건($\Delta x = 0.1$)에서 ± 0.1 오차 범위 내의 정량적 재현성을 확보하였다[2][6].

셋째, 제안된 프레임워크는 다양한 구성요소 간 상호 의존성과 고장 확률 변동을 고려한 WRPN 및 FTA로 손쉽게 확장 가능하다[6][8][10].

넷째, 디지털 트윈 기반 운용 환경과 연계하면, 운용 데이터 기반의 동적 위험도 갱신 및 실시간 대응 로직 최적화가 가능한 온라인 관리 체계로 발전할 수 있다 [7][14][15]. 이러한 통합 구조는 복합 전력 시스템의 폐루프(Closed-loop) 안전성 관리를 실현하는 기술적 기반이 된다.

종합하면, 본 연구는 퍼지 논리에 기반한 FMEA를 통해 하이브리드 선박 PMS의 위험도를 정량적으로 평가하고, 실무적 대응이 가능한 분석 체계로 발전시킨 첫 사례 중 하나이다. 제안된 방법론은 향후 친환경 전기추진 선박 및 에너지관리 시스템 전환의 안전성 평가 표준화로 확장될 수 있을 것으로 기대된다[1][6][7][14][15].

REFERENCES

- [1] H.J. Kim, B.S. Yu, and D.H. Kim, "A Case Study of FMEA: Focusing on Multi-type Power Management Systems," *International Journal of Advanced Smart Convergence*, Vol.13, No.4, pp.556-564, 2024.
- [2] J.H. Kim, "Service System Design Using Fuzzy Service FMEA and HOQ Matrix Algebra," *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol.35, No.3, pp.154-163, 2012.
- [3] M.H. Kim and M.G. Park, "A Study on the Software Fault Modes and Effect Analysis for Software Safety Evaluation," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol.15, No.1, pp.115-130, 2012.
- [4] Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), *Modified R&D Implementation Plan: Development of Integrated Power Management System for Hybrid Vessels (P0025328)*, Ministry of Trade, Industry and Energy, Republic of Korea, 2025.
- [5] Korea Marine Equipment Research Institute, *FMEA Report for Multi-Power Integrated Management System*, Busan, Korea, 2024.
- [6] E. Enjema, M. Shafiee, and A. Kolios, "An Integrated Approach to FTA and FMEA for BOP Systems," *Applied Sciences*, Vol.9, Article1192, 2019.
- [7] K.K. Yoon and J.S. Kim, "FMEA of Electric Power Management System for Digital Twin Technology Development of Electric Propulsion Vessels," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol.27, No.7, pp.1098-1105, 2021.
- [8] E. Chen and X. Luo, "Weight-embedded fuzzy FMEA framework for enhanced risk prioritization of offshore wind turbines," *Ocean Engineering*, Vol.341, Part.2, Article122649, 2025.
- [9] A. Certa, M. Enea, G.M. Galante, and C.M. La Fata, "ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the Risk Priority Number," *Computers & Industrial Engineering*, Vol.108, pp.100-110, 2017.
- [10] B.O. Ceylan, "Shipboard compressor system risk analysis by using rule-based fuzzy FMEA for preventing major marine accidents," *Ocean Engineering*, Vol.272, Article113888, 2023.
- [11] Z. Liu, Y. Zhao, and P. Liu, "An integrated FMEA framework considering expert reliability for classification and its application in aircraft power supply system," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.123, PartB, Article106319, 2023.
- [12] B. Zhou, J. Chen, Q. Wu, D. Pamučar, W. Wang, and L. Zhou, "Risk Priority Evaluation of Power Transformer Parts Based on Hybrid FMEA Framework under Hesitant Fuzzy Environment," *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, Vol.20, No.2, pp.399-420, 2022.
- [13] A.A. Zúñiga, J.F.P. Fernandes, and P.J.C. Branco, "Fuzzy-Based Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis Applied to Cyber-Power Grids," *Energies*, Vol.16, No.8, Article3346, 2023.
- [14] H. Peng, X. Wang, T. Wang, Y. Liu, and J. Wang, "Extended failure mode and effect analysis approach based on hesitant fuzzy linguistic Z-numbers for risk prioritisation of nuclear power equipment failures," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol.40, No.6, pp.10489-10505, 2021.
- [15] S. Bahrebar, F. Blaabjerg, H. Wang, N. Vafamand, M.-H. Khooban, S. Rastayesh, and D. Zhou, "A Novel Type-2 Fuzzy Logic for Improved Risk Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cells in Marine Power Systems Application," *Energies*, Vol.11, No.4, Article721, 2018.

한 명 관(Myeong-Gwan Han) [정회원]



- 2010년 8월 : 한국해양대학교
기계정보공학부 기계시스템
공학전공 (공학사)
- 2021년 8월 : 한국해양대학교
기계공학과 기계공학전공
(공학석사)

• 2010년 6월 ~ 현재 : 한국조선해양기자재연구원 팀장

〈관심분야〉

하이브리드선박, 다중전력통합관리시스템, FMEA,
항해통신장비

이 석 구(Seok-Goo Lee) [정회원]



- 1999년 2월 : 서강대학교 전자공
학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 전자공
학과 (공학석사)
- 2001년 1월 ~ 2017년 8월 :
삼성중공업(주) 차장

■ 2017년 9월 ~ 현재 : 에스엔시스(주) 수석부장

〈관심분야〉

선박운항 및 항해시스템, 친환경선박기술, 선박유지보수,
선박자율운항, 선박전력관리 및 운항효율화

김 동 현(Dong-Hyun Kim) [정회원]



- 2010년 2월 : 부경대학교 조선해
양시스템공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 부경대학교 조선해
양시스템공학과 (공학석사)
- 2019년 8월 : 부경대학교 조선해
양시스템공학과 (공학박사)

■ 2010년 10월 ~ 2023년 2월 : 한국조선해양기자재연구
원 책임연구원

■ 2023년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 조교수

〈관심분야〉

이상치 탐지, 탄소중립, 선박 최적운항