

전기복합 추진어선용 전기추진 기자재 FMEA 분석 및 적용 방안

안두산*, 조현창*, 이상택*
한국전자기술연구원*

Electric Propulsion Equipment FMEA Analysis & Application Methods for Electric-Hybrid Fishing Ship

Du-San An*, Hyun-Chang Cho*, Sang-Taek Lee*
Korea Electronics Technology Institute*

Abstract - 선박분야에 전기추진방식을 적용하기 위한 다양한 연구가 이어지고 있다. 선박 전기추진 시스템에는 대용량배터리와 전력변환장치, 모터 등 전기장치와 디젤엔진, 통합제어시스템이 복합적으로 연계되어 있다. 일부 구성요소의 이상이 전체 시스템 또는 상호 간에 미치는 영향관계를 파악하고 특히 화재, 시스템 정지 등으로 인한 사고 가능성을 확인하여 사전에 예방할 필요가 있다. 선박설계에 있어 HAZID, HAZOP, FMEA 등과 같은 위험성분석도 강조되고 있는 만큼 본 연구에서는 전기복합 추진어선에 FMEA를 적용하는 방안을 분석하였다. FMEA가 다양한 산업분야에 확산 적용되는 과정에서 분석방식 등에 다소간의 변화를 거쳐왔으나 가장 일반적으로 활용되고 있는 양식을 기준으로 그 구성과 적용방안에 대해 분석하였다.

1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 높아지며 오염물질 배출에 대한 규제도 강화되고 있다. 선박분야에서도 IMO 규정을 통해 환경관련 규정이 강화되어 이에 대응하기 위한 기술이 개발되고 있다. 특히 전기추진시스템을 선박에 적용하기 위한 연구가 활발히 이어지고 있다.

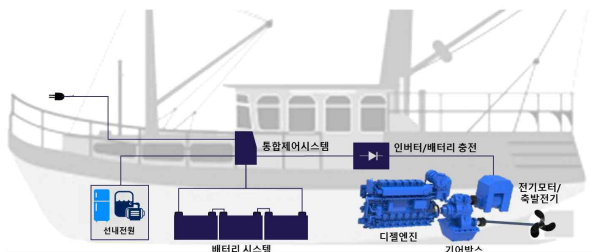
한편, 산업 내 안전에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 설계 및 생산공정 단계에서 발생할 수 있는 위험을 예방하기 위한 HAZID, HAZOP, FMEA 등과 같은 위험성 분석이 시행되고 있다. 전기모터, 대용량배터리, 전력변환장치, 전력저장장치 등을 포함하는 전기추진 선박의 활용과 보급을 위해서 다양한 사고요인을 예방하기 위한 위험성 분석은 더욱 중요하다.

본 연구에서는 전기복합 추진어선에 FMEA를 적용하기 위한 방안을 검토하였다. 현재 가장 일반적으로 활용되고 있는 FMEA 양식을 기준으로 전기복합 추진어선 추진시스템에 적용 시 합리적인 분석범위를 설정하고 평가기준의 개선방안을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 전기복합 추진어선 핵심 기자재의 구성

전기복합 추진어선의 추진체계는 크게 통합제어시스템, 배터리시스템, 전력변환시스템, 추진동력시스템으로 구성되어 있다. <그림1>에서 그 구성과 연결관계를 나타내고 있다.



<그림 1> 전기복합 추진선박 추진시스템 구성

2.2 FMEA의 개념 및 특징

FMEA는 설계 및 공정의 단계에서 제품 및 시스템을 구성하고 있는 요소들의 잠재적 고장(Failure)의 유형과 원인, 그로 인한 영향을 분석·평가하고 문서화함으로써 제품 또는 시스템의 설계, 생산, 운영상 발생할 수 있는 위험성을 축소하고 고장예방을 위한 관리대책을 수립하는 정성적 신뢰성 확보 방법이다.

FMEA기법이 1950,60년대에 국방 및 우주항공분야에서 최초로 활용된 이후 각 산업분야에 확산되는 과정에서 수행방법 및 양식에 다소간의 변화를 거쳐 왔다. 수행주체와 분야에 따라 적용하고자 하는 FMEA의 구성과 평가방식에 차이가 있을 것이나 가장 일반적으로 사용되는 QS9000(현재 IATF16949)의 FMEA 양식을 기준으로 그 특징을 먼저 살펴보고자 한다.

2.2.1 작성항목

FMEA문서 작성 시 기재할 내용은 <표 1>과 같이 분석대상이 되는 부품명 또는 기능, 고장유형, 영향, 원인, 현재관리내용과 평가지표로서 심각도(Severity), 발생도(Occurrence), 검출도(Detection)와 이들을 산술적으로 곱한 위험우선순위(RPN, Risk Priority Number, RPN=S*O*D)로 구성된다.

<표1> FMEA 문서 작성항목

부품명 / 기능	잠재적 고장유형	잠재적 영향	심각도 (S)	잠재적 원인/메커니즘	발생도 (O)
현재 설계관리	발견도 (D)	조치우선순위 (RPN)	권고 조치사항	예상 조치결과	

2.2.2 절차

FMEA는 시스템을 구성하는 각 부분의 전문적 의견이 필요하므로 하위시스템 또는 부품의 전문가들과 FMEA절차에 대한 이해도가 높은 리더로 구성된 팀 단위로 수행된다. 구체적 수행절차는 아래 <표2>로 나타내었다.

<표2> FMEA 수행절차

사전 준비	① 팀구성 ② 분석대상 및 범위결정 ③ 자료준비 (설계정보, 사용환경, 유사부품 고장DB 등)	
기능 정의	④ 시스템 및 부품의 기능 정의 ⑤ 시스템 분해수준 결정 ⑥ 기능별 블록도 작성(FBD) 작성 ⑦ 신뢰성 블록도 작성(RBD) 작성	
FMEA 작성	고장 분석	⑧ 부품/기능별 고장모드 열거 및 선정 ⑨ 영향, 원인/메커니즘, 현 설계관리 작성
	평가	⑩ 심각도, 발생도, 검출도 및 RPN 작성
	조치	⑪ 조치가 필요한 중요항목 선정 ⑫ 조치 및 개선방안 작성 ⑬ 조치 후의 RPN 계산출

2.2.3 장점 및 한계

설계나 공정 단계의 사전에 잠재적 고장과 관련된 인과관계를 탐색함으로써 실제 시스템의 설계나 운영 시 발생할 수 있는 위험을 줄이고 제품의 신뢰성을 확보할 수 있다. 한번 작성된 FMEA문서는 향후 관리개선활동의 지침이 되며 설계의 수정이나 환경변화 시에도 참고자료로 활용된다.

우주항공 분야에서 시작된 만큼 시스템을 세분화하여 단계적(Step-by-Step)으로 고장모드를 분석함으로써 기능적 인과관계 파악이 용이하고 시스템에 대한 전체적인 이해도가 향상된다.

RPN을 통해 산출된 우선순위는 제한된 시간과 인력을 효율적으로 활용할 수 있도록 해준다. 하지만 RPN을 구성하는 세 변수는 모두 동일한 중요도를 가지며 변수 간 상대적인 중요도는 고려되지 않는다.

분석 및 평가를 참여하는 전문가의 개인적 경험과 주관적 판단에 의지하므로 평가의 신뢰도 및 객관성이 낮아질 수 있다.

2.3 FMEA 적용 방안

전기복합 추진어선의 핵심 기자재에 대해 FMEA를 적용하기 위해 구체적 분석방안 및 평가기준을 검토하였다.

2.3.1 분석범위

① 분석범위 및 세분화 : 선박전체 시스템 중 연구대상인 전기추진시스템 이하의 서브시스템 및 기자재 부품에 대해 분석하였다. 전기추진시스템은 위에 언급한 것처럼 통합제어시스템, 배터리시스템, 전력변환시스템, 추진시스템의 서브시스템으로 구성되어 있고 서브시스템을 구성하는 부품은 개발대상이 되는 핵심 기자재와 고장의 원인 및 영향이 되는 중요 부품들로 구성하였다.

② 시스템 분석 : 보통 FMEA는 시스템을 구성하는 각 부품의 고장모드를 분석하여 상위 시스템에 미치는 영향을 파악하는 상향적 분석기법으로 인식된다. 하지만 고장모드를 분석하는 과정엔 전체 시스템에 대한 관점이 필요해 하향적 특성도 포함하고 있다. 각 FMEA의 표준마다 적용방식은 다소 차이는 있지만 최근의 FMEA표준은 시스템FMEA 또는 개념FMEA라는 이름으로 시스템적 접근 절차를 포함할 것을 권장하고 있다. 2001년에 발간한 AIAG의 매뉴얼 3차 개정판에서는 시스템·서브시스템·부품FMEA를 구분 실시를 제시하였고, 2004·2011년 발간된 Ford사 핸드북에서는 설계초기단계에서 설계FMEA 실시 전에 개념FMEA를 실시하도록 하였다. AIAG-VDA 통합매뉴얼에서는 시스템과 하위 부품을 구분하지 않고 전체적 관점에서의 FMEA분석을 권고하고 있다.

본 연구에서는 하위시스템에 대한 상세한 고장분석 전에 전체 시스템의 계층적 영향관계를 파악하고 개념적 설계를 하는 단계로서 시스템FMEA를 적용하고자 한다. 고장분석 대상에 대한 분류 및 가이드라인을 전체시스템 관점에서 먼저 제시하고 이후 상세 시스템의 고장 영향과 원인을 파악하는 과정에서 전체적인 고장모드에 대해 상향적으로 재정리하는 방법을 선택하였다.

2.3.2 우선순위 평가기준

① 일반적인 평가기준(RPN) 심각도 * 발생도 * 검출도

RPN은 평가변수의 상대적 중요도 미고려 등의 한계가 지적되고 있어, 대안으로서 기존에 존재하던 방식과 새롭게 연구되고 있는 방안들도 고려해 볼 수 있다.

② RPN의 기존 대안 : 일반적으로 사용되는 RPN 방식 외에 MIL-P-1629와 같은 FMECA는 FMEA와 별도로 치명도 분석 또는 위험도 평가를 추가적으로 시행한다. AIAG-VDA 매뉴얼에서는 RPN대신 심각도, 발생도, 검출도 순으로 중요도를 부여, 단계적으로 검토하여 조치우선순위(AP) 등급을 부여하는 방법을 적용하였다.

$$\cdot \text{치명도 분석} : C_m = \beta \times \alpha \times \lambda_p \times t$$

(β : 고장영향확률, α : 고장유형비, λ_p : 품목고장률, t : 운영시간)

· 위험도 평가(Risk Matrix) : Frequency*Consequence

③ 최근 연구되는 방안 : 계층화분석법(AHP)과 같은 다기준 의사결정 방법과 퍼지추론을 적용하는 방법 등이 제시되고 있

다. 하지만 이와 같은 개선안들이 복잡하고 시간이 많이 소요되기 때문에 실제 현장에서는 기존의 RPN방식이 적용되고 있고 기타 개선방안은 연구 차원에서만 활용되고 있다.

2.4 실제 적용

일반적으로 활용되는 QS9000양식과 RPN 평가방식을 사용하여 시스템FMEA와 하위 시스템 및 부품에 대한 FMEA를 실시하였다. RPN의 세 변수값은 1~5(5단계)로 부여하였다.

부품명/기능정의	잠재적 고장형태	부품	고장의 잠재적 영향		심각도 (S)	발생도 (O)	검출도 (D)	위험 우선순위 (RPN)	평가 조치사항		
			Local (고장으로 인한 파생 영향)	End (전기추진 시스템에 미치는 영향)							
전기추진 시스템	선박 전기추진	오동력	PMS	전기 추진 시스템 오동력 및 계통 불안정	계통 불안정	내부통신 불량	4	1	2	8	통신방식 이중화
						외부통신 불량	3	1	3	9	통신방식 이중화
						자단기 작동에 불량	2	2	2	8	통신방식 후 시중조치
						정류기 작동에 불량	3	2	2	12	통신방식 후 시중조치
						발전기 작동에 불량	2	2	2	8	통신방식 후 시중조치
						정류기 작동에 불량	2	2	2	8	통신방식 후 시중조치
						중보표시 불량	4	1	3	12	메이 HMI 설계

<그림2> 시스템 FMEA 일부

부품명/기능정의	잠재적 고장형태	고장의 잠재적 영향	고장의잠재적 원인/메커니즘	현 설계관리	심각도	발생도	검출도	RPN
DC/DC 컨버터	Start Failure	PCS does not start	DC Link Voltage is below than required	Simulation Test & Module test when design/ Unit test when assembled	4	1	1	4
	Battery Over Voltage	PCS Stop No Energy Output	Battery Voltage is over than allowable range	Voltage sensor, current sensor are used for monitoring	4	1	1	4
	Battery Over-Current	PCS Stop No Energy Output	BatteryCurrentisoverthanallowablerange Batteryshort-circuit	Voltage sensor, current sensor are used for monitoring	4	2	1	8
Battery Under Voltage	PCS Stop No Energy Output	Battery Voltage is under than allowable range	Voltage sensor, current sensor are used for monitoring	3	2	1	6	

<그림3> DC/DC컨버터 FMEA

통합제어시스템(PMS)은 고장 시 시스템에 미치는 영향이 커서 심각도는 높으나 발생도, 검출도는 낮아 RPN을 낮추기 위해 제거하기, 신호처리 등 중요시스템의 이중화를 권고하였다. 배터리시스템은 배터리 이상 시 동작을 정지하고 디젤엔진이 추진 및 발전을 보완하므로 심각도가 비교적 낮게 나왔다. DC/DC컨버터는 직접 전원계통과 연계되어 심각도는 높지만 발생도 및 검출도는 낮게 조사 되었다.

3. 결 론

전기복합 추진어선에 FMEA를 적용하기 위해 분석범위, 평가 방식에 대해 조사하고 검토하였고, 팀을 통한 작성의 편의성을 고려하여 RPN방식을 적용한 시스템 FMEA와 하위 시스템의 DFMEA를 실시하였다. 이를 통해 각각 기자재의 핵심적인 고장 모드요인 및 개선 방안 가안을 도출할 수 있었다. 향후 RPN결과를 재평가하고 및 좀더 신뢰할 수 있는 결과를 도출하기 위해 퍼지 추론 방식을 적용하여 검토할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.(전기복합 추진어선 핵심 기자재 기술개발 : 20120369)

[참 고 문 헌]

[1] 유재민, 안동근, 장중순, "FMEA에 대한 고찰", 신뢰성응용연구, 제19권, 제4호, pp.318-333, 2019
 [2] 허은정, 강호근, "전기추진시스템의 위험도 분석을 위한 FMEA", 한국마린엔지니어링학회 2012년도 공동학술대회 논문집, pp.227-231, 2012
 [3] 백경동, 김성신, 천성표, 서홍원, 이대형, "Fuzzy-FMEA를 이용한 동적위치제어 시스템의 고장유형 우선순위 도출", 한국지능시스템학회논문지, 제25권, 2호, pp.174-179, 2015