

전기추진시스템의 위험도 분석을 위한 FMEA

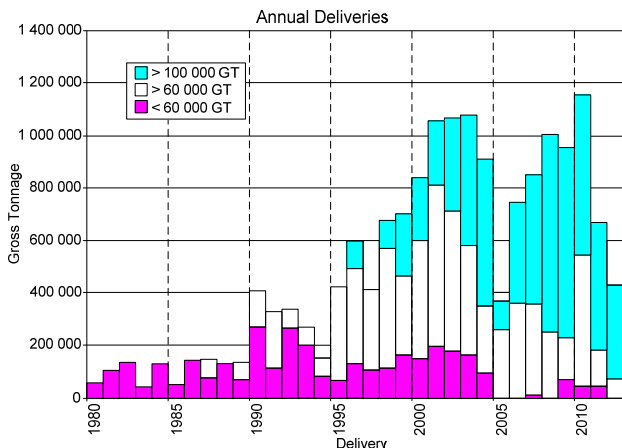
허은정⁺, 강호근¹

FMEA for Risk Assessment of Marine Electric Propulsion System

Heo Eun Jung⁺, Kang Ho Keun¹

1. 서 론

전기추진선은 19세기 말 러시아 및 독일 등지에서 배터리에 의해 운전되는 기술을 개발한 것을 시작으로, 1020년대 대서양 횡단선에 사용하였으나, 디젤 엔진의 비약적 발전으로 대세에서 밀리는 듯하였다. 그러나 최근의 선박 추진 체계는 에너지 절감뿐만 아니라 환경친화적인 측면에서 신재생 에너지 등을 적극적으로 수용하는 체계로 진화하고 있으며, 이러한 요구에 부합하는 전기추진체계에 대한 관심이 나날이 높아지고 있다. Field Support Vessel, Offshore Construction Vessel에 전기추진을 도입할 경우 연간 30~40%의 연료절감 효과가 있을 것이라고 기대하고 있으며, 영국 해군은 2000년대 초반부터 신에 함정은 전기추진선으로 발주 중이다. 다음 그림 1은 전기추진시스템이 적용되고 있는 여객선의 인도 현황을 표시한 것이다.



[그림 1] 전기추진시스템 대형크루즈선 인도 현황

선박의 전기 추진 시스템으로 크게 하이브리드 추진 시스템 (CODLAG: Combined Diesel Electric and Gas System)과 통합전기시스템 (IEP: Integrated Electric Propulsion System)이 개발 중이며, 전전기선 (All Electric Ship)은 전체 추진 시스템을 단순화하여 추진 엔진 시스템과 전기 부하용 엔진 시스템을 단순화하여 신뢰성을 향상시키고 유지보수 인력 및 비용을 절감시

키는 장점이 있다. 또한 선박 설계의 유연성을 확보하여 용적률 및 생존성 향상에 기여하는 추진 체계이다. 이미 유럽 및 미국을 중심으로 상선용 전전기추진시스템 개발에 많은 연구개발 활동이 이루어지고 있지만, 전기추진체계는 고부가가치 조선기자재 기술로 기술 이전이 상대적으로 매우 어려우며, 국내에서 독자적으로 확보되어야 하는 원천기술이라 할 수 있다.

[표 1] 전기추진체계 기술의 선진국 대비 기술 수준

기술명	현재기술수준				기술개발완료시기술수준			
	기술수준	선진국	기술격차	비고	기술수준	선진국	기술격차	비고
모터및발전장치기술	80	100	2	경쟁단계	95	100	1	경쟁단계
전력변환장치기술	60	100	4	경쟁단계	80	100	2	경쟁단계
전력저장장치기술	50	100	5	도입단계	80	100	2	경쟁단계
선박용추진기기술	80	100	2	경쟁단계	95	100	1	성숙단계
전력관리기술	70	100	3	도입단계	90	100	1	경쟁단계
전력배전기술	80	100	2	경쟁단계	95	100	1	성숙단계
전기추진선통합최적화기술	50	100	5	도입단계	90	100	1	경쟁단계
선박운항인터페이스기술	60	100	4	경쟁단계	80	100	2	경쟁단계
운항자동화및항해지원기술	70	100	3	도입단계	85	100	2	경쟁단계
안전운용지원기술	70	100	3	경쟁단계	90	100	1	경쟁단계
승객/승무원 지원 기술	80	100	2	경쟁단계	95	100	1	경쟁단계
효율적전력운용기술	70	100	3	도입단계	80	100	1	경쟁단계

한편, 전기추진시스템의 중요한 기술증의 하나인 고장형태 및 영향 분석(FMEA: Failure Mode and Effects Analysis)은 위험도 평가(Risk Assessment)를 하는 방법 중 하나로써 전기추진체계의 독자적 원천기술에 안전성과 신뢰성을 확보하게 해주는 예비 필수 단계에 해당한다고 할 수 있다. FMEA 문서는 전기추진시스템 및 관련 기자재의 개념설계 초기단계에서 FMEA를 도입하여 설계 개념에 대한 오류를 보완하고 더 나은 설계를 위한 개선 방안을 제시함으로써 전기추진체계의 능력을 보여주는 가장 중요한 자료가 될 것이며, 효율적이고 경제적인 위험 감소 수준에 도달할 수 있게 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 전기추진시스템의 위험도 분석을 위한 FMEA를 설명하며, 시스템 개선 및 보완이 이

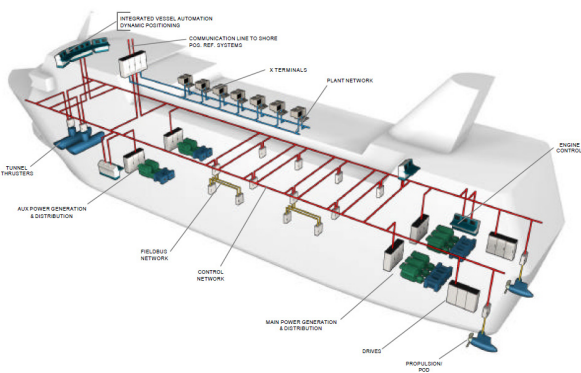
⁺ 허은정(한국선급 해사연구팀 선임연구원), E-mail: heoej@krs.co.kr, Tel: 042)869-9249

¹ 강호근(한국선급 해사연구팀 책임연구원), E-mail: hkkang@krs.co.kr, Tel: 042869-9215

루어져, 추후 운영상의 문제해결에 도움이 되도록 대응 방안을 고려하는 것이 목적이다.

2. 전기추진선의 설비 및 기술

전기추진 방식은 선박의 종류와 운항 특성 (Operating profile)에 따라서 기계적 구동 시스템을 갖는 동일 선박보다 10~25%의 연료 절감 효과가 있으며 연료 저장에 필요한 공간을 감소시켜 선적량을 증가시킨다. 또한 소음 및 진동을 크게 줄여 쾌적한 선박 환경 구성에 일조하여 더 안락한 선박 운항을 가능하게 한다. 전기추진체계는 전기추진선박을 구성하는 전력시스템 전체를 의미하며, 크게는 발전계통, 배전계통, 그리고 부하에 해당하는 선박추진계통과 선박운용계통으로 나눌 수 있다. 대형 전기추진 선박의 체계통합은 전기추진체계를 포함한 선박 내 모든 전력계통 구성품을 통합운용함으로써 선박의 목적과 특성에 부합하는 기자재를 선정하고 선박운용을 최적화하기 위한 기술을 의미한다.



[그림 2] 전기추진체계 계통 구성도

전기 추진선의 추진 체계는 적용할 핵심 기술의 성격에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

(1) 전기추진장치 기술

- 모터 및 발전장치 기술
- 전력변환장치 기술
- 전력저장장치 기술
- 선박용 추진기 기술

(2) 전기추진시스템 체계통합 기술

- 전력관리기술
- 전력배전기술
- 전기추진선 통합최적화 기술

전기추진장치 기술에서는 추진 전동기와 전력변환장치가 기술 개발에 가장 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다. 추진 전동기의 경우 과거에는 직류 전동기를 사용하였으나 현재는 동기(Synchronous) 전동기 또는 유도(Induction) 전동기를 사용하고, 향후에는 영구자석(Permanent Magnet) 동기전동기 또는 초전도(HTS) 전

동기를 사용하는 것으로 진화할 것으로 예상된다. 전력 변환장치의 경우에는 과거 부하전류식 인버터를 많이 사용하였으나 현재는 PWM(Plus Width Modulated)방식의 전압형 인버터가 주로 사용되고 있다.

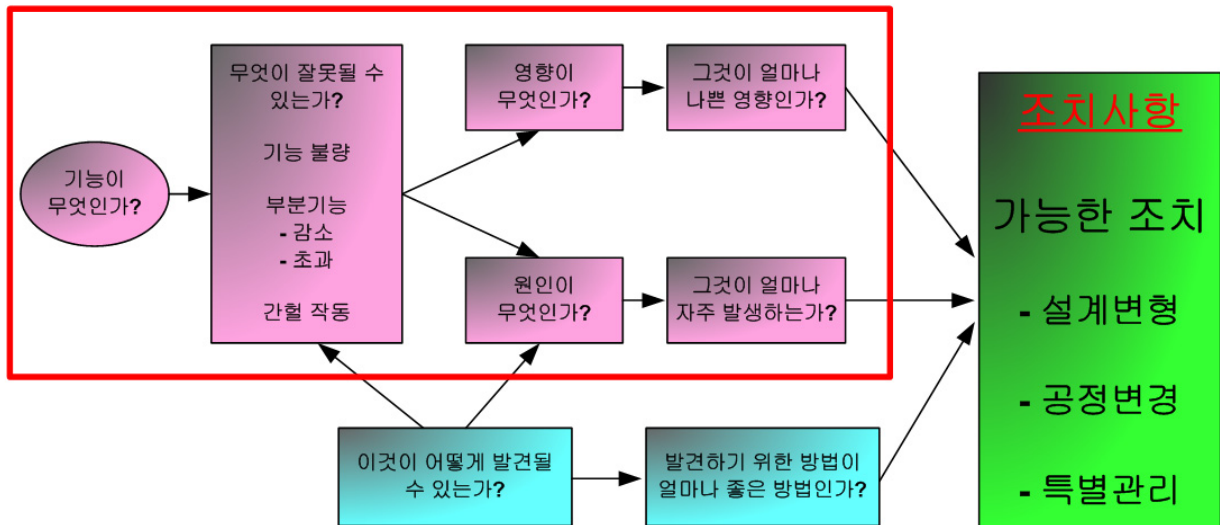
체계통합 기술의 핵심 사항은 다음의 표와 같다.

[표 2] 전기추진 체계통합 엔지니어링 기술

전력관리제어 기술	
전력관리시스템 (PMS)	<ul style="list-style-type: none"> 고전압계통 안전제어 절연 및 차폐 지능형 자동화 자동전력관리시스템 부하차단 및 분담 공기조화장치
고전압계통 안전제어	<ul style="list-style-type: none"> 정전회복 실시간 제어 시스템
Automatic Blackout Recovery	<ul style="list-style-type: none"> 원격 탐지 시스템 성능 모니터링
전력배전 기술	
전압선정	<ul style="list-style-type: none"> Medium voltage AC power/ High frequency AC power/ Medium voltage DC power Partially integrated electric power 통합전력시스템(Integrated power system) 전기 부하 (Electric load)
구역배전(ZED)/ 방사선 배전방식	<ul style="list-style-type: none"> Zonal system/ Electrical zonal boundary 구역배전(Zonal Electrical Distribution System)
변압기 계통	<ul style="list-style-type: none"> 송전시스템 (Power transmission system)
필수 공급 전력부하 급전 및 분전 안정성	<ul style="list-style-type: none"> Higher power level
전기추진선 통합 최적화	
동시 최적 설계 (Simultaneous optimization)	<ul style="list-style-type: none"> 동시 최적 설계 (*Simultaneous optimization) 전력변환기술/ 전력통합기술 (Power conversion technology/ Integrated power technology)
위험도 기반 설계 (Risk-base design)	<ul style="list-style-type: none"> 위험도 기반 설계 (Risk-base design) Integrated power architecture
안전진단 (Safety diagnosis)	<ul style="list-style-type: none"> 안전진단 (Diagnostics) 위험도 분석/평가 (Risk assessment)
Land based integrated performance test	<ul style="list-style-type: none"> Passive/ Active component technology

3. 전기추진시스템 FMEA의 방법 요약

특히 선박의 전력 시스템의 가용성을 위해서는 고장형태 및 영향 분석(FMEA)이 요구되며, 이는 잠재적인 고장의 형태를 분석하고 그에 따른 영향을 최소화하기 위한 위험 평가를 위한 체계화된 접근 방식이다. 이



[그림 3] FMEA 방법의 요약

방식은 높은 수준 또는 세부화된 관점에서 시스템을 평가하고, 설계, 프로세스 또는 기능 분석을 실시한다. 또한 하드웨어 및 소프트웨어 시스템, 프로세스 제어 시스템 및 작업 환경, 및 사람에 의한 위험에 대한 평가도 이루어질 수 있으며 부품과 제품의 규정 준수 상태를 산업 표준과 비교해 추적해 나간다.

FMEA를 통해 얻어지는 일반적인 사항은 다음과 같다.

(1) 계산 항목

- 항목/유형 고장률
- 항목/유형 위험도
- 위험 우선 순위(RPN)
- RPN 개선율(%)
- 위험 수준
- 퍼센트 분리
- 퍼센트 검출
- 사용자정의 가능

(2) 제공되는 고장 형태 라이브러리

- FMD-97
- FMD-91
- MIL-HDBK-338
- NPRD3
- RADC-TR-84-244
- RADC-TR-844 4-A

(3) 데이터 계층 구조 - 유형별

- 유형별 단일 영향
- 유형별 다양한 영향
- 원인별 다양한 영향

- 영향별 다양한 원인

(4) 분석 결과의 예

- 사양별 표준 보고서 형식
- 위험도 매트릭스
- 위험 수준
- 고장 우도 순위
- RPN 기준 최상위(n) 고장 형태
- 고장 형태 및 영향 요약
- 형태 위험도 기준 최상위(n) 고장 형태
- 작업 항목 목록
- 고장 유형 원인 파레토

FMEA를 성공적으로 적용하기 위해서는 '사후'실행이 아닌 '사전'실행이 중요하며 고장 형태가 제품 또는 공정에 반영되기 전에 수행하여야 한다. 또한 제품 및 공정의 변경이 용이한 시기에 실시하여야 하며, 변경에 따른 비용의 추가가 합리적인 시기에 행해져야 한다. FMEA 보고서는 살아있는 문서로써 양산 이후의 발생하는 조치를 포함하여 관련된 조치 사항이 반영되어야 한다. FMEA의 결과인 권고조치사항이 반영된 설계, 공정, 도면의 검토가 반드시 이루어져야 하며, 설계 및 제조 문서에 변경 사항이 반영되었는지 확인하여야 한다. 또한 반영된 사항 또는 미반영된 조치의 관리계획서가 작성되고 검토 되어야 한다.

4. FMEA 의 절차

시스템설계 및 적용은 복잡하고 광범위함으로 이용가능한 정보와 일관되게 그 개별적인 특성이 강조된 FMEA 절차를 개발하는 것이 필요할 수 있다. FMEA에

서 사용되는 기본적인 단계는 다음과 같다.

- (1) 시스템의 정의 및 그 기능과 최소한의 운전 요구 사항
- (2) 기능 및 신뢰성 다이어그램의 개발, 기타 도표 또는 도식적인 모델 및 설명
- (3) 기본 원칙의 확립과 수행한 분석에 대응하는 문서화
- (4) 고장 감지의 식별 및 격리장치 및 방법
- (5) 특정 불만족 상황에 대응한 설계 및 운전장치의 식별
- (6) 고려되는 복합 고장의 특정 조합에 대한 조사(선택사항)
- (7) 권고 사항

FMEA 절차는 치명도 분석과 함께 또는 치명도 분석 없이 수행될 수 있다. 치명도는 FMECA (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis)에서 고려되며 이 경우에는 사상치명도 및 고장 가능성의 평가도 병행되어야 한다.

4.1 시스템 및 관련 요구 사항의 정의

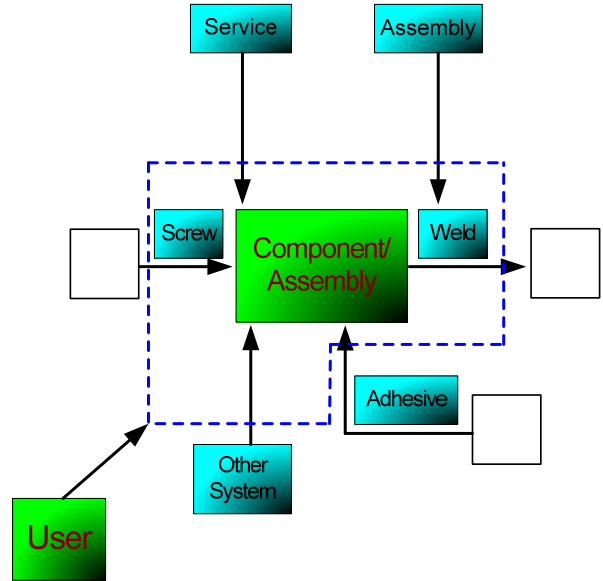
시스템의 완벽한 정의는 1차 및 2차 기능, 그러한 기능의 사용, 기대되는 성능, 시스템의 제약 (Constraint) 및 고장을 유발하는 명백한 조건을 포함한다. 모든 주어진 시스템은 하나 이상의 운전 모드를 위하여 설계되고 시스템 운전 시간의 다양한 주기에서 작동되어야 하므로, 시스템 정의는 각 모드 및 그 기간동안 시스템 작동에 대한 기능적인 서술이 포함되는 것이 좋다.

기능적 요구사항은 운전 및 비운전 모드에서 적합한, 또는 정해진 특성에 대한 관련 주기 및 시간에 대한 모든 환경조건에 대해 적합한 성능에 대한 정의를 모두 포함하여야 한다.

이와 함께 시스템 작동, 노출 또는 보관시의 환경요구 사항과 각 경우에 기대되는 성능도 정의되어야 한다. 환경은 온도, 습도, 방사, 진동 및 압력 등과 같은 요소가 포함된다. 전기추진선박의 경우 진동 및 염도 등을 특별히 고려하여야 한다.

4.2 블록다이어그램의 개발[그림 4]

시스템 기능의 기술적인 이해 및 수반되는 분석을 위해 시스템의 기능요소들을 나타내는 도표가 필요하다. 도표는 요소들간의 모든 연속적인 관계 및 이중화 관계, 그리고 그들 간의 기능적 상호의존성을 나타내어야 한다. 이는 시스템 전반에 걸쳐 나타나는 기능 고장을 반영한 것이다. 시스템 운전의 대체 모드를 나타내기 위해 하나 이상의 도표가 필요할 수 있다. 별도의 논리 도표가 각 운전모드를 위해 요구될 수 있다.



[그림 4] 블록 다이어그램

4.3 기본 규칙 및 시스템 수준의 확립

분석을 위해서는 우선 분석이 어느 수준까지 이루어 질지에 대한 수준이 결정되어야 하며 분석을 위한 시스템 수준의 선정에 대한 기본 원칙은 원하는 결과 및 설계 정보의 유용성에 달려있다. 기본 규칙 및 시스템 수준의 확립을 위해 다음과 같은 기본 절차가 사용될 수 있다.

- (1) 최상위 시스템 수준은 설계 개념 및 정해진 출력 요구사항으로부터 선정된다.
- (2) 분석이 유효한 최하위 수준은 해당 정보가 확실한 기능 정의 및 설명을 제공할 수 있고 이전 경험의 영향을 받는 수준이다.
- (3) 규정되고 의도된 보전 및 수리 수준은 하위 시스템 수준을 결정하는 데 유용할 수 있다. 시스템 보전이 수행될 최하위 시스템 수준은 식별되어야 한다.

4.4 FMEA 문서화

목표에 일관되고 연구 대상 시스템용으로 특별히 개발된 양식을 이용하여 FMEA를 수행하는 것이 좋다. 일반적으로 그림 5의 형태이며, 시스템 요소의 기능, 식별 번호 및 고장 형태, 고장 원인, 고장 영향, 고장 감지 방법 등을 포함한다.

Failure Mode	Specific Cause	Effect of Failure	Likelihood of Failure	Detectability of Failure	Severity of Failure	Risk Priority
Gas will not shut off	Spring broke preventing valve from closing	Explosion resulting in property damage and/or serious injury	3	5	10	150

▲ Likelihood of Failure: 1-10 with 10 representing most likely
 ▲ Detectability of Failure: 1-10 with 10 representing most difficult
 ▲ Severity of Failure: 1-10 with 10 representing most severe
 ▲ Risk Priority = (Likelihood of Failure) X (Detectability of Failure) X (Severity of Failure)

[그림 5] FMEA 문서 양식

4.5 고장 형태, 원인, 영향

주어진 시스템의 성공적인 운용은 특정 주요 시스템 요소의 성능에 달려 있다. 시스템 성능평가의 핵심은 중요 요소의 식별이다. 고장 형태, 원인 및 영향의 식별 절차는 다음의 측면에서 예기된 고장 형태 목록을 준비함으로써 효율적으로 만들 수 있다.

- 시스템 사용
- 특별히 포함된 시스템 요소
- 운전모드
- 적절한 운전 사양
- = 시간적인 제약
- 환경

[표 2] 일반적인 고장형태 종류의 예

일반적인 고장 형태의 종류
예기치 않은 작동 (Premature Operation)
정해진 시간에서 작동을 일으키는 고장
정해진 시간에서 작동을 해제시키는 고장
운전 중 고장

4.6 고장 감지 방법

고장 형태의 감지 방법은 동일한 징후가 있는 고장 형태 이외의 형태를 식별하여 분석하고 모두 목록화하여 기술한다. 운전 중 여분의 요소에 대한 별도의 고장 감지 필요성도 고려하여야 한다.

4.7 고장의 중요도 및 대체 수단의 정성적 기술

고장의 상대적 중요성을 WORKSHEET에 기록한다. 고장 형태의 영향을 방지하거나 감소시키는 수단을 위해 정해진 시스템 수준에서 모든 설계 특성의 식별 및 평가도 이루어져야 한다. 이러한 WORKSHEET는 장비가 내부적인 오작동을 일으킬 때 실질적인 작동 상태를 보여준다. 치명도 분석이 실행되지 않은 경우, 최종 WORKSHEET에는 내용의 명확함을 위해 모든 적절한 비교 사항을 기재한다. 설계 개선 권고사항을 기록하고 종합보고서에 더욱 상세히 기록하여야 한다. 기록사항은 다음을 포함한다.

- 통상적이지 않은 모든 조건
- 여분의 요소 (Redundant Element) 의 고장
- 특별히 중요한 설계 특성의 인식
- Line Entry를 상세화하기 위한 모든 비교사항
- 순차적 고장 분석을 위한 기타 Entry 에 대한 참고

4.8 분석 보고서

FMEA (또는 FMECA) 보고서는 폭넓은 연구 내용을

포함할 수 있고, 그 자체만으로 보고서를 작성할 수 있다. 어떠한 경우에도 보고서에는 요약 부분과 상세한 기록이 포함되어 있어야 한다. 요약에는 분석 방법, 처리된 수준, 가설 및 기본 원칙 등이 간략하게 기술되어 있어야 한다. 이에 추가하여 다음의 사항을 포함하여야 한다.

- 설계자, 유지보수요원, 계획수립자 및 사용자를 위한 주의사항
- 최초로 일어나는 고장, 연속적 영향을 일으키는 고장
- FMEA (또는 FMECA) 의 결과로 이미 반영된 설계 변경

5. 결론

FMEA는 이미 여러 종류의 산업체에서 응용되고 있지만, 요구사항으로 사용될 때에는 형식적인 실시를 하는 경우가 발생할 수 있다. 그러나 전기추진체계는 국내에서 개발 초기 단계이며, 전기추진체계는 고부가가치 조선기자재 기술로, 국내의 독자적 기술이 개발된 후 신뢰성을 갖기 위해서는 초기 설계 단계에서 적절한 안전성 및 신뢰성에 대한 평가가 확실하게 이루어져야 한다.

또한 고장 형태를 분석하고 그 영향을 평가하여, 시스템 개선 및 보완이 이루어질 수 있도록 철저히 문서화하여 계속적인 기술발전이 이루어질 수 있도록 하여야 한다. 정확한 FMEA 분석은 사용 및 운용 환경 분석, 부품 분석, 물성 분석 등을 통해 국내 조선 및 기자재 업체를 이끌어갈 새로운 부가 가치 창출을 위한 기본 사항이 될 것이다.

참고문헌

- [1] 전전기(All Electric) 스마트선(Smart Ship) 개발 기획연구 보고서, 한국해양연구원, 2011
- [2] MIL-STD-1629 "Procedures for performing a failure mode and effect analysis"
- [3] IEC 60812 "Procedures for failure mode and effect analysis(FMEA)"
- [4] BS 5760-5 "Guide to failure modes, effects and criticality analysis (FMEA&FMECA)"
- [5] SAE ARP 5580 "Recommended failure modes and effects analysis (FMEA) practices for non-automobile applications"
- [6] SAE J1739 "Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)"
- [7] SEMATECH A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry, 1992