

전기집진기 예지보전 단계에서의 고장모드영향분석

한승훈* · 이정욱** · 이선엽*** · 황종덕**** · 강대곤*****†

* 경상대학교 기계시스템공학과 교수, ** 경상대학교 기계시스템공학과 대학원생, *** 한국기계연구원 책임연구원,
**** (주)우민기술 대표, ***** 충북대학교 안전공학과 박사과정

FMEA of Electrostatic Precipitator for Preventive Maintenance

Seung-Hun Han* · Jeong-Uk Lee** · Sun-Youp Lee*** · Jong-Deok Hwang**** · Dae-Kon Kang*****†

* Professor, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

** Graduate Student, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

*** Principal Researcher, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34106, Korea

**** CEO, Woomin Technology Co.Ltd, Busan 46755, Korea

***** Complete a doctorate, Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1 Chung Dae-ro, Chungju, 28644, Korea

요 약 : 전 세계 90%의 인구가 WHO의 연평균 미세먼지 노출 기준($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과한 공기를 흡입하고 있다. 전 세계적으로 육상뿐만 아니라 해양에서 발생하는 질소산화물에 대한 규제를 통해 2차 오염물질, 초미세먼지 저감에 대해 노력하고 있으며 국내에서는 선박에서 미세먼지 발생의 주요한 원인인 황 함유량 저감과 환경친화적 선박의 개발 및 보급 등을 통해 깨끗한 해양환경 조성을 위한 노력을 하고 있다. 디젤엔진 유해 배출가스 저감을 위한 기술 중 압력 손실이 적고 높은 집진 효율 및 NOx의 제거와 유지 관리의 장점이 많은 전기 집진기의 수요와 중요성이 증가하고 있다. 본 연구는 총톤수 999톤급 선박의 2,427 kW 선박용 디젤엔진의 미세먼지 저감을 목적으로 개발된 전기 집진기를 예지보전단계에서 고장모드영향분석을 통해 장비 품질을 높여 선박 내에서의 내구연한을 높이고 자 위험 우선순위 도출하였다. 위험 우선순위는 고장모드 241(poor dust capture efficiency)이 RPN 180으로 가장 높았다. Collecting electrode에서 가장 많은 고위험 고장모드를 검출하여 집중관리 부품으로 관리해야 할 필요가 있었으며 원인으로 진동과 핀 풀림으로 인한 유격 불량이가장 많이 검출되었다. 핀 풀림 역시 근본적으로는 선체 또는 장비에서 발생하는 진동이 원인이 되어 발생할 수 있는 사항이기 때문에 핀 풀림이 발생하는 개소에 보완이 필요하겠다.

핵심용어 : 고장모드영향분석, 미세먼지, 예지보전, 전기 집진기, 선박

Abstract : Currently, 90% of the world's population breathes air with a fine dust content exceeding the World Health Organization's annual average exposure limit ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Global efforts have been devoted toward reducing secondary pollutants and ultra-fine dust through regulations on nitrogen oxides released over land and sea. Domestic efforts have also aimed at creating clean marine environments by reducing sulfur emissions, which are the primary cause of dust accumulation in ships, through developing and distributing environment-friendly ships. Among the technologies for reducing harmful emissions from diesel engines, electrostatic precipitator offer several advantages such as a low pressure loss, high dust collection efficiency, and NOx removal and maintenance. This study aims to increase the durability of a ship by improving equipment quality through failure mode effects analysis for the preventive maintenance of an electrostatic precipitator that was developed for reducing fine dust particles emitted from the 2,427 kW marine diesel engines in ships with a gross tonnage of 999 tons. With regard to risk priority, failure mode 241 (poor dust capture efficiency) was the highest, with an RPN of 180. It was necessary to determine the high-risk failure mode in the collecting electrode and manage it intensively. This was caused by clearance defects, owing to vibrations and consequent pin loosening. Given that pin loosening is mainly caused by vibrations generated in the hull or equipment, it is necessary to manage the position of pin loosening.

Key Words : FMEA (Failure Mode Effects Analysis), PM (Particulate Matter), Preventive Maintenance, ESP (Electrostatic Precipitator), Vessel

* First Author : shhan@gnu.ac.kr, 055-772-9105

† Corresponding Author : dkkang83@korea.kr, 033-260-3132

1. 서론

전 세계 90%의 인구가 세계보건기구(WHO; World Health Organization)의 연평균 미세먼지 노출 기준($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과한 공기를 흡입하고 있으며, 공기 역학 경 $2.5 \mu\text{m}$ 이하 미세먼지(PM_{2.5}; Fine Particulate Matter) 기준으로, 한국은 대기 질이 안 좋은 국가 26위(총 90개국), 서울은 27위(총 85개 도시)로 발표되었다(IQAir, 2020). 미세먼지 발생량에 따르면 한국 및 서울은 연평균 $24.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 미세먼지를 발생하고 있으며 이는 세계보건기구 기준의 약 2.5배에 해당하는 양이다(IQAir, 2020). 정부는 2022년까지 국내 미세먼지 배출량 30% 감축을 목표로 다양한 정부 정책을 추진하고 있다(NPAC, 2017; MOE, 2020).

국내 대기오염물질 중 해양 부분에서 발생하는 양은 전국의 대기오염물질 중 선박에서 배출되는 SO_x와 미세먼지의 양이 각각 10.9%, 9.6%를 차지하고 있다(Lee et al., 2017). 실제로 항구 도시인 부산(2번째), 인천(3번째), 울산(6번째)의 대기 질이 좋지 않았으며(IQAir, 2020) 육상 배출원에 못지않게 선박으로부터 발생하는 대기오염물질이 유입되어 심각한 영향을 받고 있다(Lee et al., 2020).

국제해사기구(IMO; International Maritime Organization)는 해상 디젤엔진 내 배기 오염 배출물질 제어를 강화하기 위해 선박 엔진 배기가스 중 질소산화물의 농도를 일정 기준 이하로 감소시킬 것을 규정하는 등 전 세계적으로 육상에서 발생하는 질소산화물뿐만 아니라 해상에서 발생하는 질소산화물에 대한 규제를 통해 2차 오염물질, 초미세먼지 저감에 대해 노력하고 있다(Won and Hong, 2019). 국내에서도 국제항해에 사용되는 선박의 경우 2020년 1월부터 선박에서 미세먼지 발생의 주요한 원인인 경유의 황 함유량 기준을 중유 1%에서 0.5% 이하여야 한다(영해 및 배타적경제수역 안에서만 항해하는 선박의 경우에는 0.05%). 중유는 벙커 에이유(A 중유) 2%, 벙커 비유(B 중유) 3%, 벙커 시유(C 중유) 3.5%에서 0.5% 이하로 강화하였다. 다만 중유를 연료로 국내에서만 운항하는 선박의 경우는 관련 설비 교체 등 준비기간 부여를 위해 개정 내용이 2021년 이후 도래하는 정기적 검사부터 적용된다(MOF, 2020a). 또한 환경친화적 선박의 개발 및 보급을 촉진하기 위해 「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」을 제정하여 깨끗한 해양환경 조성을 도모하기 위한 노력을 하고 있다(MOF, 2020b).

디젤엔진 유해 배출가스 저감을 위한 전처리 기술로는 사용 연료의 개질, 연소실 및 분사계의 개선, 성층급기연소법, 균질급기압축착화연소법(HCCI; Homogeneous Charge Compression Ignition engine) 등을 들 수 있고 연소 후처리 기술로는 선택

적 촉매환원장치(SCR; Selective Catalytic Reduction), 디젤분진 필터(DPF; Diesel Particulate Filter), 습식·건식의 배출 가스 정화장치의 개발 및 전기집진 방식 등 다양한 방법이 있다(Son and Bae, 2007). 그 가운데 전기 집진기는 압력 손실이 적고 높은 집진 효율, NO_x의 제거와 유지 관리의 장점이 많아 그 수요와 중요성이 증가하고 있다(Lim and Lee, 1998; Kim et al., 2019).

미세먼지에 대한 이슈가 커지면서 집진기의 효율을 높이기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 장비의 효율을 높이기 위해서는 장비가 정상적으로 고장 없이 운영이 잘 돼야 하는 품질 적인 면이 선제적으로 이루어져야 할 것이다. 자동차와 일부 산업계에서는 설계단계에서부터 FMEA를 적용하여 장비의 품질을 높이려는 연구가 많이 이루어지고 있으나 해상에서는 선박에 설치되는 장비의 품질을 높이기 위한 연구가 부족하다. 해상에서는 공식안전성평가(FSA; Formal Safety Assessment)가 주로 행해지고 있으며 위험도 분석과 cost-benefit 평가를 포함한 공식적인 절차를 통해 인명, 재산, 환경 등 해상 안전을 강화하기 위한 체계적인 안전성 분석 방법론(Lee et al., 2001)으로서 장비 자체의 시스템의 고장모드를 분석하는 FMEA와는 다소 차이가 있다.

본 연구는 총톤수 999톤급 선박의 2,427 kW 선박용 디젤 엔진의 미세먼지 저감을 목적으로 개발된 전기집진기로서 선박에 장착하기 전 각각의 설비 상태를 정량적으로 파악하여 설비의 이상 상태나 앞으로 일어날 수 있는 사태를 예상하고 적절하게 유지하고 보수하는 예지보전(preventive maintenance)단계에서 고장모드영향분석(FMEA; Failure Mode Effects Analysis)을 통해 위험 우선순위를 도출하여 선박에서 설비의 안정적 운영과 내구연환을 높이고자 하였다.

2. 전기집진기 원리 및 설계 사양

전기집진기의 원리는 정전력을 이용하여 배기가스 중의 분진 등 입자를 코로나 방전에 의해 발생한 이온에 의해서 전기적으로 대전이 되고 전하를 띠게 된 분진은 정전력에 의해서 양극 전극판으로 이동하여 집진이 이루어진다(Son and Bae, 2007; White, 1956).

Fig. 1과 같이 개발된 전기집진기는 선박에서 배출되는 입자상물질을 90% 이상 저감 할 수 있는 전기집진장치 그리고 NO_x 저감장치와 호환되어 동시 저감 기능을 가지며, 2차 오염물질을 발생시키지 않고 기존 집진장치 대비 50% 미만의 체적을 가지는 콤팩트형 저배압 미세먼지 전기집진 복합장치를 목표로 개발되었으며 세부 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. ESP (electrostatic precipitator) design parameters

Parameter	Range
Distance between plates	20-30 cm
Gas velocity in ESP	1.2-2.4 m/s
SCA(specific collection area)	11-45 m ² /1000 m ³ /h
Particle migration velocity	3.05-15.2 cm/s
Number of fields	4-8
Corona power/Flue gas volume	59-295 watts/1000 m ³ /h
Corona current/ft ² plate area	107-860 microamps/m ²



Fig. 1. Designed ESP.

3. 고장모드영향분석 방법

3.1 고장모드영향분석(FMEA) 이론 및 목적

FMEA는 신뢰성 방법론 분야에서 가장 흔히 사용되고 또한 잘 알려진 정성적 신뢰성 방법론이다. 시스템 변경이나 부품 변경을 위해 설계단계에서 수행하는 예방 차원의 신뢰성 방법론으로 1960년대 중반 미국항공우주국에서 아폴로 프로젝트를 위해 개발되어 원자력 기술 분야와 자동차 산업 분야에까지 다양하게 사용되고 있다. Table 2는 FMEA의 분석 절차를 나타내는 여러 가지의 과정 중 해양플랜트, 잠수정 및 ROV(Remotely Operated underwater Vehicle)와 같은 해양 기구의 FMEA를 수행하기 위한 절차이다. “모든 기구는 고장 날 수 있고 고장 난다”와 “최악의 가능성의 순간에 고장이 발생한다”라는 법칙과 경험이 FMEA를 수행하는 데 있어 주안점이라 할 수 있다. 한마디로 가능한 모든 고장모드를 찾아내는 것이 목적이라 할 수 있다(IEC-60812, 2001; IMCA, 2002).

이러한 FMEA와 중요도 등을 활용하여 위험 우선순위를 결정할 수 있고, 심각도(severity), 발생도(occurrence), 검출도(detection) 3가지 요소를 가지고 위험 우선순위를 계산한다(Jumbad and Salunke, 2016). 심각도는 고장 영향의 심각성을 나타내며 발생도는 해당 고장 원인이 발생할 가능성이 얼마

Table 2. FMEA procedure of The International Marine Contractors Association (IMCA, 2002)

No.	Contents
1	Selecting the team
2	Defining the standard
3	Defining the reporting procedures
4	Defining the boundaries of the system to be analysed
5	Organising system design information
6	Identifying failure detection methods/corrective actions
7	Formulating practical FMEA tests
8	Recommendations
9	Conclusions
10	FMEA report structure

나 되는지 추정하는 값이며 검출도는 고장 원인이 고객에게 전달되기 전에 얼마나 성공적으로 발견되는지를 결정한다. 심각도, 발생도, 검출도의 순위 단계 및 범위는 FMEA의 절차가 사용되고 있는 산업 분야마다 조금씩 다르게 사용되고 있다. 많은 FMEA 심각도, 발생도 및 검출도 등급 구분 기준 중 본 연구에서는 Table 3-5에서 나타낸 것과 같이 자동차 산업에서 사용하고 있는 10개의 등급으로 심각도, 발생도 및 검출도 등급 기준을 분류한 FMEA 기법을 활용하여 전기집진기 예지보전 단계에서의 FMEA를 수행하였다(Jumbad and Salunke, 2016). 그 이유는 다른 FMEA 등급 기준과 비교하여 예지보전단계에서 좀 더 세밀한 구분을 통해 고장모드를 확인하기 위함이다.

Table 3. Severity ranking criteria

Effect	Criteria	Ranking
Hazardous without warning	Potential failure mode affects the safety norms involves noncompliance with government regulations without warning	10
Hazardous with warning	Failure mode affects government norms with warning	9
Very high	Loss of primary function	8
High	Performance reduction and customer dissatisfaction due to failure mode	7
Moderate	Item is operable and customer dissatisfaction	6
Low	Item is operable but customer is not comfort	5
Very low	Defect noticed by 75 % customers	4
Minor	50% of the customers are not comfort with failure mode	3
Very minor	Less than 25 % of the customer noticed the defect	2
None	No noticeable defect	1

Table 4. Occurrence ranking criteria

Effect	Possible failure rates	Ranking
Very High	≥100 per thousands of items	10
	≥50 per thousands of items	9
Frequent failure	20 per thousands of items	8
	10 per thousands of items	7
Moderate failure	5 per thousands of items	6
	2 per thousands of items	5
	1 per thousands of items	4
Low failure	0.5 per thousands of items	3
	0.1 per thousands of items	2
Very low failure	≤0.01 per thousands of items	1

Table 5. Detection ranking criteria

Detection	Criteria	Ranking
Absolutely uncertain	Process control is unable to detect problem	10
Very remote	Very rare chance of detection	9
Remote	Remote chance of detection	8
Very low	Very low chance of detection	7
Low	Low chance of detection	6
Moderate	Moderate chance of detection	5
Moderately high	Chances of detection of failure mode is moderately high	4
High	High chance of detection	3
Very High	Very high chance of detection	2
Almost possible	Detection is always there	1

3.2 위험평가(Risk assessment)

위험평가제도는 모든 위험 접근법의 핵심이다. 위험평가를 통해 발생 가능한 위험의 우선순위를 정하여 이에 따라 대응을 하는 것으로 식(1)과 같이 심각도와 발생도의 곱으로 계산된다.

$$\text{Criticality} = \text{Severity} \times \text{Occurrence} \quad (1)$$

위험의 심각도와 발생도를 바탕으로 위험의 수준을 Table 6과 같이 A, B, C, D 4단계로 구분한다. 실제 상황 하에서는 정확히 4단계로 구분하기가 쉽지 않다. 발생도와 심각도가 매우 높을 경우 매우 높은 수준의 위험으로 분류될 수 있지만, 발생도는 높으나 심각도가 낮다거나 심각도가 높으나 발생도는 낮을 경우에는 이를 어떠한 위험으로 분류하기는 어려우므로 Fig. 2와 같이 리스크 행렬을 이용하여 관리등급을 나타낸다(FEMA, 1997).

Table 6. Four stages of Risk

Detection	Criteria
Class A (High risk)	- death or fatal injury, complete shutdown of facilities and critical services for more than one month, more than 50 percent of the property located in affected area is severely damaged
Class B (Moderate to high risk)	- permanent disability, severe injury or illness, complete shutdown of facilities and critical services for more than 2 weeks, more than 25 percent of the property located in the affected area is severely damaged
Class C (Sufficiently high)	- injury or illness not resulting in disability, complete shutdown of facilities and critical services for more than one week, more than 10 percent of the property located in the affected area is severely damaged
Class D (Low risk)	- treatable first aid injury, complete shutdown of facilities and critical services for more than 24 hours, no more than 1 percent of property located in the affected area is severely damaged

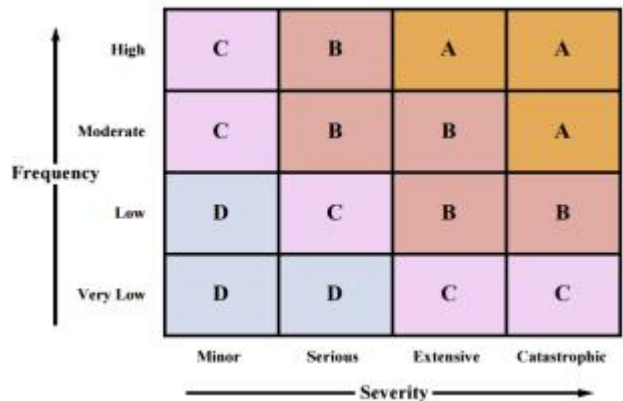


Fig. 2. Risk matrix.

3.3 위험우선순위(Risk priority number)

RPN(Risk Priority Number)은 위험우선순위 평가지표로 사용되고 있다. 심각도, 발생도, 검출도 3개의 개별적인 평가를 종합해 식(2)와 같은 하나의 평가지표인 RPN이 나온다. 위험 평가 값의 척도는 일반적으로 1에서 10까지의 정수이다. 평가 값 1(매우 낮은 발생도, 최소 심각도, 최적 감지도)은 제품이 신뢰할 수 있다고 긍정적으로 평가될 때 주어지며 평가 값 10은 극도로 부정적으로 평가될 때 주어진다. RPN 값은 1(1*1*1)부터 1000(10*10*10)까지 나올 수 있다. 평균 RPN은 일반적으로 125(5*5*5)이다.

$$\text{RPN} = \text{Severity} \times \text{Occurrence} \times \text{Detection} \quad (2)$$

Table 7. RPN and Criticality at FMEA sheet

Item No.	Potential failure mode	Potential effects	Potential causes	S E V	O C C	D E T	R P N	C R I
100	TR-Set							
110	Insulation liquid							
111	Degenerative failure	Insulation abrasion	Winding vibration, Movement	8	1	3	24	8
120	TR-Set							
121	Stress failure	Over current	Change fuel	8	1	3	24	8
122			Controller(AVC)	8	1	1	8	8
123			Setting AVC&operation	8	4	2	64	32
124		Over voltage	Change fuel	8	2	3	48	16
125			Controller(AVC)	8	3	1	24	24
126			Setting AVC&operation	8	3	2	48	24
130	High voltage bushing							
131	AVC(Automatic Voltage Controller) shutdown	Occur arc	Accumulate dust and foreign material at high voltage bushing	8	2	2	32	16
140	Earth switch insulation							
141	AVC shutdown	Occur arc	Accumulate dust and foreign material at earth switch insulation	5	4	2	40	20
150	Insulation liquid							
151	AVC shutdown	Insulation liquid level down, Temp. high	Insulation liquid evaporation, Acidity increment	2	3	1	6	6
160	Cooling fan							
161	AVC shutdown	Cooling fan wiring out, TR-Set Temp. high, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) Temp. high	Cooling fan vibration, Fan not working due to dust accumulation, Fan current fault	2	3	1	6	6
170	Electric breaker							
171	AVC shutdown	TR power out, Unstable input power	Wiring out due to vibration	2	3	1	6	6
180	All							
181	AVC shutdown	TR-Set wear & corrosion	Marine environment(temp., humidity, salty)	2	3	1	6	6
200	ESP Mechanism							
210	Discharge electrode							
211	Decreasing dust capture efficiency	Discharge imbalance, Poor capture	Pin loosing, discharge pin warp due to vibration	2	3	1	6	6
220	Rapper							
221	Device damage	Resonance of rapper device and ship	Vibration	3	6	1	18	18
222	Poor dust capture efficiency	Poor exhaustion, Burn out cycle error	Poor air supply	2	5	1	10	10
230	High voltage wiring connection							
231	Extra high voltage	Extra-high voltage cable disconnection	Vibration	3	3	1	9	9
240	Case & frame							
241	Poor dust capture efficiency	Poor exhaustion, Exhaust gas leakage	Vibration due to motion, Exhaust device, Proper vibration	6	6	5	180	36
250	Door							
251	Environmental safety issues	Exhaust gas leakage, Exhaust gas inflow	Bad closing, Vibration due to exhaust device	2	4	1	8	8
252	Occur spark	Exhaust gas inflow	Vibration due to exhaust device	2	4	1	8	8
253		Exhaust gas inflow, Spark, pressure increase	Poor air supply/pressure	3	5	1	15	15

전기집진기 예지보전 단계에서의 고장모드영향분석

Table 7. (Continued)

Item No.	Potential failure mode	Potential effects	Potential causes	S E V	O C C	D E T	R P N	C R I
254		Voltage imbalance	Poor electrode earth	3	3	1	9	9
255		Poor capture, Poor dust capture efficiency	Poor electrode earth	6	5	5	150	30
256	Poor capture, Poor dust capture efficiency	Exhaust gas inflow, occur spark, Pressure increase	Vibration due to exhaust device, Poor air supply/pressure	3	5	1	15	15
257		Voltage imbalance, Poor capture, Poor dust capture efficiency	Poor electrode earth	6	3	4	72	18
260	Discharge electrode							
261	Poor dust capture efficiency	Voltage imbalance, Poor capture, Poor exhaustion, Increase vibration, Discharge plate bending, Poor dust capture efficiency	Poor separation due to loosening pin	6	3	5	90	18
262	Discharge plate bending	Voltage imbalance, Poor capture, Poor exhaustion, Increase vibration, Discharge plate bending, Poor dust capture efficiency	Poor separation due to loosening pin	6	3	5	90	18
263		Voltage imbalance, Poor capture, Poor exhaustion, Increase vibration, Discharge plate bending, Poor dust capture efficiency	Poor separation due to loosening pin	5	6	5	150	30
270	Collecting electrode							
271	Poor dust capture efficiency	Voltage imbalance, Poor capture, Poor exhaustion, Increase vibration, Discharge plate bending, Poor dust capture efficiency	Poor separation due to loosening pin	6	4	5	120	24
272		Voltage imbalance, Poor capture, Poor dust capture efficiency	Collecting plate bending	6	5	5	150	30
273		Poor exhaustion, Error poor exhaustion cycle, Poor dust capture efficiency, Poor device operating	Poor air supply/pressure	4	5	1	20	20
274		Poor exhaustion, Poor dust capture efficiency	Error poor exhaustion cycle	6	5	5	150	30
275	Discharge plate bending	Voltage imbalance	Poor separation due to loosening pin	6	4	5	120	24
276		Poor capture	Poor separation due to loosening pin	6	3	5	90	18
277		Poor exhaustion, increase vibration, Discharge plate bending, Poor dust capture efficiency	Poor separation due to loosening pin	5	6	5	150	30
278	Discharge plate bending	Poor exhaustion, Error poor exhaustion cycle, Poor dust capture efficiency, Poor device operating	Poor air supply/pressure	6	4	4	96	24
279		Poor dust capture efficiency, Poor device operating	Poor air pressure	5	4	4	80	20
280	Earthing							
281	Voltage imbalance 2 nd load	Disconnecting earth cable	Vibration	6	5	5	150	30

3.4 FMEA 팀 구성

고장형태와 영향분석을 위한 팀원은 대상 공정의 규모에 따라 결정되며, 각각의 분야에서 전문적 지식과 경험을 갖추고 있는 전문가들이 구성원이 되며 4-6명 사이가 가장 이상적이다. 팀원이 3-4명보다 적다면, 중요한 하위 부문이 간과되거나 적절히 처리되지 못할 위험이 있고 팀원이 7-8명

이상으로 구성되면 동적인 그룹 효과가 크게 악화되어 팀원들이 토론에 동참하고 있다는 느낌을 가지지 못해 결과적으로 FMEA 모임에 혼란을 줄 수 있다(Bertsche, 2008; Kosha, 2012). 본 연구에서는 ESP 제작사 연구원, A/S 팀 부장, 기계시스템학과 교수, 선박검사 및 안전분야 전문가, 선박 기관장, 기부속 업체 부장 6명으로 팀을 꾸려 FMEA를 수행하였

으며 최소 15년 이상의 경력을 보유하고 있다. FMEA 회의 결과 전기집진기의 최종 목표를 달성하기 위한 고장모드는 포집 효율 불량 관련 요소들(Table 7; 211, 255, 257, 261, 262, 263, 271, 272, 273, 274, 275, 277, 278, 279), 배기가스 불량 관련 요소들(161, 222, 241, 251, 261, 263, 271, 273, 274, 278), 콤팩트형 저배압 미세먼지 전기집진 복합장치 관련 요소들(241)을 구분하여 중요 고장모드로 분석하였다.

4. 고장모드영향분석

4.1 위험우선순위 분석

ESP 제작사의 예지보전 단계에서의 FMEA를 크게 두 가지의 아이템, TR-Set 와 ESP Mechanism으로 구분을 하였다. 세부적으로 111개의 잠재적 원인 및 효과를 찾아내어 위험우선순위 분석을 Table 7에 나타내었다. 심각도는 각 전문가의 의견을 반영하여 평균값을 계산한 뒤 반올림한 값을 적용하였고, 발생도는 ESP 제작사에서 시험 운영 중 발생한 고장 빈도 데이터 내부 자료를 기반으로 하여 전문가들의 의견을 반영하여 평균값을 계산한 뒤 반올림하였다. 검출도는 ESP 제작사 내에서 고장모드에 대한 검출이 가능한 수준을 일반인, 사원급, 대리급, 과장급, 차장급, 결함 검출 불가능으로 구분하여 현장 경험을 반영하여 검출 등급을 구분하였다. 같은 고장모드 내에서 RPN 값이 같으면 아이템 번호 안에 고장효과와 고장 원인을 동시에 표기하여 38개의 고장모드로 줄여 편집하였다. 본 연구에서는 주요 부품에 대한 RPN 값으로 위험의 우선순위를 결정하였다. 고장모드별 위험 수준은 최소 6점에서 최대 180점까지 도출되었다. 위험우선순위의 값이 크다는 것은 해당 고장모드로 인해 시스템이나 기기가 큰 영향을 받거나, 자주 고장이 발생, 혹은 고장이 발생하더라도 감지가 어렵다는 것을 의미한다. 그리고 우선적으로 개선 조치를 시행하여 심각도나 발생도 및 검출도를 감소시켜야 하는 고장모드라는 것을 의미한다. 본 연구에서는 고장모드 241이 RPN 180으로 가장 높았으며, 255, 263, 272, 274, 277, 281이 RPN 150으로 그다음 순이었다. 구성부품으로 electrode 구성품과 관련된 고장모드가 12개로 가장 많았으며 RPN 20-150 범위 분포를 보였다.

4.2 ESP 위험평가

FMEA 팀을 활용하여 ESP 초기 운영단계에서의 고장모드 분석을 기초로 심각도와 발생도를 기준으로 1차적으로 위험평가를 시행하였다. 심각도와 발생도 결과를 바탕으로 위험평가를 하였고 그 결과를 Table 7 CRI와 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 10×10 단계로 구분한 위험평가 결과에 Fig. 2에서 4×4로 구분한 리스크 매트릭스를 비율을 맞춘 것으로 매트

릭스 상 위험등급은 수용할 수 있는 수준과 허용할 수 없는 수준에서 조절하여 사용하는 것으로 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 위험등급을 구분하였고 경계선에 있는 결과에 대해선 보수적인 측면으로 접근하여 윗 단계의 위험등급에 포함시켰다. Class A 단계인 고위험 구간은 없었으며 Class B, C, D 단계에 걸쳐 분포하는 것을 확인할 수 있었다. Class B 단계는 88개 점수 분포로는 15-36점, Class C 단계는 9개 점수 분포로는 8-16점, Class D 단계는 14개로 점수 분포로는 6-8점에서 이루어져 있었다. Class B와 C의 위험개소 저감 계획이 선박 설치전 필요하겠다.

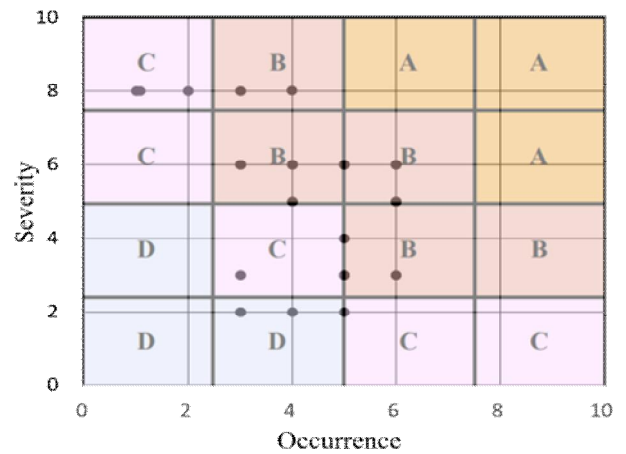


Fig. 3. Risk matrix of ESP.

4.3 시험결과 고찰

많은 고장모드 중에서 저감이 필요한 개소를 구분하는 게 중요하며 4.2의 위험평가 결과 Class B와 Class C에 포함되는 위험등급 중에 검출도가 평균보다는 어려운 4 이상에 해당하는 고위험 고장모드로 선정하였다. 선박 설치전 해결해야 하는 고장모드는 15개가 검출되었다. 구성부품별로는 Case & frame(241), Door(255, 257), Discharge electrode(261, 262, 263), Collecting electrode(271, 272, 274, 275, 276, 277, 278, 279), Earthing(281)가 고위험 고장모드였으며 Collecting electrode에서 8개가 검출되어 집중관리 부품으로 선정되었다. 구성부품으로 electrode는 11개의 고위험 고장모드를 가지고 있으며 위험성도 Class B 이상이었으며 대부분 검출도 값도 4-5로 높아 이에 대한 모니터링 시스템 개발, 운영자 고장 상태 확인 교육 및 사전예방 메뉴얼 주기 설정 등 사전에 고장을 예방하는 대책을 세워야 하겠다. 원인으로서는 진동(vibration)과 핀 풀림으로 인한 유격 불량(poor separation due to loosening pin)과 연계된 고위험 고장모드가 9개로 진동과 핀 풀림에 대한 대책으로 핀 풀림 방지 너트를 설계도에 반영하는 노력을 하였다.

RPN 값이 종합적으로 높은 부품에 대한 고장모드분석을 통한 개선안은 찾는 것도 중요하지만 FMEA 시트를 통해 개별값이 큰 것도 함께 고려되어야 한다. 특히 TR-Set(100)와 High voltage bushing(130)의 경우는 RPN 값이 크지는 않고 검출도 값도 낮아 자칫 긍정적인 요소로 비칠 수 있지만, 심각도는 8 이상의 값을 가졌으며 전기 또는 전자계통의 이상으로 과전류, 과전압 및 아크 발생을 일으킨다. 심각도 값이 높다는 것은 안전 위험뿐 아니라 심각한 기능 손상을 나타내는 것으로 발생도와 검출도 값이 낮아 선박에 설치되기 전에 고장이 해결되지 않을 수가 있다. 이를 해결하기 위해서 FMEA 최적화를 수행해야 한다. FMEA 결과를 통해 RPN 값이 높은 고장모드는 쉽게 도출할 수 있고 개선의 필요성이 정량화되지만 개별값이 특정하게 높은 고장모드는 별도의 FMEA 분석을 통해서 개선 여부에 대한 검토를 해야 할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 전기집진기 초기 개발 단계에서의 주요 구성부품별 위험성에 대하여 고장모드영향분석과 위험평가 등을 활용하여 위험우선순위를 결정하고자 하였으며 다음과 같은 결론은 도출하였다.

1. 고장모드 241(먼지 포집 효율 불량)은 케이스와 프레임 부품에서 발생하며 심각도와 발생도가 각각 6으로 Fig. 3을 통해 Class B로 구분되었으며 검출도는 5로 위험우선순위가 RPN 180으로 가장 높았다. 잠재적인 효과로는 배기 불량, 배기가스 누설이었으며 원인으로선 선박, 배출장치 및 고유진동에 따른 진동이었다. 그 다음으로는 255, 263, 272, 274, 277, 281이 RPN 150으로 나타났다. 구성부품으로 분류하면 electrode가 고장모드 개수와 값이 가장 많고 높은 비중을 보였다.
2. 위험평가에서는 총 4개의 위험 그룹 가운데 Class A는 없었으며 Class B 88개 Class C 9개 Class D 14개였다. Electode는 총 12개의 고장모드 중 12개가 Class B로 위험성이 다소 높았다.
3. Case & frame(241), Door(255, 257), Discharge electrode(261, 262, 263), Collecting electrode(271, 272, 274, 275, 276, 277, 278, 279), Earthing(281)이 고위험 고장모드였으며 electrode에서 가장 많은 고위험 고장모드를 검출하여 집중관리부품으로 관리해야 할 필요가 있으며 검출도 값이 대부분 높아 모니터링 시스템 개발, 운영자 고장상태 관련 교육 및 사전예방 메뉴얼 주기 설정 등을 통해 검출도를 낮추거나, 심각도와 발생도 값을 낮추기 위한 대책을 마련해야 한다.

4. 고위험 고장모드의 원인으로 진동과 핀 풀림으로 인한 유격 불량이 가장 많이 검출되었다. 핀 풀림 역시 근본적으로는 선체 또는 장비에서 발생하는 진동이 원인이 되어 발생할 수 있는 사항이기 때문에 핀 풀림이 발생하는 개소에 와서+이중너트 또는 방지 풀림 특수너트를 적용(Kang et al., 2018)하는 등 보완을 통해 발생도를 낮추는 노력이 있어야 하겠으며 추후 고위험 고장모드 원인을 설계에 반영하여 실증적 검증에 관한 추가 연구가 보완되어야 하겠다.

사 사

본 연구는 선박배출미세먼지통합저감 기술개발사업(20190403)의 재원으로 수행된 연구입니다.

References

- [1] Bertsche, B.(2008), Reliability in Automotive and Mechanical Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [2] FEMA(1997), Multi Hazard Identification and Risk Assessment: A Cornerstone of the National Mitigation Strategy, United States. Federal Emergency Management Agency.
- [3] IEC-60812(2001), Analysis Techniques for System Reliability Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), IEC.
- [4] IMCA(2002), The International Marine Contractors Association, Guidance on Failure Modes & EffectsAnalyses (FMEAs), IMCA M 166.
- [5] IQAir(2020), 2019 World Air Quality Report Resion & City PM2.5 Ranking, pp. 5-13.
- [6] Jumbad, V. and J. J. Salunke(2016), FMEA Methodology for Quality Improvement in Sheet Metal Industry, IJERT., Vol. 5(1), pp. 122-126.
- [7] Kang, D. K., S. H. Kim, and J. H. Park(2018), A Study on the Improvement of Passenger Ship Rudder Stock and Tiller Locking Nut Loosening by Analyzing an Investigation Report and the NAS 3350 Test, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24(2), pp. 253-259.
- [8] Kim, D. U., S. H. Jung, S. H. Shim, J. T. Kim, and S. S. Lee(2019), Flow Distribution in an Electrostatic Precipitator with a Perforated Plate, Clean Tach., Vol. 25(2), pp. 147-152.
- [9] Kosha(2012), Giude of FMEA, Kosha Guide, X-6-2012.
- [10] Lee, E. K., S. H. Choi, and M. H. Kang(2017), Rapid Installation of AMPs to Reduce Particulate Matter in Port

- Cities, Weekly Report of Korea Maritime Institute, Vol. 35, pp. 1-23.
- [11] Lee, J. O., I. C. Yeo, and Y. S. Yang(2001), A Trial Application of FSA Methodology to the Hatchway Watertight Integrity of Bulk Carriers, Marine Structures, Vol. 14, pp. 651-667.
- [12] Lee, S. H., B. Y. Kang, B. H. Jeong, and J. Y. Gu(2020), National Management Measures for Reducing Air Pollutant Emissions from Vessels Focusing on KCG Services, Vol. 26(2), pp. 163-174.
- [13] Lim, H. C. and D. C. Lee(1998), Influence of the Distribution of Wind Velocity and Mist Concentration for the Improvement of Efficiency with an Electrostatic Precipitator, Journal of KIIS, Vol. 13(4), pp. 155-161.
- [14] Ministry of Oceans and Fisheries(2020a), Enforcement Decree of Marine Environment Management, Presidential Decree No. 30977.
- [15] Ministry of Oceans and Fisheries(2020b), Promotion and Development of Environment Friendly Vessels Act, Act No. 16167.
- [16] MOE(2020), Ministry of Environment, Special Act on the Reduction and Management of Fine Dust, Act No.17177.
- [17] NPAC(2017), National Planning Advisory Committee, Moon Jae-in Government 5-year plan for state administration No.58
- [18] Son, B. H. and J. U. Bae(2007), A Study on the Performances of Exhaust Gas Purification at Process on the Development of Corona Discharge Type Electrostatic Precipitator for Diesel Engines, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31(8), pp. 904-910.
- [19] White, H. J.(1956), Chemical and Physical Particle Conductivity Factors in Electrostatic Precipitation, Chemical Engineering Progress, Vol. 52(6), pp. 244-248.
- [20] Won, J. M. and S. C. Hong(2019), Selective Catalytic Reduction Technology Trend for the Removal of Nitrogen Oxide from Ship Flue Gas, KIC News, Vol. 22(5), pp. 25-40.

Received : 2020. 07. 06.

Revised : 2020. 08. 19. (1st)

: 2020. 09. 03. (2nd)

Accepted : 2020. 10. 28.