

# 기능적 안전을 고려한 FSA기반 기관 구역 화재 안전성 평가 및 개선

서성원<sup>1</sup>·양영순<sup>2,†</sup>·정소연<sup>1</sup>·유원선<sup>3</sup>

서울대학교 산업·조선공학부<sup>1</sup>

서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학 연구소<sup>2</sup>

제주대학교 해양시스템공학과<sup>3</sup>

## Fire Safety Assessment Based on FSA and Risk Reduction of Machinery System Considering Functional Safety

Sungwon Suh<sup>1</sup>·Youngsoon Yang<sup>2,†</sup>·Soyeon Chung<sup>1</sup>·Wonsun Ryu<sup>3</sup>

Industrial and Naval Architecture, Seoul National University<sup>1</sup>

Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, RIMSE<sup>2</sup>

Dept. of Ocean System Engineering, Jeju National University<sup>3</sup>

### Abstract

It is the well-known fact that most part of goods transported are moved on the unfavorable ocean and even a small amount of accident on sea is extremely dangerous for human lives, financial losses, and social responsibility. Among the several causes of accidents, those by fire have occurred frequently and their damage has been highly serious. The aim of this paper is to assess the risk of fires due to oil leakage in the machinery space. To define the possible fire scenario, our team has performed the search of casualty database and reviewed the previous and various studies in the field. As a result, it is noted that the quantitative risk of the fire scenario have been evaluated on the ground of the FSA risk model.

The expected frequency of a fire amounts to incidents during the life of a ship, and the expected financial damage amounts to 5,654 USD per a ship. By adopting Safety Instrumented System (SIS) introduced in IEC 61508 and IEC 61511, SIS model is designed to prevent oil leakage fire as a risk reduction method. It is concluded that System Integrity Level (SIL) 1 seems to be appropriate level of SIS.

**Keywords** : Formal Safety Assessment(FSA, 공식 안전성 평가), Risk(위험도), Fire safety(화재 안전성), Safety Instrumented System(SIS, 안전 계장 장치), Safety Integrity Level(SIL, 안전 무결도 수준)

## 1. 서론

1912년 타이타닉호의 침몰을 계기로 1914년에 처음 채택된 해상인명안전협약(Safety Of Life At Sea, SOLAS)(2009)은 안전과 관련된 모든 규정들이 정리되어 있다. 여러 차례 개정이 되어 왔고 현재는 1974년에 채택되어 1980년 5월 25일에 발효된 1974 해상인명안전협약을 사용하고 있다. 1974 해상인명안전협약은 그 이후에 오늘 날까지 많은 개정이 있었고, 화재 안전과 관련된 많은 사항들을 담고 있다. 화재 안전을 위한 격벽에서부터 경보장치, 화재 진압 장비, 전기 장치, 기관 구역에서의 요구사항 등 많은 측면에서 서술하고 있다. 실제로 해상인명안전협약의 내용을 살펴보면 화재와 관련된 항목들이 전체 규정의 1/3을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 그만큼 선박 안전에 화재가 미치는 영향이 크다는 것을 뜻한다.

본 논문에서는 선박의 화재 안전성을 평가하고 개선된 수준의

안전성을 확보할 수 있는 방안을 살펴보기 위해 공식안전성평가 방법을 기반으로 한 방법을 사용한다. 공식안전성평가방법은 위험도 분석과 비용-편익 평가를 포함한 공식적인 절차를 통해 인명, 재산, 환경 등 해상 안전을 강화하기 위한 체계적인 안전성 분석 방법론이다. (Lee, et al., 2001) 공식 안전성 평가 방법론이 선박의 화재 안전성을 평가하고 가능한 위험도 저감 방법 적용 가능성을 살펴보기 위해 사용된다.

위험도 저감 방법으로 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)의 표준인 IEC 61508, IEC 61511 등에서 설명하고 있는 안전 계장 장치(Safety Instrumented System, SIS)를 고려하고 그 타당성을 검증한다.

## 2. 화재 안전성 평가

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의

해사안전위원회(Maritime Safety Committee, MSC)와 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)는 국제해사기구의 법규 제정 과정에 사용될 공식 안전성 평가 지침서를 승인하였다. 본 논문에서는 공식 안전성 평가 방법론을 기반으로 하여 연구에 적합하게 수정된 방법론을 사용하여 화재 안전성을 평가한다. 공식 안전성 평가 방법론은 다음과 같다.

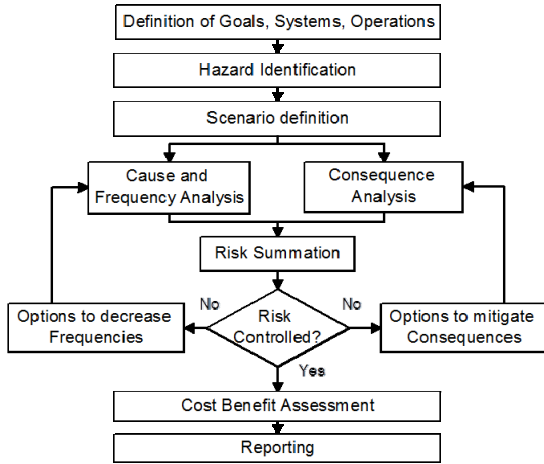


Fig. 1 Formal safety assessment framework (IMO, 2002)

위의 프레임워크는 일반적으로 5단계로 구분 짓는다.

1. 위험요소 식별 (hazard identification)
2. 위험도 평가 (risk analysis)
3. 위험도 저감 방안 (risk control options)
4. 비용-편익 분석 (cost benefit assessment)
5. 의사결정을 위한 추천 (recommendations for decision making)

본 논문에서는 위의 3, 4, 5단계를 안전 계장 장치(SIS)의 적용에 따른 효과 및 그 타당성 검증을 위한 방법에 맞게 간략하게 진행한다.

### 2.1 위험요소 식별

서론에서도 언급한 것과 같이 해상인명안전협약에는 선박의 화재에 관한 많은 규범적인 규정(prescriptive rule)들이 존재하고 있다. 그러나 그럼에도 불구하고 충분한 화재 안전성을 보장하지 못하고 있다. DNV의 보고서(DNV, 2000)에 의하면 전체 선박 화재의 63%가 기관 구역에서의 화재이다. 그리고 화재 원인의 56%가 연료유의 누출이 기관구역의 부품의 뜨거운 표면(hot surface)에 닿으면서 시작한 화재이다. 본 연구에서는 위험도 기반 안전성 평가 방법론을 사용하여 기관 화재 안전성, 그 중에서도 가장 큰 비중을 차지하고 있는 연료유의 누출이 기관구역 부품의 뜨거운 표면에 닿아 시작하는 화재를 중심으로 안전성을 평가하고 그 개선방안을 도출해보려 한다. 화재의 형태는 화재/폭발/폭발 후 화재로 나눌 수 있다. MSC 87-INF. 4(IMO, 2010a)

에 의하면 화재가 87%로 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 연료유 누출에 의한 화재의 경우에는 폭발이 일어나지 않고 화재가 일어나는 경우가 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 화재만을 다루기로 한다.

### 2.2 위험도 평가

위험도는 어떠한 위험한 사건이 발생할 확률(또는 빈도)과 그 사건이 발생했을 때의 영향의 곱으로 나타낸다. 위험도를 평가한다는 것은 그 사건이 발생하는 빈도와 그 영향을 평가한다는 것이다. 본 논문에서는 그 방법으로 가장 보편적이고 널리 사용되고 있는 Fault Tree Analysis(FTA)와 Event Tree Analysis(ETA)를 사용한다. Top event를 연료유 누출에 의한 화재로 설정하고 발생빈도를 계산하기 위해 Fault Tree Analysis를 사용하고 top event 발생에 따른 결과를 계산하기 위해 Event Tree Analysis 방법을 사용한다. 이 모델은 IMO IACS FSA 보고서 (IMO, 2010a)의 화재에 관한 사고 시나리오를 토대로 본 연구에서 진행하려는 대상에 적합하게 구성하였다. 그리고 위험도는 크게 인명, 재산, 환경에 대한 측면으로 구분지을 수 있는데, 본 논문에서는 환경을 제외하고 인명, 재산적인 위험도만을 고려한다.

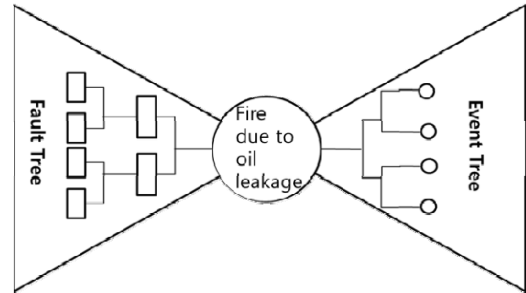


Fig. 2 Risk analysis model

#### 2.2.1 빈도 분석

연료유 누출에 의한 화재 안전성을 평가하기 위해 먼저 top event의 빈도를 평가한다. 본 논문에서 구성한 Fault Tree는 다음과 같다.

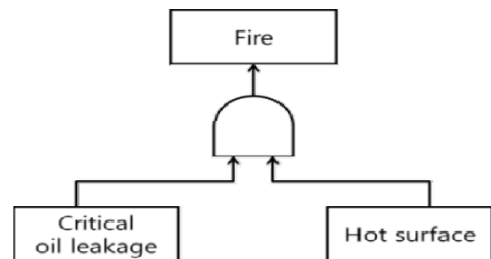


Fig. 3 Fault tree of risk model

위험요소 식별과정에서 평가 대상의 범위를 좁혔기 때문에 간

단하게 구성할 수 있다. 본 논문에서는 연료유 누출에 의한 화재의 발생 빈도를 평가하기 위해 세 가지의 자료를 사용한다. 일본 선급(NK)에서 발간한 Engine Room Fire - Guidance to fire protection (NK, 1994), OREDA(SINTEF, 2009), IMO GISIS (gisis.imo.org)의 통계 자료를 활용하여 발생 빈도를 평가한다. IMO GISIS 웹사이트에서 조건에 맞게 해양사고를 검색할 수 있다. 2001년부터 2010년 사이의 선박을 대상으로 조사하였다. 빈도를 계산하기 위해서는 shipyear(1 shipyear는 1대의 선박이 인도된 지 1년이 지난 것을 말한다)를 알아야 한다. 2001년부터 2010년까지의 전체 shipyear는 Lloyd Register Fairplay에서 매년 발간하는 World Fleet Statistics를 참고한다.

위의 문헌의 통계 자료를 토대로 기관 구역 내에서 연료유 누출이 일어난 빈도를 결정한다. 일본 선급 보고서(1994)와 IMO GISIS의 경우에는 실제 선박 사고 자료를 얻을 수 있었고 이를 통해서 연료유 누출에 의한 사고 빈도를 찾을 수 있다. OREDA (SINTEF, 2009)의 경우에는 부품별 고장 모드에 따른 고장 빈도가 정리되어 있다. GL선급의 Ship Information System에 정리되어 있는 표준 선박의 기관 구역 내의 부품들의 수를 참고하여 전체 빈도수를 계산한다. OREDA에는 부품별 다양한 형태의 누출에 대한 정보들이 제공되어 있다. 누출의 형태는 external leakage of the process/utility medium, internal leakage, leakage in closed/open conditions(valve의 경우)로 구분 지었다. 이런 모든 형태의 누출을 전부 더해서 부품 하나의 고장률을 추정한다. 그러나 모든 누출이 화재로 이어지지는 않는다. 본 논문에서는 치명적인 누출이 화재로 이어진다고 가정하였기 때문에 치명적인(critical) 수준으로 주어져 있는 고장률에 대한 값만 고려한다. 실제 기관 구역 내에서 연료유가 누출되었을 때, 그 누출된 기름이 뜨거운 표면에 닿았을 때 화재로 이어지게 된다. 실제 선박의 경우에는 표면의 온도가 일정 온도(SOLAS, Chapter II-2, Reg. 4에 의하면 220°C)보다 높아지는 부품에는 반드시 적절히 방열되도록 되어 있다. 그러나 운행상의 진동이나 관리소홀 등의 이유로 이로 인한 화재가 지속적으로 발생하고 있다. 참고문헌(Katarina & Mateusz, 2009)에 의하면 기관 구역 전체 면적에서 뜨거운 표면이 차지하고 있는 비율은 0.05라고 한다. 본 논문에서는 이를 참고하여 뜨거운 표면이 기관구역내의 0.05의 비율로 고르게 분포하고 있다고 가정하였다. 그러나 진동이나 관리소홀 등의 이유로 1/100의 확률로 방열이 적절히 이루어지지 않는다고 가정한다.

각각의 문헌으로부터 치명적인 연료유 누출의 발생 빈도를 계산하면 다음과 같다.

Table 1 Oil leakage fire frequency of each reference and weight

Reference	Frequency	Weight
NK	5.00.E-04	0.3
GISIS	2.00.E-05	0.6
OREDA	8.70.E-03	0.1

OREDA의 경우에는 해양 구조물에 관련된 통계자료이다. 자료가 잘 정리되어 있어 유용하게 사용할 수 있지만 선박의 통계와는 조금 차이가 있을 수 있어 비중을 0.1로 결정하였다. 일본선급 보고서의 경우에는 1980년부터 1992년까지의 73대의 NK 선급 선박을 대상으로 조사하였다. 통계자료가 잘 정리되어 있지만 상대적으로 오래된 자료이기 때문에 비중을 0.3으로 결정하였다. IMO GISIS의 경우에는 가장 최근의 자료이고 선박 관련 사고가 거의 대부분 보고되어 있기 때문에 가장 높은 비중을 주었다. 이를 토대로 연료유 누출에 따른 화재 발생 빈도를 구하면  $1.03 \times 10^{-3}$  per shipyear 이다.

일반 상선에 대한 IMO IACS FSA 보고서 (IMO, 2010a)에 의하면 oil leakage에 의한 화재 발생확률이  $1.0 \times 10^{-3}$  per shipyear 로 본 위험도 모델을 통해 구한 값과 대체로 유사한 결과가 나온 것을 확인할 수 있다.

### 2.2.2 영향 분석

화재가 발생했을 때의 그 영향을 나타낸 event tree가 다음과 같다. 화재가 발생했을 때에 센서나 감지기에 의해 얼마나 빠르게 그 화재여부를 알게 되느냐가 휴대용 소화기에 의한 화재 진압 성공률이 달라지게 된다. 휴대용 소화기로 진압하기에 너무 큰 화재의 경우에는 살수(sprinkler) 시스템을 이용하여 소화하게 된다. 그보다도 더 큰 화재의 경우에는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 소화 시스템을 이용하여 화재를 진압한다. 그리고 가장 마지막 방법으로 선원들이 호스 또는 소화전을 이용하여 화재를 진압하는 화재진압(fire fighting)이 있다. 각각의 시스템들이 화재를 진압할 확률을 각종 보고서와 전문가와의 면담을 통해 결정하였다.

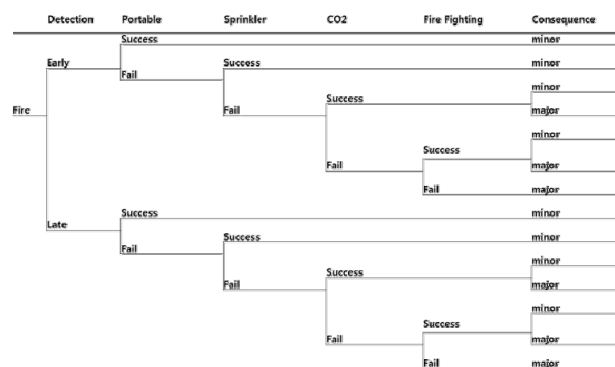


Fig. 4 Event tree of risk model

탐지의 경우, 탐지의 성공 여부가 아니라 얼마나 빠르게 탐지했느냐가 중요하다. 참고문헌(Wong, et al., 2000)을 토대로 빠른 탐지와 느린 탐지, 두 가지 경우가 있다고 하고 그 확률은 반반이라 가정한다.

화재 탐지가 빨리 일어났는지 늦게 일어났는지에 따라서 휴대용 소화기의 화재 진압 성공률이 달라진다. 탐지가 빨리 일어난 경우에는 휴대용 소화기로 진압할 확률이 0.5이고 탐지가 늦게 일어난 경우에는 진압할 확률이 0.3이라 가정한다. 일본선급 보고서에 의하면 휴대용 소화기의 화재 진압률은 0.4로 본 논문에서 가정한 값과 유사함을 알 수 있다.

살수 시스템의 화재진압 성공률을 결정하기 위해서 산업용 건물의 통계 데이터를 활용한다. 문헌(Malm & Pettersson, 2008)의 연구에서 조사한 통계 자료의 평균을 살수 시스템의 성공률로 사용한다.

Table 2 The reliability of sprinkler systems in industrial buildings based on international incident statistics(Malm & Pettersson, 2008)

Incident Data Source	Extinguished Fires(%)
Finland	17
London/UK	23
Sweden	64

위의 자료의 평균치를 계산하면 0.3467의 화재 진압 성공률이 나오고 이 값은 대략 0.35라고 볼 수 있다.

이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 소화 시스템의 화재진압 성공률을 결정하기 위해 미국연안경비대(United States Coast Guard, USCG) 보고서(1998)의 결과를 정리한 논문(Zalosh, et al., 1996)을 참고하였다. 이 논문에 의하면 이산화탄소 시스템의 화재 진압 성공률은 0.346이라고 한다. 일본선급 보고서의 통계에 의하면 약 0.31이다. 그에 따라서 이산화탄소 소화 시스템의 화재 진압 성공률은 0.35라고 가정한다.

화재진압(fire fighting)의 화재 진압 성공률은 일본선급 보고서를 참고하여 0.75의 확률을 갖는다고 가정한다.

각각의 event들의 결과로 경미한(minor) 손상이 발생할 수 있고, 중대한(major) 손상이 발생할 수 있다. 휴대용 소화기, 살수 시스템으로 화재가 진압된 경우에는 경미한 손상만이 발생하고, 이산화탄소 시스템으로 화재를 진압한 경우에는 중대한 손상이 발생할 확률이 0.02가 되고, 화재진압의 경우에 중대한 손상이 발생할 확률은 0.04이고 화재 진압에 실패한 경우는 모두 중대한 손상으로 이어진다고 가정한다. 경미한 사건(event)이 발생할 확률은

$$1 - p(\text{major event}) \tag{1}$$

로 정의한다. 앞에서의 확률값을 이용하여 각각의 사건 경로 별 1shipyear 당 발생 빈도를 계산할 수 있다. 각 경로별 사건의 영향이 얼마나 되는지를 평가해야 한다. 그 평가를 위해서 모든 영향을 비용으로 평가하여 비교하려 한다.

본 논문에서는 환경적인 측면을 제외하고 인명, 재산적인 측면의 위험도만을 다룬다. 인명 위험도를 평가하기 위해 사고에 따른 사망자(fatality)를 비용으로 환산하고, 재산적인 위험도는 비가동시간(downtime), 수리(repair)에 따른 비용으로 환산한다.

- 사망자

경미한 손상을 불러일으킨 사고의 경우 0.2의 fatalities를 갖는다고 가정하고 중대한 손상을 일으킨 사고는 1.5 fatalities를 갖는다고 가정한다. 1 fatality는 1명이 사망한 사고를 말하는 것이고 1명이 부상을 입은 사고는 0.1 fatalities로 일반적으로 가정한다. FSA study 보고서(MSC 88-INF. 6)(2010b)에 의하면

NCAF(Net Cost of Averting a Fatality)와 GCAF(Gross Cost of Averting a Fatality)를 3,000,000 USD로 주어지고 있다. 이 값을 1 fatality에 대한 비용으로 계산한다.

- 비가동시간

경미한 손상을 입은 경우에는 수리를 필요로 하게 되고 수리 기간 동안 비가동시간이 발생하게 된다. Katarina and Mateusz (2009)에 의하면 선박 용선료(ship charter rate)의 평균값이 20,000 USD이다. 따라서 수리 1일당 20,000 USD의 비용이 소요된다고 가정한다. 수리기간은 일본선급 보고서(NK, 1994)와 전문가의 의견을 조합하여 평균적으로 휴대용 소화기로 화재를 진압한 경우에는 2일, 살수 시스템으로 진압한 경우에는 8일, 이산화탄소 소화 시스템의 경우에는 12일, 화재 진압은 20일이 소요된다고 가정한다. 예상 소요 기간에 선박 용선료를 곱하게 되면 선박을 운항을 하지 못함으로 발생하는 비용을 계산할 수 있다.

Table 3 Downtime and cost

	Downtime(day)	Cost(USD)
Portable	2	40000
Sprinkler	8	160000
CO <sub>2</sub>	12	240000
Fi-Fi	20	400000

- 수리비용

Katarina and Mateusz (2009)에 의하면 수리비용은 휴대용 소화기에 의해 화재를 진압한 경우에는 2,500 USD, 살수 시스템은 20,000 USD, 이산화탄소 소화 시스템과 화재 진압에 의해 진압한 경우에는 27,500 USD라고 가정한다. 중대한 손상을 입은 경우에는 선박 건조비용의 60%의 비용이 들고 수리 비용이나 비가동시간은 발생하지 않는다고 가정한다. 선박의 건조비용은 100,000,000 USD라고 가정한다.

Event tree의 각 경로에 해당하는 비용을 빈도를 곱해서 전체 기대 비용을 계산하면 5654 USD per shipyear 가 나오게 된다.

### 2.3 위험도 저감

위험도를 저감하기 위해서는 현재의 위험도 수준이 어느 정도이고 어느 정도 저감을 해야 안전한 수준인지를 알아야 한다. 공식 안전성 평가에서는 그 기준으로 개인적 위험도(Individual Risk)와 사회적 위험도(Societal Risk) 등을 사용한다. 그러한 기준을 산출하는 방식은 어떠한 사건이 사회에 미치는 중요성 등을 다른 산업과 비교하여 결정한다. 그러나 본 논문에서의 주제에 관한 위험도 저감 기준은 연구되어 있는 바가 없다. 또한 기존의 연구된 기준들도 화재만을 다룬 것이 아닌 선박 전체의 위험도 기준이어서 본 논문의 주제와는 다소 거리가 멀다. 따라서 본 논문에서는 위험도 수준에 대한 비교 없이 위험도 저감 방안으로 SIS를 적용하고 그것의 비용-편익을 분석하여 타당성을 검증하는 방안을 사용하도록 한다.

### 2.3.1 기능적 안전

우선 표준 IEC 61508과 IEC 61511에 대해 간단하게 살펴봐야 한다. IEC 61508은 안전관련 전자/전기/프로그램 가능한 전자(Electrical/Electronic/Programmable electronic, E/E/PE) 시스템의 기능적 안전(functional safety)라 불리는 모든 산업 전반에 활용되는 국제표준이다. 그리고 IEC 61511은 IEC 61508을 근거로 한 표준으로 장치산업업을 위한 기능적 안전에 관한 표준이다. 주로 SIS와 같은 시스템에 적용되는 국제표준이다. 이 표준들에서 말하는 기능적 안전은 넓은 관점에서 봤을 때 안전이라는 넓은 개념에 포함되는 용어이다. 안전 기능(safety function)이라고 하면 어떠한 상황에서 안전을 제공하기 위한 기능이라 정의내릴 수 있다. 기능적 안전이라 하면 안전을 제공하기 위한 장치나 시스템, 즉 안전장치들의 기능과 관련된 안전 측면이다. 어떠한 상황에서 특정 안전장치들이 작동하기로 설계가 되어 있는데 이것이 설계대로 작동한다면 기능적 안전이 좋은 것이다. 기능적 안전의 대표적인 예로 자동차 에어백 시스템을 들 수 있다.

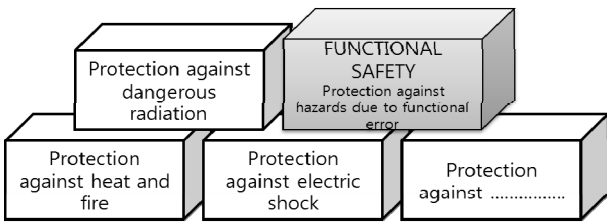


Fig. 5 Concept of functional safety(Dave, 2004)

이러한 기능적 안전을 위해 널리 장치산업 전반에 걸쳐서 널리 사용되는 시스템이 바로 SIS 이다. SIS는 센서(sensor), 논리 분석기(logic solver), 작동기(actuator)로 이루어진 시스템이다. 미리 결정된 어떤 특정 상황이 발생했을 때, 그 상황을 센서를 통해 인지하고 이것을 논리 분석기에서 자동적으로 작동기에 신호를 보내 필요한 안전 기능을 수행하게 하는 시스템이다. 대표적인 예로 화학공정에서 어떤 탱크내의 온도가 일정 온도 이상으로 올라갈 경우에 폭발 사고를 막기 위해 SIS가 자동으로 그 시스템을 정지하는 경우를 들 수가 있다.

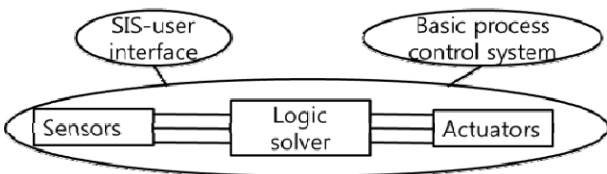


Fig. 6 Structure of safety instrumented system(Dave, 2004)

위 그림에서 기본 공정 제어 시스템(Basic Process Control System, BPCS)란 용어 그대로 기본 공정 제어 시스템이다. 일반적으로 기관실이나 조타실 등에서 여러 가지 수치를 관측하고 어떤 명령을 내리는 등의 역할을 하게 되는데, SIS와 기본 구성은 동일하다 그러나 안전역할을 하느냐, 공정제어와 관련된 역할을

하느냐에 따라서 구분지을 수 있다. 시스템 구성 자체는 동일하기 때문에 SIS의 역할을 BPCS가 수행할 수도 있지만 여분(redundancy)의 개념으로 더욱 안전하게 하기 위해 SIS가 따로 독립되어야 한다.

### 2.3.2 SIS 배경 이론

선박 기관 구역의 화재 안전성을 높이기 위한 SIS를 설계하기 위해 기본적으로 알아야 할 개념들이 존재한다. 먼저 고장 모드(failure mode)의 구분부터 살펴보면 다음과 같다.

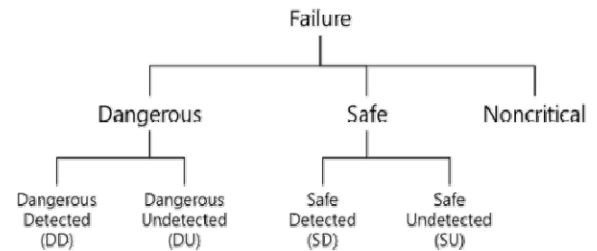


Fig. 7 Failure mode classification (SINTEF, 2010)

- Dangerous: 부품의 failure로 위험한 상황 발생 (요구상황에서 비 작동)
  - Dangerous Undetected(DU): 자동 self-test또는 사람에게 의해서 탐지 되지 않는 dangerous failure이다. 테스트나 필요로 하는 상황이 되었을 때에만 알 수 있다.
  - Dangerous Detected(DD): 자동 self-test또는 사람에게 의해서 탐지 되는 dangerous failure이다.
- Safe: 부품의 failure로 위험한 상황 발생하지 않음(비 요구 상황에서 작동)
  - Safe Undetected(SU): failure가 자동 self-test또는 사람에게 의해서 탐지 되지 않아 시스템의 잘못 정지된다.
  - Safe Detected(SD): 자동 self-test또는 사람에게 의해서 탐지 되어 부품에 의한 시스템 정지를 피할 수 있다.

Table 4 Rate of critical failures(SINTEF, 2010)

	Safe failures	Dangerous failures	Sum
Undetected	$\lambda_{SU}$	$\lambda_{DU}$	$\lambda_{undet}$
Detected	$\lambda_{SD}$	$\lambda_{DD}$	$\lambda_{det}$
Sum	$\lambda_S$	$\lambda_D$	$\lambda_{crit}$

SIS는 그 작동빈도에 따라서 continuous mode와 low demand mode로 구분지을 수 있는데, 본 논문의 적용 시스템은 low demand mode이다. 이에 대한 구분기준은 IEC 61508에 나와 있다.

SIS의 기능을 PFD를 통해서 정량화할 수 있다. PFD는 (Average) Probability of Failure on Demand의 줄임말이다. PFD는 dangerous undetected(DU) failure 에 의한 비가용성

(unavailability)이라 생각할 수도 있다. 다시 말하자면 PFD는 어떤 기간 동안의 기능이 불가능해졌을 때를 말하는 DU failure로 인해 안전을 잃은 정도를 정량화한다. Reliability Prediction Method and Data for Safety Instrumented Systems (SINTEF, 2010)에 의하면 PFD는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PFD_{1001} \approx \lambda_{DU} \cdot \tau/2 \quad (2)$$

$$PFD_{1002} \approx \beta \cdot (\lambda_{DU} \cdot \frac{\tau}{2}) + (\lambda_{DU} \cdot \tau)^2/3 \quad (3)$$

1001 이란, 1 out of 1 이란 뜻으로 single component를 말한다. 1002 는 1 out of 2 란 뜻으로 병렬 구조를 말하는 것이다. 시스템을 구성하고 있는 구조에 따라서 PFD 식이 달라지게 된다. 병렬로 구성이 된 부품들은 common cause failure를 고려해야 하기 때문이다. 똑같은 부품이 병렬로 연결되어 있기 때문에 같은 원인으로 병렬 연결된 부품이 동시에 고장이 날 경우를 고려해야 하는 것이다. 본 논문에서는 1001 구조와 1002 구조의 SIS를 적용한다.

PFD값의 범위에 따라서 Safety Integrity Level(SIL)이라는 개념을 이용하여 구분 지을 수 있다. SIL은 E/E/PE 안전관련 시스템에 할당된 안전 기능의 안전 무결성 요건을 규정하기 위해 구별된 등급이다.(IEC, 1997) SIL 개념을 사용하여 설계단계에서 가용성(availability)을 간편하게 할당함으로 평가할 수 있다.

Table 5 Safety integrity level

SIL	PFD
4	0.0001-0.00001
3	0.001-0.0001
2	0.01-0.001
1	0.1-0.01

### 2.3.3 SIS 적용 방안

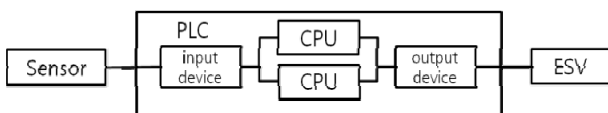


Fig. 8 SIS plan1 for risk reduction

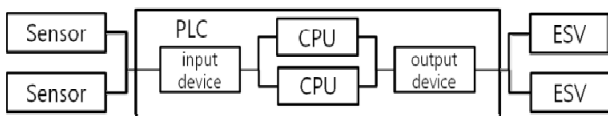


Fig. 9 SIS plan2 for risk reduction

기관 구역에서의 화재 안전성을 향상시키기 위해서 위의 그림과 같이 두 가지의 SIS(이하 연료유 누출감지장치)를 설계하였다.

센서로는 oil leakage sensor를 사용하고, 논리 분석기로는 standard industrial PLC를 사용한다. 그리고 작동기로는 Emergency Shutdown Valve(ESV)를 사용한다. Reliability Prediction Method and Data for Safety Instrumented Systems (SINTEF, 2010)에는 SIS 부품들에 관한 고장률(failure rate)들이 정리되어 있다. 그러나 oil leakage sensor의 고장률은 나와있지 않다. 따라서 이와 유사한 장치들의 통계값을 활용하여 고장률을 결정하고 나머지는 해당 부품의 고장률을 사용한다.

Table 6 Failure rate of SIS component

Component	Failure rate per 10 <sup>6</sup> hours			
	$\lambda_D$	$\lambda_S$	$\lambda_{DU}$	$\lambda_{SU}$
Oil leakage sensor	1.5	1.9	0.5	1.1
Control Logic Unit	1.8	1.8	0.7	1.4
	8.8	8.8	3.5	7
	1.8	1.8	0.7	1.4
ESV	3	2.3	2.1	2.1

첫 번째 방안을 살펴보면 가장 간단한 형태로 각 구성부품들이 직렬로 가장 간단하게 연결되어 있다. 두 번째 방안은 구성 부품 중에서 고장률이 높은 Control Logic Unit의 CPU와 input element인 oil leakage sensor, 작동기 ESV를 병렬로 연결하였다.

부품이 직렬로 연결되어 있는 경우에는 Table 6의 고장률을 위의 (2) 식에 대입하여 각각의 부품별 PFD를 계산한다. (2)식에서  $\tau$ 는 1 shipyear(=8760 hours)로 계산한다.

$$PFD_{OLS} \approx 0.5/10^6 \cdot 8760/2 = 0.00219$$

$$PFD_{PLC-I} \approx 0.7/10^6 \cdot 8760/2 = 0.00306$$

$$PFD_{PLC-C} \approx 3.5/10^6 \cdot 8760/2 = 0.01533$$

$$PFD_{PLC-O} \approx 0.7/10^6 \cdot 8760/2 = 0.00306$$

$$PFD_{ESV} \approx 2.1/10^6 \cdot 8760/2 = 0.009198$$

병렬로 이루어져 있는 CPU와 ESV의 경우에는 (3)식을 활용한다. (3)식에 들어갈  $\beta$ 값은 CPU의 경우에는 0.07, 센서의 경우에는 0.05, ESV는 0.03 임을 Reliability Prediction Method and Data for Safety Instrumented Systems (SINTEF, 2010)에서 알 수 있다.

$$PFD_{OLS} \approx 0.05 \cdot (0.5/10^6 \cdot 8760/2) + (0.5/10^6 \cdot 8760)^2/3$$

$$= 0.000116$$

$$PFD_{PLC-C} \approx 0.07 \cdot (3.5/10^6 \cdot 8760/2) + (3.5/10^6 \cdot 8760)^2/3$$

$$= 0.001073$$

$$PFD_{ESV} \approx 0.03 \cdot (2.1/10^6 \cdot 8760/2) + (2.1/10^6 \cdot 8760)^2/3$$

$$= 0.000389$$

이러한 계산을 통해 첫 번째 방안의 PFD 값은

$$PFD_{Total} = 0.03285$$

이고, SIL 수준은 SIL 1 인 것을 확인할 수 있다.

두 번째 방안의 PFD 값은

$$PFD_{Total} = 0.00802$$

이고 SIL 수준은 SIL 2 인 것을 확인할 수 있다.

### 2.4 비용효과분석

설계된 연료유 누출감지장치를 연료유 누출이 잘 일어나는 배관이나 부품에 부착하게 되면 연료유 누출이 감지되면 해당 시스템을 멈추게 되어 화재 발생 가능성을 낮춰준다. 그러나 연료유 누출감지장치가 해당 시스템을 멈추게 되면 그것을 정비하고 다시 시작하기 위해 시간이 필요로 하다. 그 시간을 대략 6시간이라 가정한다. 연료유 누출감지장치를 설치하기 이전의 사고 빈도를 a라 하고, 연료유 누출감지장치의 PFD를 b라 하자. 장치에 의해 해당 시스템이 멈추는 시간은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Downtime = (a - a*b)6 = a(1 - b)6 \quad (4)$$

위에서 사용하였던 선박 용선료를 곱하면 연료유 누출감지장치에 의해 발생한 비가동시간에 따른 추가 비용을 계산할 수 있다.

앞에서 이용한 fault tree와 event tree를 활용하여 연료유 누출감지장치를 적용한 이후의 결과를 다시 계산하면 연료유 누출에 의한 화재 발생 빈도와 영향은 다음과 같다.

Table 7 Risk reduction by SIS

	Before SIS Application	SIS Option 1	SIS Option 2
Frequency (#/shipyear)	1.03.E-03	3.39.E-05	8.28.E-05
Consequence (USD/shipyear)	5654.26	190.73	50.48

따라서 앞에서 설계한 SIS 방안 1을 선박 기관 구역에 적용할 경우 1 shipyear 당 5463 USD 만큼 절감할 수 있다. 두 번째 방안을 적용할 경우에는 1 shipyear 당 5603 USD 만큼 절감할 수 있다.

선박의 수명을 25년이라 하고 물가 상승률을 3%라 가정하고 그것을 다시 현재 가치로 환산한다. 선박 기관구역의 연료유 누출이 잘 일어나는 배관, 부품 등에 SIS를 설치하는 전체 비용이 현재 가치를 넘지 않는다면 적용 가능하다.

설치해야 하는 연료유 누출감지장치의 수를 파악하기 위해 연료유 누출에 의한 화재의 원인을 살펴보면 다음과 같다.

### Source of Oil Leakage Fire

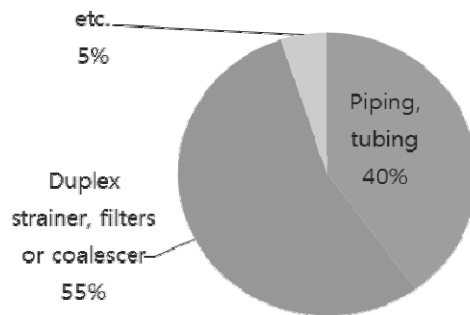


Fig. 10 Source of oil leakage fire(USCG, 1998)

배관(piping, tubing) 문제 때문에 발생하는 화재의 경우에는 의장설치 기술 향상, 진동 저감, 유지활동 등으로 충분히 예방 가능하다. 13000 DWT 탱커와 벌크 캐리어의 도면을 실제 확인하여 duplex strainer, filters, coalescer의 부품의 수를 확인해 본 결과 평균 2.5개라는 것을 알 수 있었다.

SIS 부품의 가격구성은 그 자체로 특허와 관련 있는 경우가 많아 해양 플랜트 전문가와의 면담을 통해 정보를 획득하였다. 그 정보는 다음과 같다.

Pressure transmitter	: 1,500 USD
Logic solver(CPU, 1oo1)	: 20,000 USD
Logic solver(CPU, 1oo2)	: 40,000 USD
Valve	: 6,000 USD

이 가격을 토대로 전체 설치비용을 구하고 설치 시 절감되는 비용의 현재 가치를 구해서 비교하면 다음과 같다.

Table 8 Cost-benefit analysis

	SIS Option 1	SIS Option 2
Reduced Cost(USD)	93,019	95,407
Installation (USD)	68,750	137,500

첫 번째 방안의 경우에는 절감비용이 설치비용에 비해 높기 때문에 적용 가능하다고 볼 수 있다. 두 번째 방안의 경우에는 절감비용에 비해 설치비용이 더욱 높아 적용하기에 부적절하다고 할 수 있다. 첫 번째 방안은 SIL1 수준이고 두 번째 방안은 SIL2 수준이다. 일반 상선에 적용하기에는 SIL1 수준이 비용편익 면에서 더 타당하다는 점을 알 수 있다. 참고로 해양플랜트에 적용되는 SIS는 일반적으로 SIL2 수준이고, subsea 시스템의 경우에는 SIL3, 우주항공 분야의 SIS는 SIL4 수준을 따른다고 한다. 따라서 향후 선박의 대형화 고 부가가치화가 된다면 SIL 수준이 높은 SIS의 적용이 가능해질 것이라 생각된다.

### 3. 결론

선박의 화재는 인명과 재산을 위협하는 요소이다. 따라서 위험도 기반 평가방법론을 활용하여 선박의 화재 안전성, 특히 기관 구역에서의 화재 평가할 필요성이 있다. 본 논문에서는 선박 기관 구역에서의 연료유 누출에 의한 화재 안전성을 위험도 기반 평가방법론인 Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis를 활용하여 평가하였고, 철도, 발전소, 자동차 등 많은 산업 분야 전반에 걸쳐서 활용되고 있는 SIS를 적용함으로 기관 구역의 화재 안전성을 향상시키는 방안을 강구하였다. 본 연구에서는 보험이나 towing 비용, 유지 활동 등은 고려하지 않았기 때문에 실제 선박에서의 화재에 의한 비용 손실과는 차이가 있을 수도 있다. 그러나 여러 통계 자료를 활용하여 위험도 기반 평가 방법론을 사용하여 정량화하였다는 점과 선박에는 사용되지 않던 SIS를 적용하고 그 타당성을 검증했다는 점에서 유의미하다고 할 수 있다.

### 후 기

본 연구의 일부는 서울대학교 BK21 해양기술인력양성사업단과 해양기술인력양성사업단과 지식경제부 산업원천기술개발사업(위험도기반 선박안전설계핵심기술개발(10035177))의 지원으로 수행되었습니다. 위 기관의 후원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

Dave, M., 2004. *Practical Hazops, Trips and Alarms*. Elsevier.  
 DNV, 2000. *Engine room fires can be avoided*. DNV Report.  
 IEC, 1997. *IEC 61508*.  
 IMO, 2002. *Report on FSA Study on Bulk Carrier Safety (MSC 75/5/2)*, IMO, Maritime Safety Committee.  
 IMO, 2009. *SCLAS*.  
 IMO, 2010a. *IACS FSA study-Steps 2 (Risk Analysis)* (MSC 87-INF. 4), IMO, Maritime Safety Committee.  
 IMO, 2010b. *IACS FSA study-Steps 3 and 4 (Risk control options and Cost benefit assessment)* (MSC 88-INF. 6), IMO, Maritime Safety Committee.

Katarina, L. & Mateusz, S., 2009. *Safety Assessment for Oil Tankers and Container Vessels Focused on Fire and Explosion In the Machinery Space*, Lund, Sweden: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.  
 Lee, J.O. Yeo, I.C. & Yang, Y.S., 2001. A Trial Application of FSA Methodology to the Hatchway Watertight Integrity of Bulk Carriers. *Marine Structures*, 14, pp. 651-667.  
 Malm, D. & Pettersson, A., 2008. *Reliability of Automatic Sprinkler Systems - An Analysis of Available Statistics*, Lund, Sweden: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.  
 NK., 1994. *Engine Room Fire - Guidance to fire protection*, Tokyo, Japan : Nippon Kaiji Kyokai.  
 SINTEF, 2009. *OREDA*, Trondheim, Norway : SINTEF.  
 SINTEF, 2010. *Reliability Prediction Method and Data for Safety Instrumented Systems*, Trondheim, Norway : SINTEF.  
 USCG, 1998. *Investigation of Fuel Oil/Lube Oil Spray Fires On Board Vessels*, Springfield VA, USA:USCG R&D center.  
 Wong, Gottuk, Rose-Pehrsson, Shaffer, Tatem & Williams, 2000. *Results of Multi-Criteria Fire Detection System Tests*, Washington DC, USA: Naval Research Laboratory.  
 Zalosh, Beller, & Till., 1996. *Comparative Analysis of the Reliability of Carbon Dioxide suppression Systems As Required by 46 CFR*, USA: USCG Research & Development Center.

