

선박의 의장시스템에 대한 안전성 및 Redundancy 평가 방법론 연구

문경태*, 양영순†*, 윤여표**, 유원선***

서울대학교 조선해양공학과, 해양시스템공학연구소(RIMSE)*
삼성중공업 여객선설계팀**
㈜ 인포겟시스템***

The Study on Risk and Redundancy Assessment Methodology of Ship
Machinery System

Kyung-Tae Moon*, Young-Soon Yang†*, Yeo-Pyo Youn** and WonSun Ryu***

Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, RIMSE*
Cruise & Ferry Team, Samsung Heavy Industries Co. LTD**
InfoGet System***

Abstract

According to the new rules and regulations (New SOLAS), major safety critical systems are to be designed to be redundant, which is called 'Redundancy Design'. This paper was to quantitatively analyze the degree of influence of the redundancy design applied to major safety critical systems using IMO's FSA(formal Safety Assessment) method. For the purpose of this study, the diesel engine system, which is actually one of major safety critical systems, was dealt with FMEA, FTA and ETA technique. In addition, whether the redundancy was met or not was verified and the degree of safety, or redundancy, was represented in terms of reliability. In conclusion, the safety of propulsion systems is possibly assessed systematically by estimating the risk level in terms of frequency and fatality.

※ Keywords: Redundancy design(여유설계), Redundancy(리던던시), FSA(공식안전성평가), System safety(시스템 안전성), Risk(위험도)

접수일: 2009년 6월 9일, 승인일: 2009년 9월 21일

† 교신저자: ysyang@snu.ac.kr, 02-880-7330

1. 서론

최근, 국제교역의 확대에 따른 선박의 고속화 및 대형화, 해양자원 개발을 위한 해양구조물의 증가 및 대형화, 대형 여객선의 등장 등으로 인하여 대형 해양사고의 위험도 급격히 증가하고 있다.

국제해사기구(IMO)에서는 이에 대응하기 위해 지금까지의 경험기반의 결정론적 접근방법(deterministic approach)이 아닌, 확률기반의 위험도 기반 접근방법(risk based approach)과 이를 적용한 모델링 및 시뮬레이션을 통해 보다 체계적이고 과학적으로 안전성을 확보하는 방안을 제시하고 있다. 이의 가장 대표적인 예는 대체설계(alternative design) 및 여객선의 Safe Return to Port(SRtP) 등이 있다. 또한 IMO에서는 선박의 설계 및 건조 단계에서 미리 안전성을 확보하기 위한 새로운 개념의 법규체계, 즉 신개념 선박건조기준(GBS)의 개발을 추진하고 있다.

유럽에서는 생산 및 설계차원의 기술개발에서 안전 및 환경보호를 위한 기술개발로 연구방향을 전환하고, 설계 및 운항 시 안전에 대한 총체적 관점에서의 접근을 통하여 선박의 안전성을 확보하고 관련 법규에 반영하기 위한 노력을 강화하고 있다. 이를 위해 Safer EU-RORO, SAFEDOR 등 EU 공동프로젝트가 수행되었고 추가적인 연구개발을 추진하고 있다.

이러한 흐름에 따라 한국의 조선업계에서도 SRtP 및 대체설계 등 위험도/성능 기반 법규에 대한 대비를 할 필요성이 있으며, 실질적으로도 향후 개발할 새로운 개념의 선박들에 대한 안전성 문제를 해결하기 위한 확률 기반의 위험도 기반 접근방법에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 현재 큰 이슈가 되고 있는 성능 기반 기준(performance based standard)인 SRtP 법규와 관련된 주요 의장시스템의 리던던시(redundancy)가 실제 안전성에 미치는 영향을 IMO의 공식안전성평가(Formal Safety Assessment, FSA) 과정을 통하여 정량적으로

평가할 수 있는 방법론을 연구하였으며, 이를 통한 위험도 기반 접근방법 및 GBS에 대한 대비를 도모하였다.

2. 위험도/성능 기반 법규 및 위험도 기반 설계

2.1 신개념 선박건조기준 (Goal Based Standard, GBS)



Fig. 1 GBS framework (www.safedor.org)

MSC 77/2/5에서 바하마와 그리스는 IMO가 가장 기본적인 수준(Goal)을 수립하고 선급이나 설계자 및 조선소로 하여금 그러한 Goal을 만족하기 위해 자유로운 방식을 선택할 수 있도록 해야 한다고 주장을 하면서 GBS가 처음 언급이 되었고, MSC 78에서부터 신개념 선박건조기준(Goal Based New Ships Construction Standards)이 소개되었다.

IMO의 정의에 따르면 GB는 다음과 같은 특징을 갖는다(IMO 2008a).

1. 선박의 수명 동안 직면할 수 있는 모든 안전 및 환경문제를 고려하는 폭넓은 기준이며;
2. 여기서 요구되는 수준은 선급이나 다른 승인 기구, 행정기관 및 IMO가 제시한 요구사항을 적용함으로써 만족되어야 하며;
3. 명백하고, 증명가능하고, 지속적이며, 이행 가능하고 선박의 형태 및 응용된 기술에 관련 없이 모두 적용 가능해야 하며
4. 해석 시 혼동의 여지가 없도록 구체적이어야 한다.

즉, GBS 는 선박안전설계에 대한 표준으로서 ‘룰(rule)을 위한 룰’개념을 가지고 만들어진 법규체계(regulation framework)이다. GBS 의 기본적인 프레임은 Fig. 1 과 같다.

IMO 에서 Goal 을 제시하면 그 Goal 을 만족시키기 위한 방법은 여러 형태가 있을 수 있다. 우선 기존의 전통적인 선박의 경우, 기존과 같이 선급에서 제시해온 법규에 따라 승인이 이루어질 수 있다. 이 때 선급은 선급 룰이 IMO 의 Goal 에 적합하다는 것을 증명하여야 한다.

새로운 형태의 선박의 경우에는 기존의 선급 룰과 같은 결정론적 기반의 법규가 아닌 위험도 기반 룰(risk-based rule)을 적용하여 승인을 받거나, 혹은 설계자나 건조자가 직접 위험도 분석을 통해 goal 을 만족시킨다는 것을 증명하여야 한다.

따라서, 앞으로 한국에서 고부가가치선을 건조하기 위해서는 위험도 분석(risk analysis)에 대한 준비가 필요하다.

2.2 대체설계(Alternative Design)

대체설계란 선박의 설계 시 기존의 룰 범위를 벗어나는 설계를 할 필요가 있을 경우 (대표적인 예: 여객선의 Main Fire Zone(MFZ) 길이가 극장이나 식당의 배치 때문에 룰에서 벗어날 필요가 있을 경우) 위험도 분석을 통해 기존의 룰 수준의 안전성만큼을 보장할 수 있다는 것을 정량적으로 증명하여야 한다는 것이다(IMO 2006a).

이 또한 위험도 분석의 중요성을 제시해주는

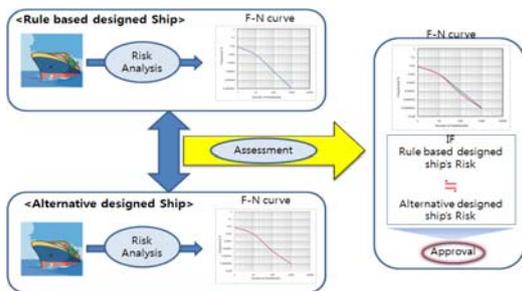


Fig. 2 Alternative design

하나의 예라 말할 수 있다.

2.3 위험도 기반 설계 (Risk Based Design, RBD)

위험도 분석과 설계를 합친 개념이다. 기존의 위험도 분석은 설계가 모두 끝난 후 이루어 지기 때문에 위험도 분석결과를 설계에 반영하는 것이 어렵고 반영을 한다고 하더라도 설계변경 비용이 높아 효율적이지 못하였다. 위험도 기반 설계에서는 위험도 분석을 설계과정에 통합하여 실제 설계 단계에서 성능과 안전성을 동시에 고려하여 궁극적인 의미에서 최적화된 설계를 할 수 있다. 또한 위험도 기반 설계에서는 기존의 룰 범위 밖에서도 안전하다는 것만 정량적으로 제시한다면 설계에 대한 승인을 받을 수 있기 때문에 기존의 룰 기반 설계보다 더욱 혁신적인 설계 및 최적화된 설계를 할 수 있는 기반이 된다.

2.4 Safe Return to Port(SRtP)

선박의 인명문제를 다루는 법률인 SOLAS(Safety of Life at Sea)에서는 화재나 침수 시 배를 포기하고 탈출하도록 요구하고 있다. 하지만 수천 명의 인원이 승선하고 있는 대형 크루즈에서는 선박의 포기 및 탈출은 매우 위험하기 때문에, IMO 에서는 여객선에 탑재된 구명보트 비상탈출방식으로부터 “선박=구명보트” 개념에 착안하여 선박 자체의 안전도를 최대한 유지하면서 안전하게 항구까지 복귀할 수 있도록 Rule 과 Regulation 을 개정하였는데 이것이 바로 SRtP 개념의 New SOLAS 이다. 이에 따르면 주요 의장시스템(safety critical system)들은 여유분을 포함하여 설계되어야 한다 (redundancy design, 여유설계). 그런데 이 법규는 구체적인 룰이 아닌 성능 기준 (performance standard)이기 때문에 실질적으로 이를 보장하기 위해서는 리던던시를 분석하여 이를 증명하여야 한다. 즉, 위험도 분석이 필요하다.

일반적인 리던던시의 뜻은 시스템의 신뢰성

(reliability)을 높이기 위한 주요 요소들의 중복이라는 뜻을 가지는데, SRtP 에서 말하는 리턴던시란 한 구획(compartment) 혹은 한 요소의 고장/파괴 시 선박 전체의 기능이 회항(Return to Port)할 수 있을 정도로 유지하여야 한다는 뜻이다. SRtP 를 위해 여유 설계가 요구되는 시스템들은 아래와 같다(IMO 2006b, IMO 2006c).

- Propulsion systems and their necessary auxiliary and control systems.
- Ship's electrical-generation and their auxiliaries vital to the vessel's survivability and safety.
- Steering system and steering control systems.
- System for fill, transfer, service of fuel oil.
- Internal communications system
- External communications.
- Fire main system.
- Fixed fire-extinguishing systems.
- Fire and smoke detection systems.
- Bilge and ballast systems.
- Minimum navigation systems.
- Power operated water tight and semi water tight doors.
- Basic services to safe areas
- Flooding detection system.
- Other system vital to damage control efforts.

3. 공식안전성평가 (Formal Safety Assessment, FSA)

FSA 는 위험도 분석과 cost-benefit 평가를 포함한 공식적인 절차를 통해 인명, 재산, 환경 등 해상 안전을 강화하기 위한 체계적인 안전성 분석 방법론이다(Lee et al. 2001).

FSA 의 주 목적은 IMO 를 제정과정으로, 선종에 대한 정량적인 안전성 수준 확인, 새로운

룰에 대한 안전성 평가, 기존 룰 및 개선된 룰에 대한 안전성을 정량적으로 비교 하는 데 이용된다. FSA 는 Fig. 3 와 같은 5 과정으로 나누어져 있다(IMO 2008c).

본 논문에서는 추진시스템의 안전성 및 리턴던시를 정량적으로 평가하기 위해서 SRtP 의 대상이 되는 RoPax 선박에 대한 FSA 를 통해 Loss of propulsion 의 위험도 모델(risk model)을 구성하였고, 이를 바탕으로 추진시스템의 위험도를 F-N curve 로 도출하였다.

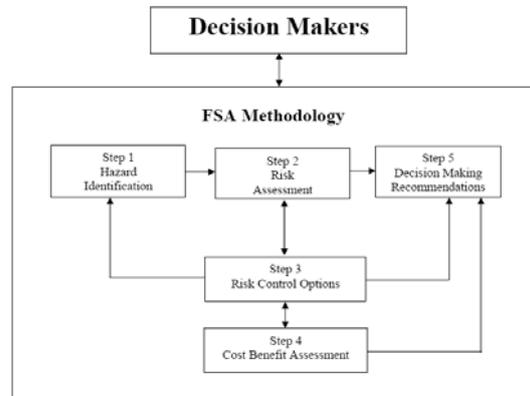


Fig. 3 FSA process

4. 여유설계 평가 예: 간략화 된 추진시스템

4.1 문제 정의

-분석 범위

본 평가의 목적은 추진시스템의 고장으로 인한 인명 피해의 위험성 및 여유설계를 통한 안전성 향상 수준의 정량적 평가이다. 기존의 FSA 의 분석은 주로 사상자(fatality)가 일어나는 충돌(collision), 화재/폭발(fire/explosion) 등의 위험도 모델을 기반으로 이루어져왔다. 본 연구에서는 추진시스템의 고장이라고 하는 위험도를 분석 대상으로 삼았기 때문에, 추진시스템의 고장으로 인해 좌초(stranding/grounding)가 연쇄적으로 일어나는 사고 시나리오를 설정하여 위

험도 모델을 구성하였고 이를 통해 계산된 위험도 수준을 F-N curve 로 나타내었다.

-대상 선종

FSA 의 대상 선종은 SRtP 가 적용되는 RoPax 로 선정하였다. 이 때의 관련 자료는 기존의 IMO FSA:RoPax 연구자료(IMO 2008b)를 참고하였다.

-대상 시스템

FSA 의 대상이 되는 시스템은 여유설계가 요구되는 추진시스템이다. 시스템은 고장 확률 데이터가 존재하는 수준에서 제시하였다. 이 때 추진시스템 및 위험도 모델의 기본적인 구성은 Svein Kristiansen(2005)를 참고 하였으며 Fig.4 와 같다.

4.2 Hazard Identification(HAZID) : FMEA

현재 분석의 대상이 되고 있는 시스템은 기계적 시스템이며, 이 시스템의 고장에 대한 위험요소들을 찾아야 한다. 이런 경우, 보통 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis) 를 분석도구로 이용한다. FMEA 는 시스템을 구성하는 모든 요소들에 대해 각각의 고장모드 및

영향을 분석하여 전체적인 시스템의 위험요소를 찾아내는 Bottom-Up 방식의 위험요소 분석법이다.

FMEA 의 이런 특징을 이용하면 기본적인 수준의 리던던시를 확인 할 수 있다. 각 요소의 고장 시 전체 시스템에 대한 영향을 살펴보면, Fig. 5 중 2.Gear Box 와 3.Shaft Line 의 경우, 그 요소의 고장이 추진시스템의 고장으로 바로 연결되므로 여유설계가 요구되는 부분이라는 것을 도출 할 수 있다. 하지만 여기서는 고장의 확률을 고려하고 있지 않고 여러 고장이 동시에 일어날 경우를 고려하기 힘들기 때문에 이러한 사항의 고려는 뒤의 위험도 평가(risk assessment)에서 자세하게 이루어진다.

FMEA 의 이런 특징을 이용하면 기본적인 수준의 리던던시를 확인 할 수 있다. 각 요소의 고장 시 전체 시스템에 대한 영향을 살펴보면, Fig. 5 중 2.Gear Box 와 3.Shaft Line 의 경우, 그 요소의 고장이 추진시스템의 고장으로 바로 연결되므로 여유설계가 요구되는 부분이라는 것을 도출 할 수 있다. 하지만 여기서는 고장의 확률을 고려하고 있지 않고 여러 고장이 동시에 일어날 경우를 고려하기 힘들기 때문에 이러한

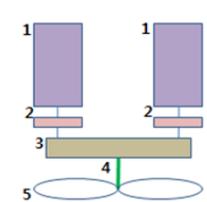
System description	contents												
Functional purpose	System of consideration is propulsion system of Ropax ship and Type of propulsion system is diesel engine system.												
Component consistency	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: top;"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Component</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Main Diesel Engine Modules</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Clutch</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Gear</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Shaft Line</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Controllable Pitch Propeller</td> </tr> </tbody> </table> 	No.	Component	1	Main Diesel Engine Modules	2	Clutch	3	Gear	4	Shaft Line	5	Controllable Pitch Propeller
No.	Component												
1	Main Diesel Engine Modules												
2	Clutch												
3	Gear												
4	Shaft Line												
5	Controllable Pitch Propeller												
Functional order	1) Operation : 70% - both engine, 30% - one engine (In this condition, engine power is sufficient to maintain speed) 2) Engine's power is transferred through gear and shaft. ...												

Fig. 4 System description

Description of unit			Description of failure		Effect of Failure		Detection of Failure	Failure rate	Risk Reducing Measures	Remarks
ID	ITEM	Function	Failure Mode	Failure cause	Local	End				
1	Engine Module	Generating Propulsion power	Stop	Fuel oil system failure	Loss of engine 1	Reduces speed	Failure alarm	Remote	Reducing pitch cut off	Engine 2 is functioning dock repair
			Stop	Exhaust valve failure	Loss of engine 1	Reduces speed	On watch	Remote	Reducing pitch cut off	Engine 2 is functioning harbor repair
			Stop	Inlet valve failure	Loss of engine 1	Reduces speed	On watch	Very unlikely	Reducing pitch cut off	Engine 2 is functioning harbor repair
			Stop	Lubrication system failure	Loss of engine 1	Reduces speed	Failure alarm	Remote	Reducing pitch cut off	Engine 2 is functioning harbor repair
			Stop	Cooling system failure	Loss of engine 1	Reduces speed	Failure alarm	Occasional	Reducing pitch cut off	Engine 2 is functioning Onboard repair
			Stop	Crankshaft Failure	Loss of engine 1	Reduces speed	On watch	Occasional	Reducing pitch cut off	Engine 2 is functioning harbor repair
			Reduced Function	Piston running hot	Loss of engine 1	Reduces speed	On watch	Very unlikely	Reducing pitch cut off	Engine 2 is functioning Onboard repair
2	Gear Box	Reduce number of revolution	No power transmittal	Broken cog	Loss of Gear Box	No propulsion	On watch	Remote-Occasional	Stop main engine. Lock shaft line	Both gearwheels are failed Harbor repair
3	Shaft Line	Transmit Propulsion Power	No power transmittal	Broken shaft	Loss of Shaft	No propulsion	On watch	Remote	Stop main engine. Lock shaft line	Repair in dock
4	Controllable Pitch Propeller	Propulsion	Reduced Function	Broken blade	Reduces function	Reduces speed	On watch	Occasional	Reduce main engine power Reduce propeller pitch	Repair in dock

Fig. 5 FMEA of propulsion system

사항의 고려는 뒤의 위험도 평가(risk assessment)에서 자세하게 이루어진다.

4.3 Risk Assessment(1)

-Cause and Frequency Analysis : FTA

Risk assessment 과정은 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 사건이 일어나는 이유 및 확률을 분석하여 Frequency Analysis 이고, 다른 하나는 사건이 일어났을 경우 그에 따른 결과를 분석하는 Consequence Analysis 이다.

본고에서 다루는 추진시스템의 고장확률에 대한 분석은 주로 결함수 분석(Fault Tree Analysis,

FTA)방법론을 이용한다. FTA 에서는 사건이 일어날 수 있는 과정을 연역적으로 추론한다. 즉, 전체 시스템이 고장을 일으킬 수 있는 이벤트들을 찾아 이를 다시 또 하위 이벤트로 분석하는 Top-Down 형태로 이루어지는 분석법이다. FTA 는 기본적으로 정성적인 방법이나 정량적인 분석이 가능하기 때문에 실제 사건의 발생확률을 구하는 데 효과적이다. 추진시스템에 대한 Fault Tree 는 Fig. 6 와 같다.

Fault Tree 가 구성되었다면, 이를 바탕으로 고장의 가장 짧은 경로를 찾는 Cut-set 분석을 할 수 있다. 여기서 도출된 Single-Order cut set 은

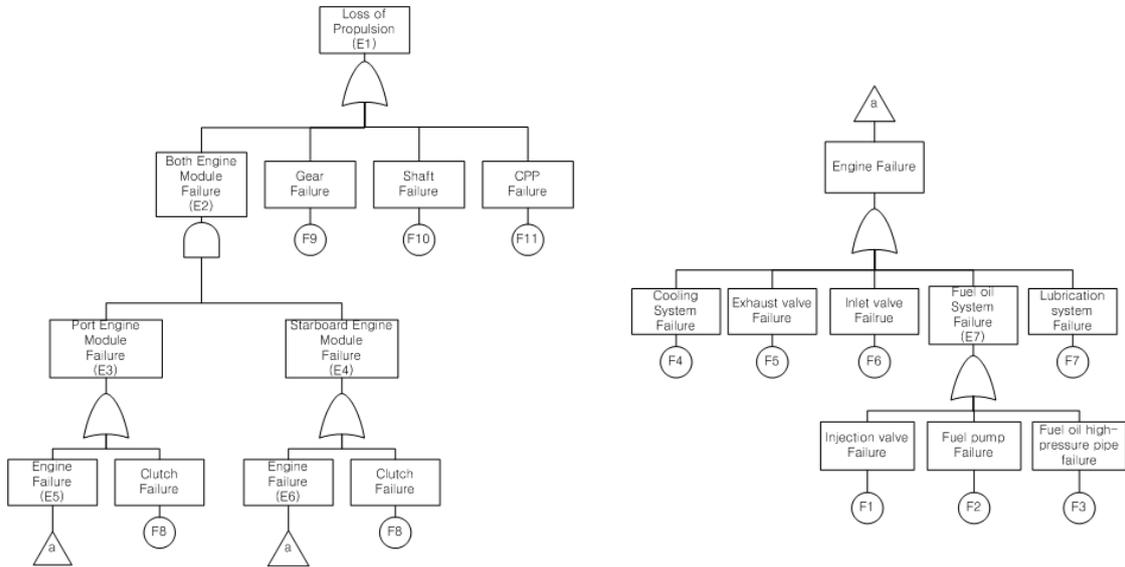


Fig. 6 Fault tree of propulsion system

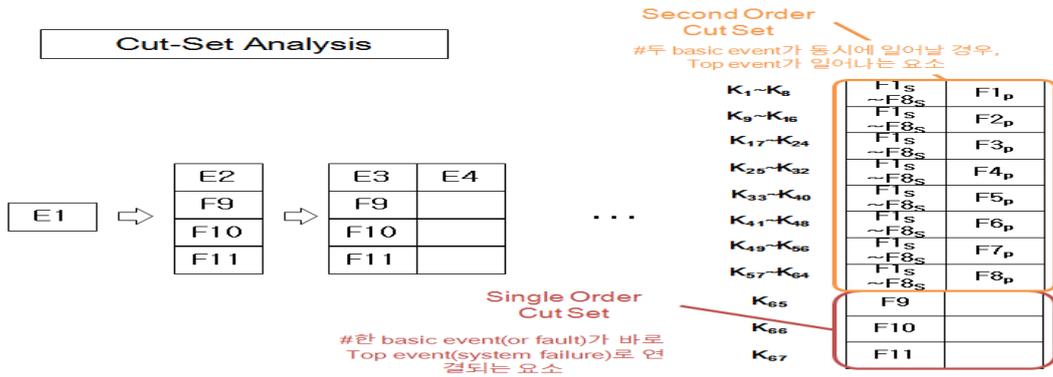


Fig. 7 Cut-set analysis of propulsion system

리던던시에 어긋나는 요소들, 즉 한 부품의 고장이 전체 시스템의 고장을 일으키는 요소를 의미한다. Cut-set 분석과정 및 결과는 다음 Fig. 7와 같다.

Fault Tree를 바탕으로 추진시스템이 고장 발생률을 계산할 수 있다. 일반적으로 시스템 요소의 고장확률은 MIL-STD 217(Military Handbook) 혹은 NSWC(Naval Surface Warfare Center) 등의 모델이나 NPRD(Non-electronic

Parts Reliability Data), OREDA(Offshore Reliability Data) 등의 라이브러리와 같은 신뢰성 기록자료를 이용한다. 본고에서 다루는 추진시스템의 고장확률은 디젤엔진의 신뢰성을 분석한 Buksa et al.(2005)의 고장확률 값(F1~F7)과 Svein Kristiansen(2005)에서 제시된 고장확률 값(F8~F11)을 이용하였고, 이를 Table 1에 제시하였다. 고장확률의 값은 1년 동안 고장 발생률을 의미한다.

이를 통해 추진시스템의 고장확률을 계산하는 과정은 Table 2 와 같다. 추진시스템이 고장 날 확률은 $Q_{E1}=0.701$ 이다.

Table 1 Failure rate of propulsion system component

Failure	Failure description	Failure rate
F1	Injection valve failure	0.062
F2	Fuel Pump failure	0.107
F3	Fuel oil high-pressure pipe failure	0.048
F4	Cooling system	0.229
F5	Exhaust valve failure	0.386
F6	Inlet valve failure	0.048
F7	Lubrication system failure	0.149
F8	Clutch failure	0.052
F9	Gear failure	0.236
F10	Shaft failure	0.029
F11	CPP failure	0.187

Table 2 Calculation of propulsion system failure rate

Event	Calculation	Failure rate
Q_{E7}	$1-(1-F1)*(1-F2)*(1-F3)$	0.203
$Q_{E5,6}$	$1-(1-F4)*(1-F5)*(1-F6)*(1-Q_{E7})*(1-F7)$	0.694
$Q_{E3,4}$	$1-(1-Q_{E5})*(1-F8)$	0.709
Q_{E2}	$Q_{E3} * Q_{E3}$	0.504
Q_{E1}	$1-(1-Q_{E2})*(1-F9)*(1-F10)*(1-F11)$	0.701

4.4 Risk Assessment(2)

-Consequence Analysis : ETA

본 분석단계에서는 추진시스템의 고장으로 인해 일어날 수 있는 Consequence 를 사건수 분석(Event Tree Analysis, ETA)을 통해 분석하였다. 추진시스템의 고장을 Initial Event 로 보고 이와 관련하여 영향을 미칠 수 있는 통제척도(Control measure, CM)들을 선정하여 전체 ETA 를 구성하였다. 일반적으로 CM 의 확률 값들은 Historical data 및 시뮬레이션 혹은 전문가의 가정을 통해 결정한다.

본 연구에서는 7 개의 CM 을 설정하여 Event Tree 를 구성하였다. Hansson and Kiær(1997)에 의하면 좌초(grounding)가 일어날 확률은 추진시스템의 고장확률의 약 10^{-3} 배 정도이다. 따라서, CM1~5 의 확률 값들의 곱이 약 10^{-3} 정도가 되도록 각 CM 의 확률 값을 선정하였다. CM6~7 의 값은 FSA:RoPax(IMO 2008b)에서 제시된 확률 값을 참고로 하여 선정하였다. 최종적으로 구성된 Event Tree 는 Fig. 8 과 같다. Event Tree 에 따라 총 9 가지 경우의 Consequence 가 도출되었고, 이 중 가장 심각한 2 가지 경우에서 사망자가 발생한다. 이 때 구체적인 사망자의 수는 FSA:RoPax 연구 자료(IMO 2008b)를 참고 하여 계산하였다. 이 때의 가정은 다음과 같다.

1. 선박의 정원은 1000 명(전체 RoPax 의 평균 값)
2. Passenger load 는 운항 중인 선박의 25%는 정원, 25%는 정원의 반, 50%는 정원의 75%를 운반 중이라 가정
3. 선원은 100 명으로 가정
4. Flooding 으로 인한 fatality rate 는 Slow sinking 의 경우 12%, Rapid capsizing 의 경우 66%라 가정. (시뮬레이션을 통한 계산 값)

결과를 Fig. 9 로 나타내었다. 또한 이를 기존의 FSA:RoPax(IMO 2008b)의 위험도 모델에 더하여 선박의 전체 위험도를 Fig. 10 로 나타내었다.

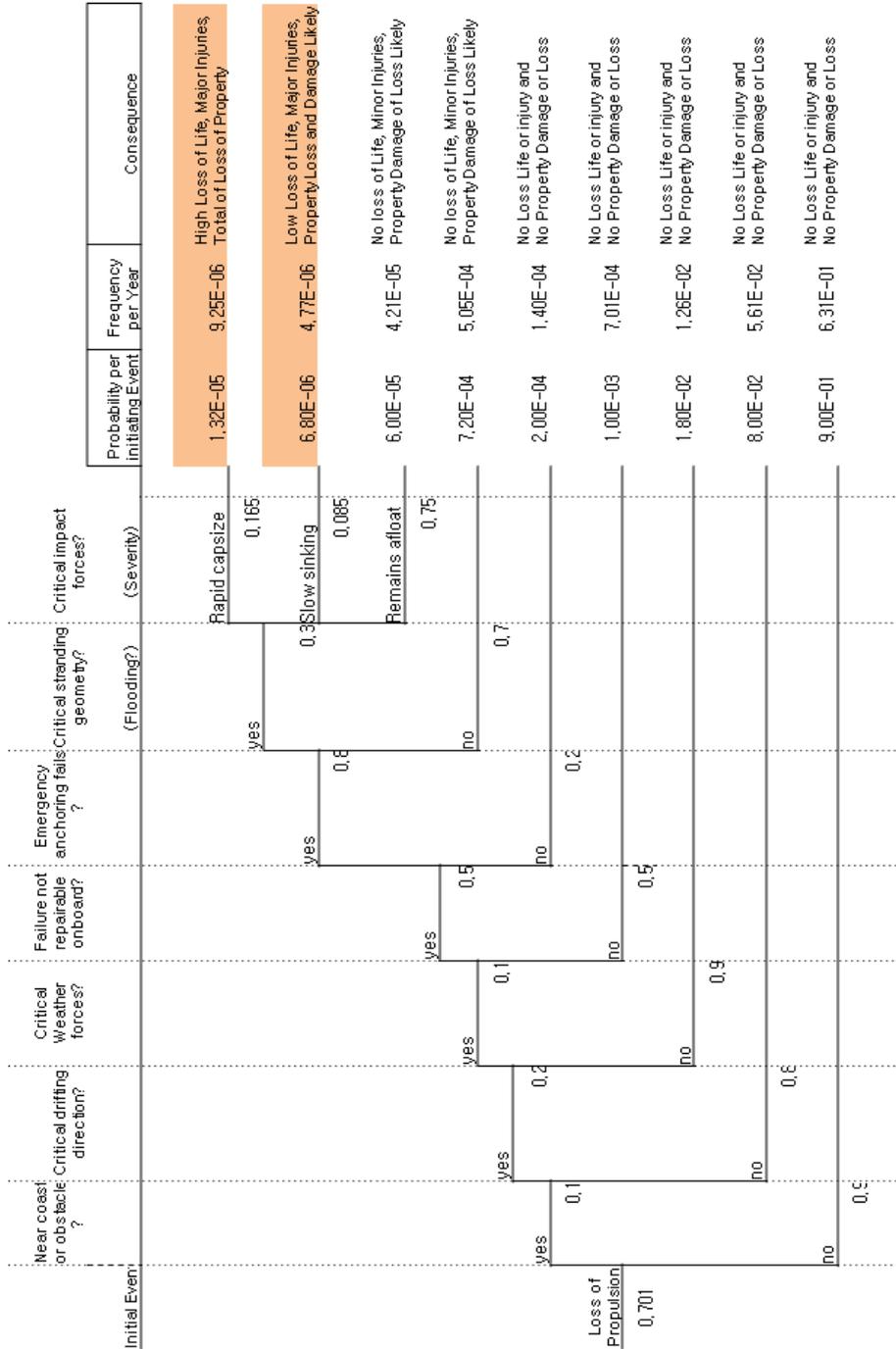


Fig. 8 Event tree of propulsion system

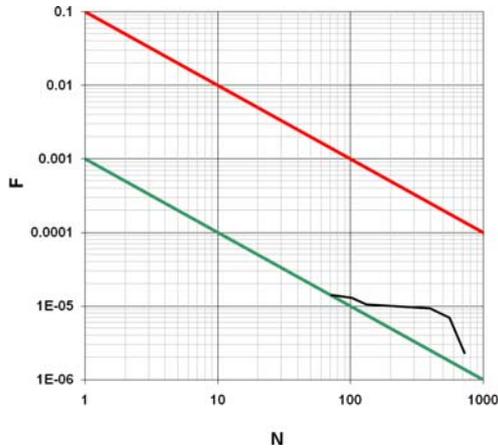


Fig. 9 FN curve of loss of propulsion

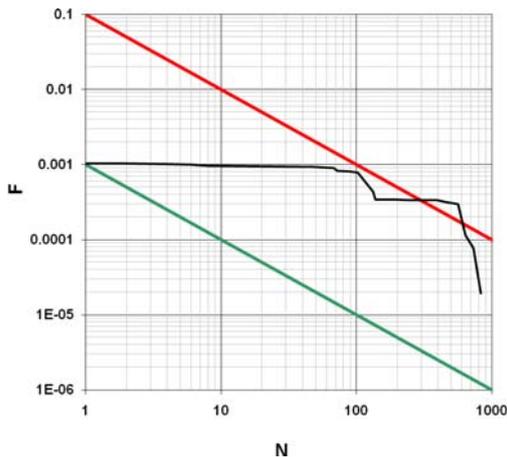


Fig. 10 FN curve of total risk

4.5 Risk Control Options

일반적으로 FTA 및 ETA의 결과를 연계시켜 놓은 것을 위험도 모델(Fig. 11)이라고 부른다.

위험도 통제수단(Risk Control Option, RCO)을 구하는 과정에서는 위험도 모델을 바탕으로 현재의 위험도를 살피고 위험도를 줄일 수 있는 방법들을 도출하게 된다.

RCO는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 사고의 발생을 줄이는 것(Decrease Frequencies), 사고 발생 시 피해를 줄이는 것이다(Mitigate Consequences).

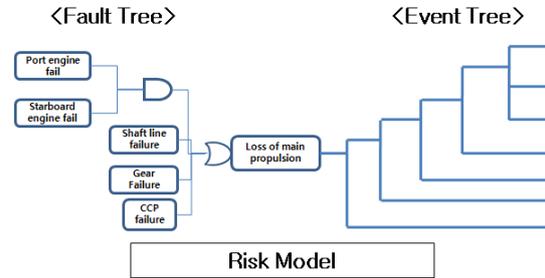


Fig. 11 Risk model

본 연구에서 위험도 모델을 기반으로 제시한 RCO는 Fig. 12과 같다.

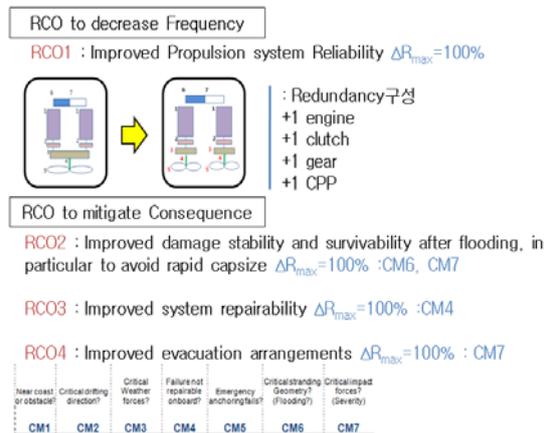


Fig. 12 Risk control options(RCOs)

4.6 Cost Benefit Assessment

이 과정에서는 앞서 도출된 RCO에 대한 경제성을 분석한다. 이 때 CAF(Cost of Averting a Fatality)라는 개념을 통해 경제성을 파악한다. 일반적으로 $GCAF < 3M\$$, $NCAF < 0$ 일 경우 경제성이 있는 RCO라 할 수 있다(SAFEDOR 2005).

$$GCAF = \frac{\text{Cost of RCO}}{\text{Reduction in PLL caused by RCO}}$$

$$NCAF = \frac{\text{Cost of RCO - benefits}}{\text{Reduction in PLL caused by RCO}}$$

본 연구에서 제시한 RCO에 대한 GCAF 값은 Table 3과 같다. 이 결과에 따르면 RCO3을 제외

한 대부분의 RCO 가 $GCAF > 3M$ 에 있는 범위에 있으나, 본 연구에서는 모든 위험도 모델이 아닌 Loss of Propulsion 에 대해서만 효용성을 따졌기 때문에 실질적인 GCAF 는 낮은 값을 가질 수 있다. Table 3 에서 제시된 GCAF 는 각 RCO 의 경제적 효용성을 따지는 순위의 척도로 보는 것이 적절하다. 본 연구에서 제시된 RCO 중 가장 효율적인 RCO 는 RCO3(Improved system repairability)이다. 각 RCO 의 효과는 Fig. 13 에 나타내었다.

Table 3 Cost benefit assessment of RCOs

RCO id	RCO description	ΔCOST	PLL	ΔR	GCAF (\$M)
Basis	0	0	5.68E-03	0	0
1.1	Improved System Reliability	\$1M	5.52E-03	2.85% (3.14E-02)	31.8
2.1	Improved capability to stay afloat (ixA=0.9)	\$3M	2.27E-03	60% (8.36E-02)	35.9
2.2	Improved capability to stay afloat longer (ixA=0.9)	\$6M	2.50E-03	55.91% (7.80E-02)	76.9
3	Improved system repairability (0.5>0.8)	\$200K	2.27E-03	60% (8.36E-02)	2.56
4	Improved evacuation arrangements (Fatality rate 75%)	\$6M	5.56E-03	2.14% (8.95E-03)	670

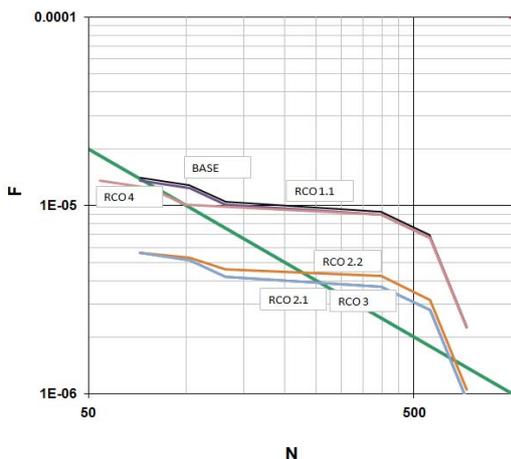


Fig. 13 Risk reduction by RCOs

5. 결론

IMO 의 FSA:RoPax 연구 자료(IMO 2008b)를 살펴보면 현재까지 의장시스템(machinery)의 고장으로 인해 큰 사상자가 나온 경우는 없다. 따라서 IMO 의 FSA 에서는 의장시스템 고장에 따른 위험도 모델은 구성하지 않았다.

하지만 분명히 의장시스템에 의한 위험도는 존재하며 특히, IMO 에서 제시한 SRTp 관련 의장시스템들에 대한 위험도는 정량적인 분석이 크게 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 주요 의장시스템인 추진시스템의 고장 및 오작동으로 인해 생길 수 있는 위험도의 평가방법론을 제시하였다.

이를 바탕으로 다른 주요 의장시스템들에도 적용하여 선박의 의장시스템에 대한 위험도를 분석하는데 이용할 수 있을 것이라 생각된다.

또한 본 연구에서 구성된 의장시스템의 위험도 모델이 의장시스템의 설계 시 비용-성능-안전을 모두 고려한 Risk Based Design 을 하는데 이용될 수 있을 것이라 생각된다.

후 기

본 연구의 일부는 서울대학교 BK21 해양기술인력양성사업단과 한국과학기술연구원 한국과학기술연구원 첨단조선공학 연구센터 지원과제(R11-2002-008-04001-0)의 지원으로 수행된 것을 함께 정리한 것으로, 위 기관의 후원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Buksa, A., Tudor, M. and Martinovic, D., 2005, "Research of The Failure Incidences In the Diesel-Engine Propulsion System," 9th International Conference on Traffic Science, pp. 14-15.
- Hansson, L. and Kiær, E., 1997, Technical Failures, System Criticality Ranking, SAFECO

Work Package II.6, MARINTEK Report No. MT23 F96-0360/233509.00.01.

- IMO, 2008a, Consideration of the GBS Generic Structure(MSC 84/5/4).
- IMO, 2008b, FSA-RoPax Ships(MSC 85/17/2).
- IMO, 2008c, Guidelines for Formal Safety Assessment for use in the IMO Rule-making Process(MSC Circ 1023).
- IMO, 2006a, Guidelines on Alternative Design and Arrangements for SOLAS Chapter II-1 and III(MSC Circ 1212).
- IMO, 2006b, SOLAS Regulations II-2/21.4
- IMO, 2006c, SOLAS Regulations II-2/21.5.1.2
- Lee, J.O., Yeo, I.C. and Yang, Y.S., 2001, "A Trial Application of FSA Methodology to the Hatchway Watertight Integrity of Bulk Carriers," Marine Structures, Vol. 14, pp. 651-667.
- SAFEDOR, 2005, "Risk Evaluation Criteria", SAFEDOR Deliverable D4.5.2.

- Svein Kristiansen, 2005, MARITIME TRANSPORTATION, ELSEVIER, Burlington, M.A..
- www.safedor.org.



< 문 경 태 >



< 양 영 순 >



< 윤 여 표 >



< 유 원 선 >