



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

DP선박의 안전한 운용을 위한 FSA의 적용
An Application of FSA for Safe Operation of
Dynamic Positioning Vessels

지도교수 정 연 철



한국해양대학교 대학원

항해시스템공학과

채 종 주

본 논문을 채종주의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 예 병 덕 (인)

위 원 공학박사 문 성 배 (인)

위 원 공학박사 박 준 범 (인)

위 원 공학박사 김 홍 태 (인)

위 원 공학박사 정 연 철 (인)

2016년 6월

한국해양대학교 대학원

Table of Contents

List of Tables	iii
List of Figures	vi
Abstract	viii
제1장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적 및 개요	5
1.3 연구의 구성	6
제2장 이론적 배경	8
2.1 FSA 소개	8
2.2 FSA 도구	9
2.2.1 위험식별 도구	9
2.2.2 위험분석 도구	11
2.3 연구에 사용된 FSA 도구	25
제3장 DP선박의 위치손실사고 분석	28
3.1 서론	28
3.2 DP선박	29
3.2.1 DP 시스템의 구성요소	30
3.2.2 DP선박의 등급	33
3.3 DP선박의 LOP사고 분석	35
3.3.1 일반 분석	35
3.3.2 원인별 상세 분석	39
3.4 소결론	46

제4장 PRS 오류에 대한 FSA의 적용	48
4.1 서론	48
4.2 FSA의 준비	48
4.2.1 FSA의 전제조건	48
4.2.2 사용된 FSA 도구	49
4.3 FSA의 수행	51
4.3.1 위험식별	51
4.3.2 위험분석	56
4.3.3 위험제어방안	69
4.3.4 비용편익평가	77
4.3.5 권고	81
4.4 소결론	82
제5장 인적오류에 대한 FSA의 적용	83
5.1 서론	83
5.2 FSA의 준비	84
5.2.1 FSA의 전제조건	84
5.2.2 사용된 FSA 도구	84
5.3 FSA의 수행	85
5.3.1 위험식별	85
5.3.2 위험분석	92
5.3.3 위험제어방안	101
5.3.4 비용편익평가	109
5.3.5 권고	111
5.4 소결론	112
제6장 결 론	114
Acknowledgement	117
References	119

List of Tables

Table 1 Meaning of Node Probability Table	17
Table 2 Classification guide for unsafe acts	20
Table 3 Classification guide for preconditions for unsafe acts	22
Table 4 Classification guide for unsafe supervision	23
Table 5 Classification guide for organizational influences	24
Table 6 Applicability of tools used for risk assessment	26
Table 7 IMO DP equipment class	33
Table 8 DP class of IMO, DNV, LR and ABS	34
Table 9 Categorization of DP LOP incident causes	36
Table 10 Causes and frequency of DP LOP incidents(2001~2010)	37
Table 11 10 Years average of DP LOP incident causes(%)	38
Table 12 5 Categorization of average DP LOP incidents	42
Table 13 Number of failures of each PRS(2001~2010)	43
Table 14 Adjusted frequency of PRS failure(2001~2010)	45
Table 15 4 Categorization of DP LOP incidents	49
Table 16 Severity Index of LOP incidents	52
Table 17 Frequency Index of PRS error DP LOP incidents	52
Table 18 Risk Index of DP LOP incidents	53
Table 19 Frequency of DP LOP incidents scenario caused by PRS	54
Table 20 Frequency of each PRS	55
Table 21 Risk Index of each PRS for DP LOP incidents	55
Table 22 Cumulative frequency of drive off	57
Table 23 Cumulative frequency of operation abort	57
Table 24 Cumulative frequency of time loss	57
Table 25 Drive off, Operation abort & Time loss Risks caused by PRS	60
Table 26 Summary of PRS error causes	68
Table 27 Summary of risks caused by PRS	69
Table 28 Risk Control Options	71

Table 29 Categorization of risk control measures	72
Table 30 Priority of RCOs	72
Table 31 Frequency of drive off caused by PRS during simulation	75
Table 32 Frequency of operation abort caused by PRS during simulation	75
Table 33 Frequency of time loss caused by PRS through simulation	76
Table 34 PRS installation & maintenance costs(Unit US\$)	79
Table 35 Cost-benefit assessment for RCO A1	80
Table 36 Cost-benefit assessment for RCO B1	80
Table 37 Cost-benefit assessment for RCO C1	81
Table 38 HFACS categorization of human errors for DP LOP incidents	85
Table 39 Human error DP LOP incidents caused by organizational influences	86
Table 40 Human error DP LOP incidents caused by unsafe supervision	87
Table 41 Human error DP LOP incidents caused by precondition for unsafe acts	88
Table 42 Human error DP LOP incidents caused by unsafe acts	89
Table 43 Severity Index of human error DP LOP incidents	90
Table 44 Frequency Index of human error DP LOP incidents	90
Table 45 Risk Index of human error DP LOP incidents	90
Table 46 Risk Index of DP LOP incidents caused Unsafe acts	91
Table 47 Frequency of unsafe acts	92
Table 48 Risk Index of DP LOP incidents caused by human errors	92
Table 49 Cumulative frequency of Drive off by Unsafe acts	93
Table 50 Cumulative frequency of Operation abort by Unsafe acts	93
Table 51 Cumulative frequency of Time loss by Unsafe acts	93
Table 52 Risks Caused by human errors	95
Table 53 Summary of risks caused by human errors	100
Table 54 RCOs for Human errors	103
Table 55 Priority of RCOs for Human errors	104
Table 56 Triangle of effectiveness categorization	104
Table 57 Risk reduction rates through RCOs	106

Table 58 Cost-benefit assessment for RCO A1 110

Table 59 Cost-benefit assessment for RCO D1 111



List of Figures

Fig. 1 Process to improve safe operation of DP vessel	6
Fig. 2 Flow chart of the FSA methodology	8
Fig. 3 Example of an event tree analysis	11
Fig. 4 Prior probability distribution	15
Fig. 5 Posterior probability distribution after observing evidence	16
Fig. 6 NPT from GeNIe (DGPS failure causes)	17
Fig. 7 Reason's Swiss cheese model theory	18
Fig. 8 HFACS model	18
Fig. 9 Unsafe acts classification	19
Fig. 10 6 Freedoms of vessel movement	29
Fig. 11 Elements of DP systems	30
Fig. 12 Local position reference system (Fanbeam)	32
Fig. 13 10 Years average of DP LOP incident causes	38
Fig. 14 5 Years average of DP LOP incident causes	39
Fig. 15 5 Years average of DP LOP incident causes	40
Fig. 16 3 Years average of DP LOP incident causes	41
Fig. 17 2010 average of DP LOP incidents causes	41
Fig. 18 LOP incidents ratio depend on PRS types(2001~2010)[8]	44
Fig. 19 Human error & non-human error incidents among 612 LOP incidents	46
Fig. 20 F-N Curve of Drive off, Operation abort and Time loss	58
Fig. 21 ALARP Concept	59
Fig. 22 Interrelation flowchart of PRSs LOP incidents	61
Fig. 23 Prior Probability of PRS errors and LOP incidents	62
Fig. 24 Sensitivity of Drive off, Operation abort and Time loss	62
Fig. 25 Sensitivity of DGPS	63
Fig. 26 Strength of influence to LOP incidents by PRS	63
Fig. 27 Drive off conditional probability	64
Fig. 28 Drive off conditional probabilities & error probability	64

Fig. 29 Operation abort conditional probability	65
Fig. 30 Operation abort conditional probabilities & error probability	65
Fig. 31 Time loss conditional probability	66
Fig. 32 Time loss conditional probabilities & error probability	66
Fig. 33 Marginal probability distribution of DGPS & Artemis	67
Fig. 34 Marginal probability distribution of HPR & Taut-wire	67
Fig. 35 Marginal probability distribution of laser reference & DARPS	68
Fig. 36 Simulation model DP Vessel Ship's Particulars	73
Fig. 37 Visual DP vessel approach simulation concepts	74
Fig. 38 F-N curve after RCOs applied	77
Fig. 39 Human errors F-N curve	94
Fig. 40 Prior Probability of human error on DP LOP incidents	95
Fig. 41 Human errors sensitivity for drift off, drive off, operation abort & time loss	96
Fig. 42 Sensitivity of unsafe acts & precondition for unsafe acts	97
Fig. 43 Sensitivity unsafe supervision & organizational influence	97
Fig. 44 Conditional probabilities of Drift off & drive off by Human error	98
Fig. 45 Probability ranks of Drive off & drift off by human errors	99
Fig. 46 Probability ranks of operation abort & time loss by human errors	99
Fig. 47 Triangle of effectiveness to reduce human error	101
Fig. 48 F-N curve after apply RCOs for Human errors	106
 Appendix 1 Brainstorming Group	 125
Appendix 2 DP LOP incidents reports sample(PRS, Human error)	126
Appendix 3 RCOs	128
Appendix 4 Degree of agreement between experts concordance matrix	130
Appendix 5 Bayesian networks data sheets	132
Appendix 6 FMEA reports	134

An Application of FSA for Safe Operation of Dynamic Positioning Vessels

CHAE, Chong Ju

Department of Ship Operation Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

DP vessel operation has a lot of risks in nature. However, the number of it has been on the steady rise as the demand for marine resource development and special work increases in offshore industry. In this regard, many studies have been conducted to ensure a safe operation of the DP vessel. Regardless of this, Formal Safety Assessment(FSA) on the DP vessel has not been applied.

FSA is a structured and systematic methodology, aimed at enhancing maritime safety, including protection of life, health, marine environment and property, by using risk analysis and cost-benefit assessment. The assessment has been applied to major merchant vessels such as cruise ship, oil tanker, bulk carrier, container ship and liquefied gas tanker, thereby recommending various new regulations for maritime safety and protection of the marine environment or making a comparison between existing and possibly improved regulations, with a view to achieving a balance between the various technical and operational issues. Furthermore, the need to apply FSA to human elements also rises as many studies on vessel-related accidents arising from human elements have been in progress.

This thesis is designed to identify major causes of LOP incidents directly linked to the safe operation of DP vessel and FSA on the vessel has been used in an

effort to consider the countermeasures.

For this, 612 reports on LOP incidents released for the last decade (from 2001 to 2010) and reported to IMCA were analyzed to identify major causes of the incidents. The result shows that 22.1% of LOP incident occurring to DP vessel resulted from PRS error, which is the most frequent cause of it.

LOP incidents caused by human error reveals to be 11.8%, which is relatively low rate. However, the detailed analysis discovered that human error caused a total of 375 LOP incidents(61.2%) both in an indirect and a direct way. Based on this analysis, FSA on PRS and human error was applied in this study.

In applying FSA to PRS error, a frequency analysis and Bayesian Network contributed to identifying major risks. The installation of PRS as redundancy to all DP vessels and type specific training on the installed system in the vessel were recommended as RCOs in order to control identified risks. Furthermore, cost-benefit assessments of the suggested RCOs was assured. It was found that the use of a simulator is very effective as a way to verify the effect of applying RCOs.

In using FSA on human error, a frequency analysis, HFACS and Bayesian Network found out that conditional probability of drift off & drive off(74.3%), operation abort(51.9%) and time loss(64.0%) caused by skill-based human error. Unsafe supervision also made a big impact on the occurrence of the LOP incident. To control such identified risks, the following measures were suggested: make DPO training mandatory according to STCW convention, implement various onboard training by installing a DP simulator on the vessel, establish a process to ensure the understanding on a safety operation procedure of DP vessel and its update. Furthermore, cost-benefit assessments of the suggested RCOs was assured.

Bayesian Network and HFACS used to apply FSA to identify PRS and human error revealed to be a useful tool to recognize and analyze the related risks. Particularly, the graphical expression of Bayesian Network via GeNIe easily recognized prior probability and conditional probability of LOP incidents of DP

vessel. Also, The classification of human error by using HFACS and the application of Bayesian Network is found to serve as a useful quantification tool of human error.



제1장 서론

1.1 연구의 배경

2010년 4월 멕시코만에서 발생한 Deepwater Horizon호의 폭발사고로 11명의 작업자가 사망 또는 실종되었으며, 16명의 작업자가 부상을 입고, 약 2,150,000 배럴의 기름오염사고를 발생시키고 침몰하였다. USCG(United States Coast Guard)의 사고조사결과에 따르면 사고의 원인은 선원의 훈련부족, 발화원 관리 실패, 비상대응실패, ISM Code 위반, 지휘체계 이해부족, 시스템 오작동, DGPS(Differential Global Positioning System) 안테나 손상에 의한 위치손실(Loss of Position, LOP) 등으로 확인되었다[65].

Deepwater Horizon호는 동적위치제어시스템(Dynamic Positioning System, 이하 DPS라 함)을 설치하여 시추작업을 하던 선박으로 IMO(International Maritime Organization) MSC/Circ. 645에 따르면 동적위치제어선박(Dynamic Positioning Vessels, 이하 DP선박이라 한다)은 Thruster의 힘을 이용하여 본선의 위치를 자동적으로 유지하는 구조물 또는 선박으로 정의하고 있다[28]. 이러한 DP선박의 종류에는 오프쇼어 지원선박(Offshore Supply Vessels, OSV), 이동식 오프쇼어 시추설비(Mobile Offshore Drilling Units, MODU), 해상건설선박(Subsea & Offshore Construction Vessels)등이 있으며, 전 세계적으로 약 7,000척이 존재하고 있고 2025년까지 연평균 3.7%의 성장률을 예상하고 있다[53][60].

Deepwater Horizon호의 사례와 같이 DP선박은 작업의 특성상 많은 위험을 내포하고 있고, 해양에서의 자원개발 및 특수 작업의 수요가 증가함에 따라 그 숫자도 증가하는 추세에 있다. 이에 따라 DP선박의 안전한 운용을 위한 연구도 다양하게 이루어지고 있다.

Hauff(2014)는 DP선박 LOP사고의 90%이상이 추진장치 오류, 위치참조시스템(Position Reference System, PRS) 오류 및 인적오류에 의해 발생하고 있음을 확인하고, 이러한 원인들의 오류확률을 확인하기 위해 베이지안 네트워크 모델을

적용하여 분석하였다[56]. Sorensen et al.(2014)은 DP선박의 운용에서 위험사고와 의사결정의 특징을 분석하여 DPO(Dynamic Positioning Operator)의 경험과 인식이 운용자의 의사결정 전략에 큰 영향 미치고, 대응 시간이 부족한 위험상황을 위해서는 고차원적인 의사결정 전략이 필요함을 제시하였다[64]. 한편 Runar(2015)은 논문에서 24건의 DP선박 사고에서 17건이 DPO의 부적절한 의사결정으로 사고가 확대되었음을 확인하고, 인적오류에 대한 정량적 위험분석기술 모델을 제시하였다[61]. 이를 통해 북극에서는 LOP사고 발생시 비상긴급분리(Emergency Quick Disconnection)를 위해 DPO가 더 신속히 대응해야 할 필요가 있음을 확인하였고, DPO에게는 북극의 작업환경에 대한 특별 교육이 필요함을 언급하였다[61].

DP선박과 같은 특수선과는 달리 상선의 안전운용을 위한 연구는 IMO를 중심으로 공식안전성평가(Format Safety Assessment, FSA) 도구를 사용하여 수행되고 있다. FSA는 IMO에서 개발한 위험도 기반의 안전성 평가방법론으로 인명, 해양환경 및 재산보호를 위해 해상에서의 선박의 위험도를 평가하고 수용 불가능한 위험을 제어하기 위한 방법을 비용편익평가를 통해 권고하는 시스템적인 안전성 평가 방법을 말한다[51]. 지금까지 IMO에서 수행한 FSA는 여객선, 탱커선, 벌크선, 컨테이너선 및 액화가스선과 같은 주요 상선을 중심으로 시행되어 왔으며, 이를 통해 주로 선박의 구조 및 장비와 같은 하드웨어적인 부분에 대한 IMO 국제협약의 개정을 제안해 왔다[41]~[45],[47]~[49]. 그리고 이러한 제안들은 상당부분 국제협약에 수용되어 왔다. 이는 FSA가 선박의 안전운용을 위한 조치사항을 결정하는데 있어 유용한 도구로 사용되어 왔음을 의미한다. 더불어 근래에는 해양사고의 80~90% 이상이 인적요인에 기인한다는 연구결과에 따라 인적오류에 대한 연구의 확대가 요구되어 인적요인에 대한 FSA 지침도 소개되었다[51][62].

FSA는 IMO에서 주로 2007~2008년에 선종별로 수행되었다. 2007년 덴마크는 LNG에 대한 FSA를 수행하여 ECDIS의 설치, AIS의 레이더 통합시스템 및 항로제어시스템(Track Control System)의 사용, 선교 설계 향상 및 항해 장비의 위험도 기반 유지/보수 절차의 수립과 같은 위험제어방안(Risk Control Options, RCOs)을 권고하였다[45]. 컨테이너선 FSA에서는 AIS의 레이더 통합시스템, 항

로제어시스템 강제화 및 컨테이너 화물창 High bilge level 알람 장치의 설치 등을 권고하였다[44]. 2008년 수행된 여객선 FSA에서는 건현의 증가, 여객선의 GM 증가, 선교자원관리(Bridge Resource Management, BRM) 지침마련, ECDIS 설치 및 항해사를 위한 시뮬레이터 교육을 권고하였다[49]. 유조선에 대한 FSA에서는 열작업 절차에 대한 훈련, Active Steering Gear Redundancy 적용, ECDIS 설치, Navigational Sonar 적용, 이중보호 저압연료파이프(Double sheathed Low Pressure Fuel pipes) 설치 및 기관실 비상탈출구의 추가 설치를 권고하였다[48].

국내에서는 2011년 국적 일반화물선에 대한 FSA를 수행하여 선교에 추가 항해당직자의 배치, VTS와 연동한 선박항행 위험경보시스템 구축, AIS와 RADAR 통합시스템의 구축을 권고하였다[1][2].

한편 인적오류에 대한 연구는 James Reason(1990)의 Human error를 바탕으로 Shappell et al.(2000)이 항공분야에서 HFACS(Human Factors Analysis and Classification System) 모델을 개발하여 민간 및 공군 분야에 적용하였다[62]. 해사분야의 인적오류 연구는 Rothblum et al.(2002)이 스위스 치즈 이론을 바탕으로 해사분야 HFACS를 구체화하고, 인적요인을 고려한 효과적인 사고평가 프로그램을 제안하였다[7]. 또한 Griggs(2012)는 HFACS를 사용하여 미국 NTSB(National Transportation Safety Board) 해양사고 보고서, 캐나다 TSB(Transportation Safety Board) 해양사고 보고서, 영국 MAIB(Marine Accident Investigation Branch) 해양사고 보고서 데이터를 활용하여 인적오류를 분석하였고, 그 결과 HFACS가 해양사고에서 인적오류를 분석하는데 유용한 도구임을 입증하였다[19]. 더불어 Hauff(2014)는 HFACS를 DP선박의 인적오류에 적용하여 DP선박 LOP사고에서 인적오류가 미치는 영향을 분석하였고, 이를 통해 HFACS의 DP선박에 적용 가능성을 확인하였다[56].

국내에서는 김홍태(2011) 등이 항공분야 HFACS를 보완한 해사분야 HFACS 모델을 구성하고, 이를 해양사고 인적오류 분석에 적용하였다[23].

선행 연구에서 알 수 있듯이 FSA는 주로 상선을 대상으로 수행되었고 DP선박에는 적용된 적이 없다. 또한 DP 선박의 인적요인에 대한 FSA도 수행된 적이 없다. 따라서 본 논문에서는 IMO에서 유용하게 사용되고 있는 FSA를 DP선

박에 적용하고자 한다. 이를 통해 DP선박의 운용과 관련한 위험요소를 식별하고 이를 적절히 감소시켜 안전운용을 위한 권고를 제안하고자 한다.

지금까지 수행된 FSA에서는 위험분석을 위한 도구로 사건나무분석(Event Tree Analysis, ETA)을 사용해 왔다. ETA는 위험사건 이후의 결과를 명확히 표현하고, 단일의 고장과 시스템의 취약점을 식별할 수 있다는 장점이 있으나 사건나무 그림의 표현 기준이 명확하지 않고, 정량적 분석에는 적합하지 않은 경우가 있을 수 있다[58]. 그리고 ETA는 전적으로 사고보고서에 의지하기 때문에 분석하는 자료 자체가 가지는 한계를 내포하고 있다.

반면 위험분석(Risk Analysis) 및 조건부 가능성(Conditional Probability)을 확인하는데 사용되고 있는 베이지안 네트워크(Bayesian Network)는 위험사건 이후의 결과와 그러한 위험의 평가에 강점을 가지고 있는 도구이고, 사고에 대한 사전 가능성(Prior Probability)을 바탕으로 조건부 가능성을 확인할 수 있어 주된 사고의 원인을 쉽게 파악할 수 있는 도구이다. 또한 정통적인 빈도 학습보다는 데이터의 의존도가 낮고, 시스템적 원인과 인적요인을 적용하여 위험에 영향을 미치는 상호간의 관계를 쉽게 정량적으로 표현할 수 있고 유연하기 때문에 위험분석에 사용되고 있다[57][58]. 베이지안 네트워크는 이러한 장점과 더불어 신뢰성이 좋고 불확실성 수준이 낮아 여러 분야에서 폭넓게 사용되고 있다[25].

이러한 베이지안 네트워크는 노르웨이(2005)가 대형 여객선의 항해안전에 대한 FSA를 수행하면서 위험분석 도구로 사용하였고, 그 결과로 ECDIS의 설치, Track Control System, AIS와 레이더 통합시스템 구축, 선교설계 향상, 항해훈련의 향상 및 2인 선교 항해사 배치 등의 RCOs를 권고하였다[41]. 또한 일본은 2006년 IMO에 제출한 문서에서 베이지안 네트워크가 사건의 발생가능성과 인명사고 비율을 추측하는데 유용한 도구이고, 여러 RCOs의 적용을 통한 위험의 감소량을 예측하는데 유용한 도구임을 확인하였다[42]. 최근에는 Hauff(2014)가 DP선박 LOP사고에 베이지안 네트워크를 적용하여 사고빈도 데이터와 함께 사고원인에 대한 정량적/정성적 분석을 수행하여 그 효용성을 확인하였다[56].

본 논문에서는 선행 연구를 참조하여 DP선박 LOP사고에 대한 FSA를 수행하는데 있어 ETA의 단점을 보완하여 베이지안 네트워크를 적용한다. 또한

HFACS를 이용하여 DP선박의 인적오류에 대한 FSA를 수행하여 인적요인을 고려한 DP선박의 안전운용방안도 함께 제안하고자 한다.

1.2 연구의 목적 및 개요

본 논문의 목적은 과거 DP선박 LOP사고 보고서를 활용하여 FSA를 수행하고 다음을 확인 및 제안하는 것이다.

가) DP선박 LOP사고의 주된 원인 식별

나) 식별된 주된 원인에 대한 FSA 수행

다) DP선박에 대한 FSA에서 베이지안 네트워크 및 HFACS의 적용과 효용성 확인

라) DP선박의 안전운용을 위한 RCOs 제안

마) RCOs의 적용효과를 검증하기 위한 DP 시뮬레이터의 활용성 확인

DP선박의 안전운용을 위한 FSA의 적용에 대한 개요는 Fig. 1과 같다[12].

Fig. 1은 DP선박 LOP사고 보고서 분석을 바탕으로 FSA를 수행하여 주된 위험을 식별하고 이를 제어하기 위한 RCOs를 제시하여 사고발생요인을 예방하거나 감소시키는 절차를 보여주고 있다. 각 단계를 간단히 설명하면 다음과 같다.

가) DP선박 LOP사고 보고서 분석

나) 분석을 통한 DP선박 LOP사고의 주된 원인 식별

다) 식별된 DP선박 LOP사고의 원인에 대한 FSA 수행항목 식별

라) FSA 수행 및 RCOs 제안

- DP선박 하드웨어 FSA 수행 및 RCOs 제안

- DP선박 인적오류 FSA 수행 RCOs 제안

- 베이지안 네트워크 및 HFACS 적용을 통한 하드웨어와 인적오류에 대한 위험분석 및 비용편익평가

마) 제안된 RCOs의 적용 및 이를 통한 DP선박 사고의 예방 및 영향 감소

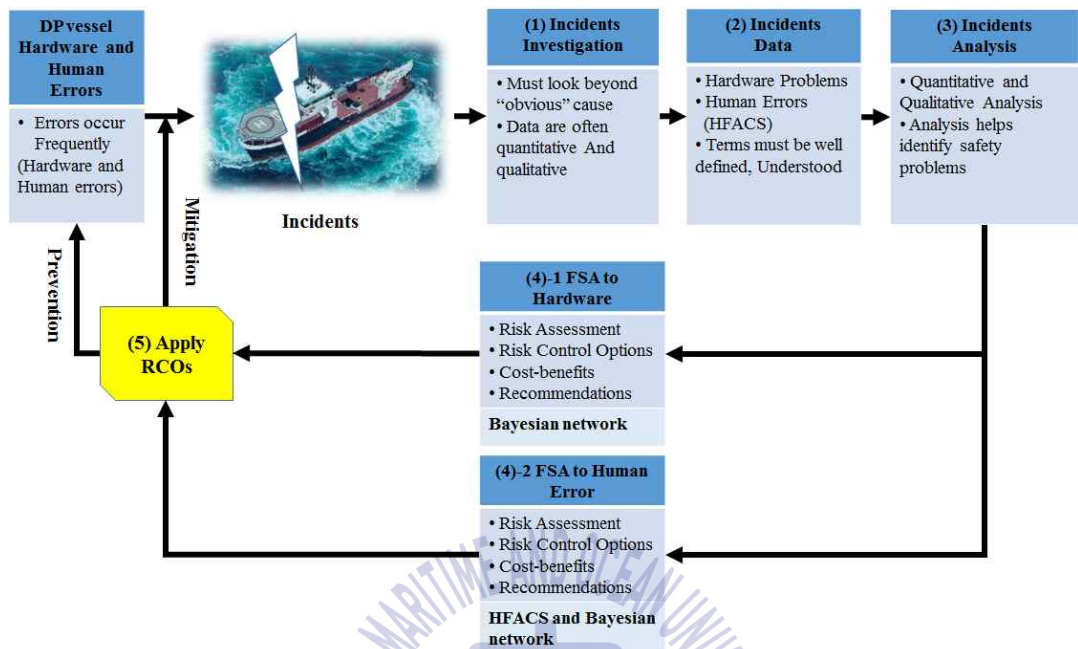


Fig. 1 Process to improve safe operation of DP vessel

1.3 연구의 구성

본 논문은 다음과 같이 6장으로 구성된다.

1장에서는 본 연구의 배경, 목적, 개요 및 연구의 구성을 설명하였다.

2장에서는 FSA를 구체적으로 설명하고, FSA에 사용되는 도구들을 설명하였으며, 논문에서 FSA의 도구로 사용할 베이지안 네트워크 및 HFACS의 선택 이유와 도구의 특징을 설명하였다.

3장에서는 DP선박 LOP사고의 이해를 돕기 위해 DP선박의 특징 및 등급에 대해서 설명하였고, 10년(2001~2010) 동안 IMCA(International Maritime Contractors Association)에 보고된 DP선박 LOP사고 보고서에 대한 정량적 분석을 수행하여 LOP사고의 주된 원인들을 확인하였다.

4장에서는 3장의 DP선박 LOP사고 분석결과에 따라 PRS 오류에 대한 FSA를 베이지안 네트워크를 사용하여 수행하였다. 이를 통해 특정 사고의 조건부 발

생 가능성 및 PRS 오류에 대한 민감도를 확인하여 위험도를 확인하였다. 더불어 확인된 PRS 오류에 대한 위험도를 감소시키기 위한 RCOs를 제시하였다. 제시된 RCO의 위험감소 효과를 확인하기 위해 시뮬레이션의 적용, 브레인스토밍을 수행하였으며, 비용편익평가를 통해 PRS 오류에 의한 DP선박 LOP사고 감소 조치를 제안하였다.

5장에서는 3장의 DP선박 LOP사고 분석에서 식별된 인적오류 대한 FSA를 수행하였다. 이를 위해 HFACS를 사용하여 인적오류를 분류하고, 이를 베이지안 네트워크에 적용하였다. 이를 통해 인적오류에 의한 LOP사고의 위험도를 확인하였으며, 이러한 인적오류에 의한 LOP사고의 감소를 위한 RCOs를 제시하였다. 제시된 RCO의 위험감소 효과를 브레인스토밍을 통해 확인하였으며, 더불어 비용편익평가를 통해 DP선박의 인적오류에 의한 LOP사고 감소 조치를 제안하였다.

6장에서는 하드웨어와 인적오류를 고려한 FSA 수행결과를 바탕으로 DP선박의 안전운용을 위한 권고를 정리하였다. 더불어 본 논문의 한계와 앞으로의 연구 방향도 제시하였다.



제2장 이론적 배경

2.1 FSA 소개

FSA는 1993년 IMO MSC 제62차 회의에서 영국이 제안한 것을 시작으로 1996년 FSA관련 작업반을 구성하고, 2001년 MSC 74차 회의에서 “Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC/Circ.1023-MEPC/Circ.392)” 지침을 승인하였다[51]. 이후 MSC 91(12)차 회의 및 MEPC 65차 회의(2013)에서 앞서 승인된 지침을 사용하면서 개정이 필요한 사항들을 검토하여 “Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process”(2013)를 승인하여 사용해 왔으며 가장 최근에 개정된 FSA 지침은 MSC 94차 회의(2014) 및 MEPC 68차 회의(2015)에서 개정 및 승인된 MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.1이다[51][52].

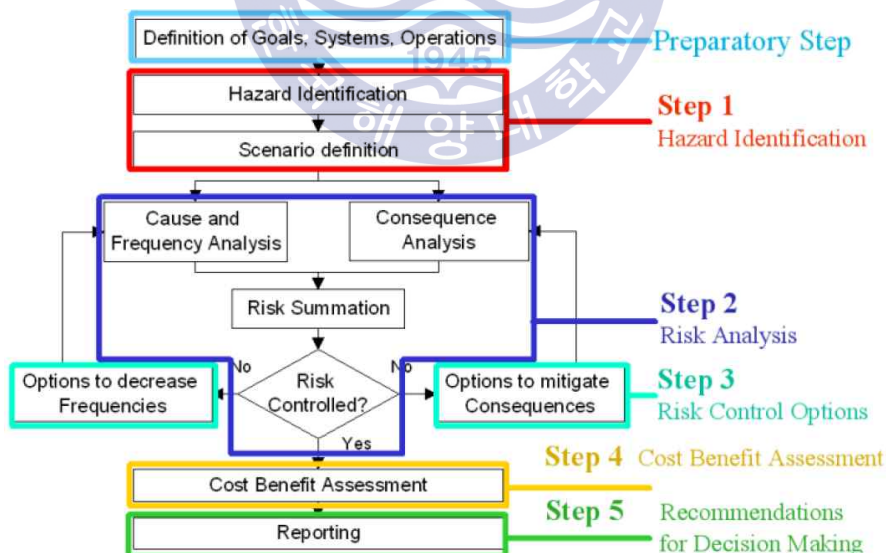


Fig. 2 Flow chart of the FSA methodology[43][51]

FSA는 5단계로 시행하며, 위험식별(Step 1, Hazard Identification), 위험분석(Step 2, Risk Assessment), 위험제어방안(Step 3, Risk Control Options), 비용편익평가(Step 4, Cost-Benefit Assessment) 및 의사결정을 위한 권고(Step 5, Recommendation for decision making)로 구성되어 있다. Fig. 2는 FSA의 절차를 보여주고 있으며, 각 단계들 중에서 위험식별 및 위험분석 단계의 수행을 위해서는 여러 도구들이 사용될 수 있다.

2.2 FSA 도구

2.2.1 위험식별 도구

위험의 식별 및 분석을 위해 사용되는 도구는 연구의 목적, 분석하고자 하는 위험의 형태와 범위, 전문가의 수준, 정보와 데이터에 따라 달라진다[25]. 위험식별에 사용되는 대표적인 도구로는 HAZID(Hazard Identification Study), HAZOP(Hazard and Operability Studies), FMEA(Fail Mode Effect Analysis) 및 브레인스토밍 등이 있다.

HAZID는 시스템의 설계단계에서 잠재적인 위험 및 사고들을 식별하기 위해서 사용되며 기본적으로 에너지 또는 위험 물질들이 관리되지 않은 상태로 유출되는 것을 확인 및 검토하는데 사용된다[25]. 이러한 HAZID는 사용하기 간단하고, 프로젝트의 사전단계에서 사용가능하기 때문에 사전에 설계를 변경할 수 있는 시간적 여유를 가질 수 있다는 장점이 있다. 반면 폭넓게 다양한 결과를 나타내는 사항, 결합 위험평가 및 안전장치의 효과를 나타내는 것이 쉽지 않다는 한계가 있다[25].

HAZOP은 시스템의 원래 의도된 기능과의 편차를 식별하여 이것의 원인과 편차로 인한 위험 및 운용적인 문제점을 식별하는 도구이다[25]. 이를 통해 위험과 운용상의 문제점을 통제하기 위해 필요한 조치를 결정하고 문제를 해결하기 위한 방법도 식별한다. HAZOP은 팀의 일원으로 경험 있는 운용자를 활용할 수 있고, 기술적인 고장과 인적오류 양쪽에 효과적이며, 현재의 안전장치를 인지하고 이를 바탕으로 추가적인 것에 대한 권고를 개발할 수 있다는 장점이 있

다. 반면 팀의 지식과 주관자의 능력에 크게 의지하고, 절차적인 위험에 최적화되어 있어 다른 위험에 적용하기 위해서는 수정하여 적용해야 한다는 단점이 있다[58].

FMEA는 시스템에서 잠재적인 고장모드를 식별하고 그것의 원인 및 영향을 분석하는 시스템적인 절차이며 설계 및 절차의 문제로 인해 발생할 수 있는 잠재적인 고장이 발생하기 전에 이를 검증하여 필요시 제안된 설계 또는 운용절차의 변경으로 위험을 최소화하는 도구이다[25]. FMEA를 통해서는 고장의 상태를 정의하고, 시스템 고장의 원인, 고장의 영향, 고장의 확인, 고장에 대한 감소조치, 고장의 심각성 분류, 고장 발생빈도 또는 가능성을 분석할 수 있다[24]. 이를 위해 FMEA는 분석과정에서 Risk/Criticality Matrix를 통해 Risk의 수용가능 여부를 확인하고 심각도(Severity) 및 발생 빈도를 검증하여 표시한다. 이 도구는 이해하기 쉽고, 종합적으로 하드웨어를 검토할 수 있으며, 분석의 목적에 따라 상세분석의 수준을 결정하는데 유연하여 전기 또는 기계적 장치의 모든 고장을 식별하는데 적합한 시스템적이고 종합적인 도구이다[36].

브레인스토밍은 앞서 언급한 HAZID, HAZOP 및 FMEA에 접목하여 공통적으로 사용되는 도구로 위험을 식별 및 분석하는 과정에서 다양한 의견 및 평가를 수집하기 위한 도구로 사용된다. 기본적으로 브레인스토밍은 지원적 도구이기 때문에 보통 다른 위험식별 및 분석도구에 접목하여 사용된다[25]. 브레인스토밍은 접근하기 쉽고 복잡하지 않기 때문에 과거에 수행되었던 FSA에서도 많이 활용되었다[43].

이러한 브레인스토밍에 참여하는 전문가는 가능한 다양한 분야의 전문가로 구성하여 수행하는 것이 중요하다. 예를 들어 IMO MSC 85/17/1 여객선 FSA에서는 DNV의 항해전문가 1명, 화재 전문가 2명, 유체역학 전문가 1명 및 여객선사의 담당자 3명 총 7명이 참여하여 FSA를 수행하였다[49]. MEPC 58/17/2 탱커선 FSA의 경우 조선공학, 기계공학, 안전공학, 품질관리자 및 선장을 포함하여 총 11명의 전문가들이 참여하여 브레인스토밍을 수행하였다[48]. 이러한 전문가들은 기본적으로 FSA를 이해하고 위험분석 경험, 해사분야 경험 및 FSA 수행과 관련된 지식을 보유하고 있어야함을 권고하고 있다[52].

2.2.2 위험분석 도구

일반적으로 위험분석을 위해서는 빈도분석을 많이 사용한다. 이를 통해 정의된 위험사건의 원인을 확인하여 위험사건과 원인 사이에 어떠한 관계가 있는지를 확인한다[58]. 이를 바탕으로 각 원인이 위험사건의 빈도와 얼마나 중요한 연관성을 가지고 있는지 확인하여 현재 조치의 효과를 식별하는 것이 주된 목적이다. 이러한 사고원인 및 빈도분석 도구로는 ETA, 고장나무분석(Fault Tree Analysis, FTA) 및 베이저안 네트워크 등이 있다[58].

1) ETA

ETA는 사고 시나리오를 모델링하고 분석하는 개연론에 의거한 사고분석 도구이다[58]. IMO에서 수행된 FSA는 대부분 ETA를 사용하여 위험을 식별 및 분석하였다. 그러나 ETA의 결과가 정확하기 위해서는 모든 사건이 분석되어야 하며 이를 위해서는 HAZOP과 같은 방법을 사용한 분석이 이루어져야 하고, 그렇다고 하더라도 동 방법에는 항상 잠재적으로 중요한 사건의 누락이 발생할 수 있다는 단점이 있다[35]. 또한 ETA는 전적으로 사고보고서에 의지하기 때문에 분석하는 자료 자체가 가지고 있는 한계를 내포한다는 단점이 있다. Fig. 3은 ETA의 예시이다.

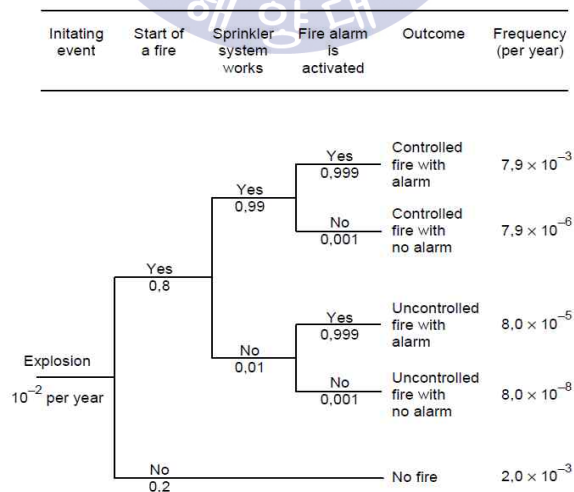


Fig. 3 Example of an event tree analysis[58]

2) FTA

FTA는 Top-down 논리 다이어그램으로 시스템의 잠재적 중요 사건과 그것의 원인에 대한 상관관계를 표현하는 방법으로, 주된 목적은 시스템에서 심각한 사건을 야기할 수 있는 사건들의 조합을 식별하고 정해놓은 특정시간에 그러한 심각한 사건이 발생할 수 있는 가능성을 찾아내어 그 가능성을 줄이기 위해 필요한 시스템적인 개선사항을 식별하는 것이다[58].

FTA는 복잡한 시스템에 적용 가능하고, 심각한 사건에도 적합하며, 기술적인 고장과 인적오류 양쪽에 적용 가능하다는 장점이 있다. 반면 사건 시퀀스의 민감도를 다루기에는 한계가 있고, 시스템 규모가 커지면 복잡해지고 시간이 많이 소요되며 적용하기 어려워진다는 한계가 있다[58].

3) 베이지안 네트워크

베이지안 네트워크는 베이즈 이론(Bayes theorem)을 바탕으로 어떤 사건의 원인과 결과를 나타내는 노드(Node)와 노드(Node) 사이의 인과관계를 아크(Arc)를 이용하여 표현하는 기법을 말한다[57]. 이러한 방법의 가장 큰 장점은 조건부 가능성(Conditional probability)과 그것들의 상호 관계를 쉽게 표현할 수 있다는 것이다. 즉, 통해 베이지안 네트워크는 주어진 원인에 대한 사전가능성(Prior probability)을 바탕으로 조건부가능성을 확인할 수 있어 사건의 빈도 및 심각성을 분석하는데 적합한 모델로 사용된다[57].

선박 운항중 발생하는 사고는 원인과 결과 사이에 복잡한 인과관계를 형성하고 있다. 이러한 다양한 사건들 사이의 인과관계를 확률적으로 표현하면 사고의 원인 및 이들의 발생가능성을 식별하기 쉽다. 그러나 이러한 확률적인 인과관계를 모델로 표현하는 것은 매우 어려운데, 1763년 베이즈(Bayes)가 고안한 베이지안 기법을 적용하면 직접적인 인과관계의 조건부 가능성을 정의한 후 확률분포로 효과적으로 표현할 수 있다[54]. 이것을 수식으로 모델화한 것이 베이즈 이론이며 수식은 (2.1)과 같다.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (2.1)$$

B : Evidence

A : Cause(원인) or Hypothesis(추측)

P(A | B) : Posterior probability(사후 확률)

P(B | A) : Likelihood function(우도함수)

P(A) : Prior probability(사전가능성)

수식 (2.1)에서 B(Evidence)가 주어졌을 때 A(Cause)가 발생할 확률을 X라고 하면 이것을 $P(A | B) = X$ 라고 표현한다. 그러나 이것은 B가 사실(True)이면 항상 A는 X를 의미하는 것이 아니고 만약 B가 사실(True)이고 알려진 모든 것이 A와 관련이 없으면 $P(A) = X$ 가 된다는 것을 의미한다[57].

베이지안 네트워크의 목적은 주어진 증거(Evidence)를 통해 각 원인(Cause)들의 조건부 가능성 분포를 계산하는 것인데, 실제로 우리는 주어진 원인으로 증거를 관측하여 반대의 조건부 가능성 분포만 얻을 수 있다. 따라서 베이지안 네트워크는 주어진 증거에 대한 원인의 조건부 가능성 분포를 구하기 위해서 베이즈 이론을 이용하여 주어진 원인에 대한 증거의 확인이라는 반대 조건부 가능성에 대한 분포를 구한다. 이러한 개념을 적용하여 수식 (2.1)을 풀어서 표현하면 수식 (2.2)와 같다[57].

$$P[Cause|Evidence] = P[Evidence|Cause] \cdot \frac{P[Cause]}{P[Evidence]} \quad (2.2)$$

예를 들어 DP선박에서 전기 및 DGPS 컴퓨터의 기능장애(Malfunction)로 DGPS의 작동불능(Failure) 문제가 발생한다고 가정했을 때 전기적 문제를 “E” 그 확률을 0.2로 가정하면 $P[E=Fail] = 0.2$ 로 표현되고, DGPS 컴퓨터의 기능장애를 “M” 그 확률을 0.3으로 가정하면 $P[M=Fail] = 0.3$ 으로 표현된다. 그리고

전기적 문제와 DGPS 컴퓨터의 기능장애(Malfunction)는 서로 독립되어 있다고 할 수 있다. 이때 전기적 문제 및 DGPS 컴퓨터의 기능장애가 없으면 DGPS의 작동불능은 발생하지 않는다고 할 수 있다. 즉, DGPS의 작동불능(Failure)을 D라고 하면 $P[D=Fail | E=No Fail, M=No Fail] = 0$ 으로 표현된다. 전기적 문제는 없으나 DGPS 컴퓨터의 기능장애가 있는 경우 DGPS의 작동불능(Failure) 확률을 0.2라고 가정하면, 이는 $P[D=Fail | E=No Fail, M=Fail] = 0.2$ 로 표현된다. 마지막으로 전기에 문제가 있으면 DGPS 컴퓨터의 기능장애와는 상관없이 DGPS는 작동불능이 되고 $P[D=Fail | E=Fail, M=No Fail] = 1$, $P[D=Fail | E=Fail, M=Fail] = 1$ 로 표현된다. 이를 바탕으로 DGPS의 작동불능 가능성 $P[D=Fail]$ 는 베이즈 이론을 바탕으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 P[D=fail] &= \sum_{E,M} P[D=fail, E, M] = \sum_{E,M} (P[D=fail|E, M] \cdot P[E] \cdot P[M]) \quad (2.3) \\
 &= (P[D=fail|E=fail, M=fail] \cdot P[E=fail] \cdot P[M=fail]) + \\
 &\quad (P[D=fail|E=fail, M=No fail] \cdot P[E=fail] \cdot P[M=No fail]) + \\
 &\quad (P[D=fail|E=No fail, M=No fail] \cdot P[E=No fail] \cdot P[M=No fail]) + \\
 &\quad (P[D=fail|E=No fail, M=fail] \cdot P[E=No fail] \cdot P[M=fail]) \\
 &= (1 \times 0.2 \times 0.3) + (1 \times 0.2 \times 0.7) + (0 \times 0.8 \times 0.7) + (0.2 \times 0.8 \times 0.3) \\
 &\approx 0.25
 \end{aligned}$$

수식 (2.3)의 결과값 “0.25”를 어떠한 증거의 확인전 DGPS 작동불능에 대한 사전가능성(Prior Probability)이라고 한다. 이러한 베이지안 네트워크를 적용하고 이를 그래픽으로 표현하는 도구들이 여러 가지가 있는데, 본 논문에서는 미국 피츠버그 대학에서 개발한 GeNIe 프로그램을 활용하였다[9][57]. GeNIe는 베이지안 네트워크를 기반으로 정성적 분석을 통해 만들어진 흐름도(Flowchart)에 사고관련 데이터를 접목하여 조건부 가능성을 그래픽으로 보여주는 프로그램이다[9]. 앞서 계산된 수식(2.3)을 GeNIe 베이지안 네트워크를 활용한 그래픽으로 표현하면 Fig. 4와 같다.

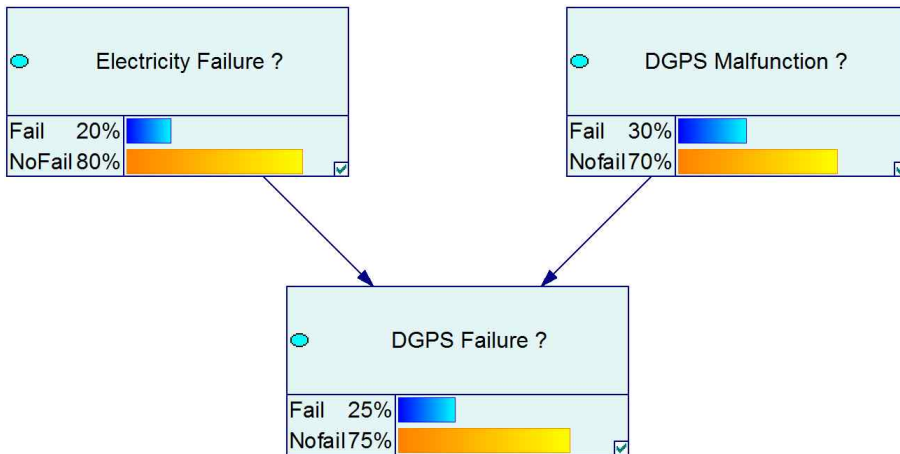


Fig. 4 Prior probability distribution

만약 DGPS의 전원을 켜는데 작동하지 않는다면, 즉 ‘D=Fail’의 가능성이 1이 되었다면 전기적 문제와 DGPS 컴퓨터의 기능장애가 주어진 증거(DGPS Failure)에 대해서 어떻게 변화되었는지 수식으로 계산해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P[E = fail | D = fail] &= \sum_M P[E = fail, M | D = fail] \\
 &= \sum_M \frac{P[D = fail | E = fail, M] \cdot P[E = fail] \cdot P[M]}{P[D = fail]} \\
 &= \left(\frac{1 \times 0.2 \times 0.3}{0.248} \right) + \left(\frac{1 \times 0.2 \times 0.7}{0.248} \right) \\
 &\approx 0.81
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

수식 (2.4)를 통해서 DGPS 작동불능이라는 조건이 주어졌을 때 이것의 원인이 전기적 문제일 확률이 약 81%라는 것을 의미하고 이것을 조건부 가능성 또는 사후확률이라고 한다.

$$\begin{aligned}
P[M = fail | D = fail] &= \sum_E P[E, M = fail | D = fail] \\
&= \sum_E \frac{P[D = fail | E, M = fail] \cdot P[E] \cdot P[M = fail]}{P[D = fail]} \\
&= \left(\frac{1 \times 0.2 \times 0.3}{0.248} \right) + \left(\frac{0.2 \times 0.8 \times 0.3}{0.248} \right) \\
&\approx 0.44
\end{aligned} \tag{2.5}$$

수식 (2.5)는 DGPS 작동불능이 발생하였을 때 이것의 원인이 DGPS 컴퓨터의 기능장애(Malfunction)일 확률이 약 44%라는 것을 의미한다.

수식 (2.4) 및 (2.5)의 결과를 GeNIe에서 그래픽으로 표현하면 Fig. 5와 같다.

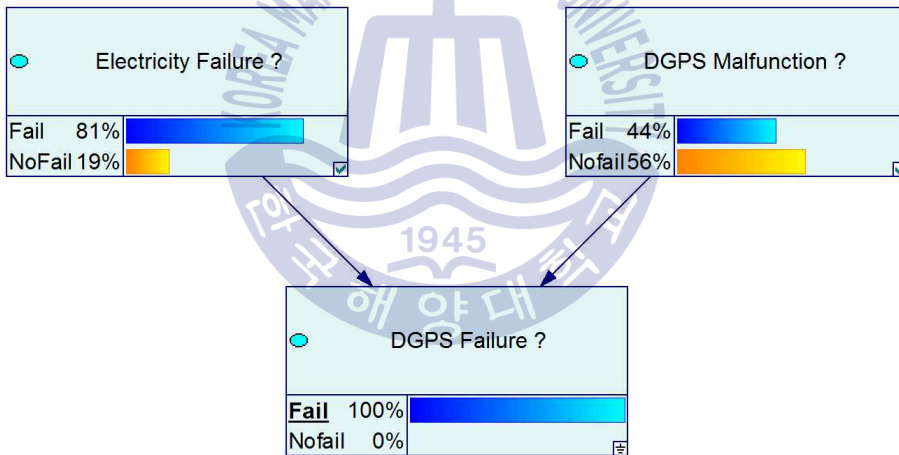


Fig. 5 Posterior probability distribution after observing evidence

이러한 방법으로 베이지안 네트워크는 사전가능성을 구하여 특정 현상이 발생하였을 경우의 조건부 가능성을 확인할 수 있다[57].

Fig. 6 및 Table 1은 DGPS 컴퓨터의 작동불능의 원인으로 전기적 문제 및 DGPS 컴퓨터의 기능장애와 관련한 사전가능성을 GeNIe의 NPT(Node Probability Table)로 나타내고 있다. Fig. 6에서 Fail과 Fail사이에 선택된 “1”은 전기적 문제

와 DGPS 컴퓨터의 기능장애가 동시에 발생하여 DGPS의 사용불능(Failure)을 만들어내는 경우는 100%라는 것을 의미하고 이를 1로 GeNIe에 입력한다. 더불어 GeNIe에서 NPT로 표현되는 각 셀의 의미는 Table 1과 같다.

Electricity Failure ?	Fail	NoFail
DGPS Malfunction ?	Fail	Nofail
Fail	1	0.2
Nofail	0	0.8

Fig. 6 NPT from GeNIe (DGPS failure causes)

Table 1 Meaning of Node Probability Table

Electricity failure	Fail		No fail	
DGPS Malfunction	Fail	No fail	Fail	No fail
Fail	Electricity failure 및 DGPS malfunction 동시 발생하면 Node fail	Electricity failure 발생하면 Node fail	DGPS malfunction만 발생하면 Node fail	Electricity failure 및 DGPS malfunction이 발생하지 않으면 Node fail
No fail	Electricity failure 및 DGPS malfunction 동시 발생하면 Node no fail	Electricity failure 발생해도 Node no fail	DGPS malfunction만 발생하면 Node no fail	Electricity failure, DGPS malfunction이 발생하지 않으면 Node no fail

4) HFACS

HFACS는 인적오류에 대한 이론과 실제를 연결하는 가교 역할을 하는 도구로 항공분야에서 인적오류의 분류를 위해 개발되었으며, 사고의 인적요인을 포괄적으로 분류하고 있고 사용하기 편리하여 선박사고의 인적오류를 분석하는 도구로도 많이 활용되고 있다[7][62].

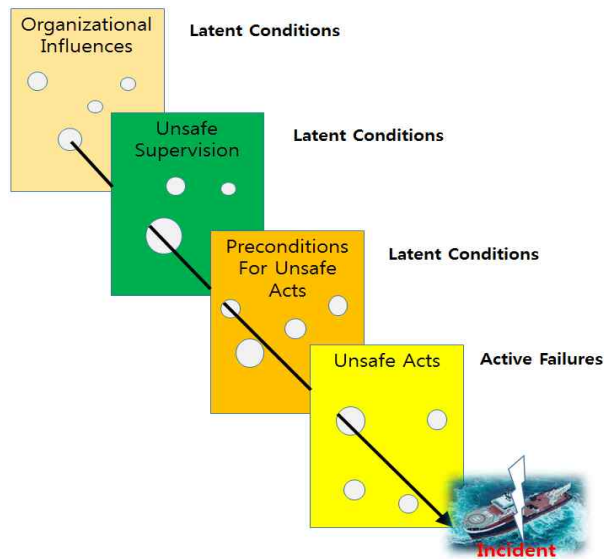


Fig. 7 Reason's Swiss cheese model theory[19]

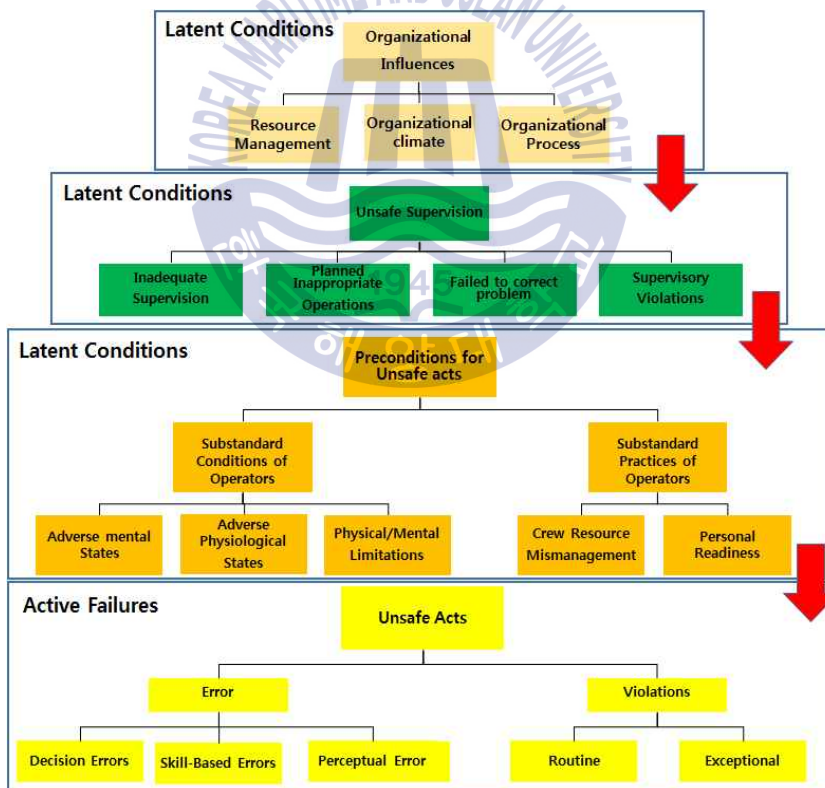


Fig. 8 HFACS model[7]

HFACS의 기본개념이 되는 스위스치즈 모델에서는 인적오류를 Fig. 7과 같이 조직상의 영향(Organizational Influences), 불안전 감독(Unsafe Supervision), 불안전 행동 사전조건(Pre-conditions for Unsafe Acts) 및 불안전 행동(Unsafe Acts) 4단계로 분류하고 있다[19].

마지막 단계에 있는 불안전 행동(Unsafe Acts)은 실질적인 위험행동을 말하고, 불안전 행동의 사전조건(Preconditions for Unsafe Acts)은 불안전 행동을 야기한 잠재적인 문제의 상태를 말하며, 불안전 감독(Unsafe Supervision)은 중간 단계의 잠재적인 관리실패를 말한다. 조직상의 영향은 중간 단계 관리자의 관리정책에 영향을 미치는 잠재요소를 의미한다[62]. Fig. 7을 바탕으로 인적오류를 세부적으로 분류하면 Fig. 8과 같고 각 단계에 포함되어 있는 세부적인 인적오류의 의미는 다음과 같다.

(1) 불안전 행동

불안전 행동은 사고에 직접으로 연결되는 인적오류를 말하며 이는 다시 의도하지 않은 오류(Errors)와 의도한 오류(Violation)로 나뉜다[62].

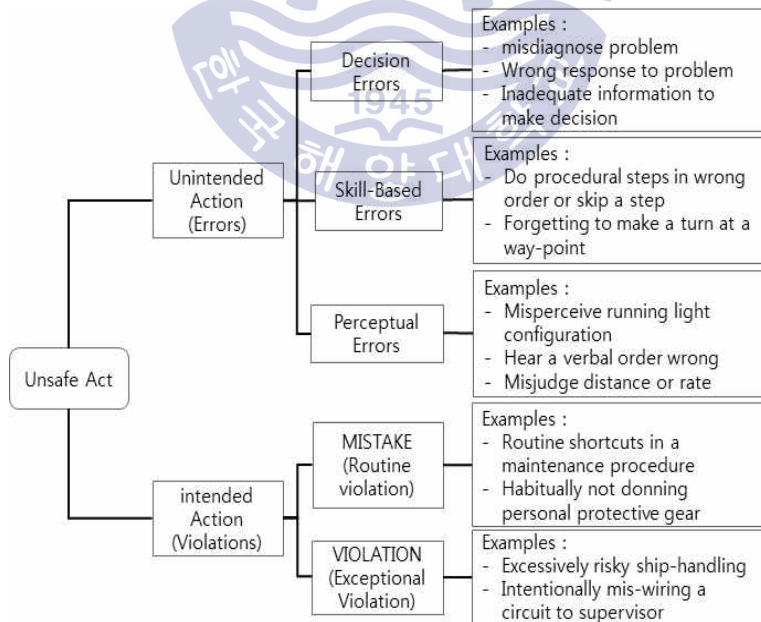


Fig. 9 Unsafe acts classification[7]

의도하지 않은 오류(Errors)는 의도한 결과의 달성에 실패한 개인의 정신적, 육체적 활동을 말하는 것으로 사람의 행동이 의도하지 않은 결과로 나타나는 것을 말한다. 예를 들어 선장이 좌현 20도를 의도했으나 지시는 우현 20도로 하는 경우가 될 수 있다. 의도된 오류(Violation)는 의도적으로 표준운용절차나 규정을 위반하는 행동을 말한다. 예를 들어 기관사가 정비절차를 간단하게 하려고 수행해야 할 원래의 방법으로 수행하지 않는 경우가 있다. Fig. 9에 해당되는 인적오류를 상세히 분류하면 Table 2와 같다.

Table 2 Classification guide for unsafe acts[7]

Guide for Unsafe acts		
Errors	Skill-based	Failed to prioritize attention
		Inadvertent use of controls
		Omitted step in procedure, or executed step out of sequence.
		Omitted checklist item or completed check list item out of sequence.
	Perceptual	Misjudged distance/rate/time
		Misread dial or indicator
		Failed to see/hear/otherwise sense
	Decision	Improper procedure or maneuver
		Misdiagnosed emergency
		Wrong response to emergency
		Poor decision
Violations	Routine	Definition: Common or habitual instance of breaking the rules and regulations (taking a shortcut) that is part of a person's behavior pattern and is often tolerated by the organization
	Exceptional	Definition: Isolated departure from authority, rules and regulations (taking a shortcut) that is typically not condoned by management

의사결정 오류(Decision error)는 의도한대로 행동하지만 그것이 상황에 적합하지 않은 것을 말하는 것으로 상황을 완전히 이해하지 못했거나 문제를 잘못 진단하여 잘못된 해결책을 적용하는 것이며, 스스로는 행동이 적합하다고 생각하고 시행하지만 적절한 지식의 부족 또는 단순히 잘못된 선택을 하는 것을 말한다[7]. 기술기반 오류(Skill based errors)는 익숙해지고 잘 숙달되어 거의 자동으

로 수행되는 기술 및 절차에서 발생할 수 있는 오류를 말하며 선박에서의 일상적인 점검, 방위측정, 화면감시 등이 기술기반 작업으로 간주된다. 기술기반 오류를 다르게 표현하면 사전에 프로그램되어 저장된 패턴에 의해서 인간의 능력이 지배되는 것을 말하며 일상생활에서 매일 발생할 수 있는 의도하지 않은 실수(Slip) 및 과실(Lapse)을 말한다. 기술기반 오류가 발생하면 단순히 좀 더 주의 깊게 행동하는 조치만으로는 문제가 해결되는 것이 아니기 때문에 이러한 사항이 발견되면 원인이 발생한 잠재원인을 찾아야 한다[7].

지각적 오류(Perceptual errors)는 주로 감각으로 인지하는 능력의 감소에 의해서 발생한다. 예를 들어 뇌가 피로하면 시각적 환상이 일어날 수 있고, 소음이 심한 곳에서는 대화에 있어 오류가 발생할 수 있다.

위법(Violation)은 규정이나 절차를 고의로 위반하는 경우를 말하는 것으로 일상적 위법(Routine violation)은 습관적인 위법으로 도로에서 규정 속도보다 습관적으로 10~20km 빨리 운전하는 경우를 들 수 있다.

예외적 위법(Exceptional violation)은 개인의 특징적 습관이 아닌 위반으로 예를 들어 시속 100km 지역에서 시속 200km로 운전하는 것은 일상적인 습관이 아니며 권한 있는 기관에서 용납할 수 있는 것도 아니기 때문에 예외적 위법이라고 본다[7].

(2) 불안전 행동 사전조건

불안전 행동 사전조건(Preconditions for unsafe acts)은 운용자의 기준미달 상태(Substandard conditions of operators)와 운용자의 기준미달 운용(Substandard practices of operators)으로 나뉜다[7].

Table 3은 불안전 행동 사전조건을 상세히 분류한 것이다.

Table 3 Classification guide for preconditions for unsafe acts[7]

Guide for preconditions for unsafe acts		
Substandard Conditions of Operators	Adverse Mental States	Channelized attention
		Complacency
		Distraction
		Mental fatigue
		Haste
		Loss of situational awareness
		Misplaced motivation task saturation
	Adverse Physiological States	Impaired physiological state
		Medical illness
		Physiological incapacitation
		Physical fatigue
	Physical/ Mental Limitations	Insufficient reaction time
		Poor vision/hearing
		Lack of knowledge
		Incompatible physical capability
Substandard Practices of Operators	Crew Resource Mgt.	Impaired communications due to language difference
		Interpersonal conflict among crew
		Failed to use all available resources
		Failure of leadership
		Misinterpretation of traffic calls
		Failed to conduct adequate brief
		Impaired communication/conflict due to cultural difference
	Personal Readiness	Self-medicated
		Inadequate rest

운용자의 기준미달 상태에서 부정적 정신상태(Adverse mental states)는 질병, 음주, 소음이나 진동으로 인한 청각 불량, 개인의 감정상태, 자만/과신, 안일한 생각, 서두름, 당황, 주의산만 등을 말한다. 부정적 신체상태(Adverse physiological states)는 시각과 화면정보 부족, 시각 및 화면이 구성한 정보의 충분한 처리시간 부족, 마약/알콜 및 육체적 피로 등을 말한다. 그리고 물리적/정

신적 한계는 필요한 정보의 인지가 불가하거나 가능하더라도 개인이 이를 안전하게 다룰 수 있는 기술이나 시간이 없는 경우를 말한다[7].

운용자 기준미달에서 선원관리(Crew resource management)는 선원들 간의 팀워크 부족, 선교에서의 역할분담 불명확, 두 명이 선교에 있는 경우 역할분담의 잘못된 이해 등이 있고, 개인 준비상태(Personal readiness)는 개인의 운용준비 상태의 실패를 말하는 것으로 작업전 휴식부족, 음주규정 위반 등이 있다.

(3) 불안전 감독

불안전 감독은 Table 4와 같이 4가지로 구분된다.

Table 4 Classification guide for unsafe supervision[7]

Guide for unsafe supervision	
Inadequate Supervision	Failed to provide guidance
	Failed to provide operational doctrine
	Failed to provide oversight
	Failed to provide training
	Failed to track qualifications
	Failed to track performance
Planned Inappropriate Operations	Failed to provide correct data
	Failed to provide adequate brief time
	Improper manning
	Adequacy of operational procedure or plan
	Provided inadequate opportunity for crew rest
Failed to Correct a known Problem	Failed to correct document in error
	Failed to identify an at risk behavior
	Failed to initiate corrective action
	Failed to report unsafe tendencies
Supervisory Violations	Authorized an unnecessary hazard
	Failed to enforce rules and regulations
	Authorized unqualified crew

불안전 감독의 부적절한 감독(Inadequate supervision)은 명령체계에서 감독 실패를 말하며, 계획된 운용절차의 부적절(Planned inappropriate operations)은 운용

절차가 수립되었으나 운용자가 이러한 절차를 수용하기 불가능한 위험에 놓여 이것이 결국 부정적인 영향을 미치게 되는 것을 말한다. 문제해결의 실패(Failure to correct problem)는 개인, 장비, 훈련 또는 안전관련 분야의 문제가 관리자에게 알려졌으나 이것이 해결되지 않은 상태로 있는 것이며, 감독의 규정위반(Supervisory violations)은 관리자가 규정을 무시하는 경우를 말한다.

(4) 조직상의 영향

조직상의 영향에서 자원관리(Resource management)는 조직자원의 관리를 말하며 선박 운용자의 선발절차, 교육/훈련지침, 인력배치 지침과 같은 인적자원 관리를 포함한다. 조직분위기(Organizational climate)는 선박 운용자의 능력에 영향을 미치는 조직적 체계를 말하는 것으로 조직구조에 따른 지휘체계, 회사 대표자 및 책임, 보고방식 등이 그 예이다. 운용절차(Operational process)는 조직내부의 공식적인 관리 및 절차를 나타내는 것으로 선장이 사람들을 편애하거나, 선박에서 적절한 교육이 이루어지고 있는지에 대한 검증을 하지 않는 경우 관련된 문제가 발생할 수 있다. 조직상의 영향에 대한 상세분류는 Table 5와 같다.

Table 5 Classification guide for organizational influences[7]

Guide for organizational influences	
Resource Management	Inadequate management of human resources
	Inadequate management of monetary resources
	Inadequate design and maintenance of facilities
Organizational Climate	Adequacy of organizational structure
	Adequacy of organizational policies
	Adequacy of safety culture
Organizational Process	Adequacy of established conditions of work
	Adequacy of established procedures
	Adequacy of oversight

2.3 연구에 사용된 FSA 도구

앞서 위험의 식별 및 분석에 사용되는 도구들에 대해 간략하게 설명하였다. 이러한 도구들 중에 어떤 도구를 선택하여 분석할 것인가는 분석할 문제의 복잡성, 가용정보의 양에 기초한 위험분석의 불확실성 수준, 전문가의 수준과 시간 및 비용, 정량적 결과를 도출할 수 있는가에 따른다[25]. 기본적으로 위험은 정성적/정량적 방법으로 수치화하여 이를 바탕으로 위험도를 판단할 수 있다. 정성적 방법은 위험의 결과와 가능성에 대한 기준을 사전에 정하여 이에 대한 순위를 바탕으로 위험을 High, Medium 및 Low로 나누며, 정량적 방법은 분석하고자 하는 사항에 대한 정보의 불충분 및 사람에 의한 오류발생 등이 있을 수 있기 때문에 이러한 경우 전문가를 활용할 것을 권고하고 있다[25].

IEC 31010문서는 위험분석을 위한 도구의 선택과 적용 가능성에 대한 지침을 제공하는 문서인데, 이 문서에서는 위험분석도구의 적용 가능성을 Table 6과 같이 제시하고 있다. 본 논문에서는 앞서 언급된 선행 연구에 사용된 도구들의 적용사례와 Table 6에서 언급하고 있는 위험분석 도구의 적용 가능성 기준을 바탕으로 FSA 수행도구를 선택하였다.

Table 6에서 보는 바와 같이 FSA에 주로 사용되고 있는 ETA는 위험분석에서 결과를 분석하는데 매우 적합하다는 것을 알 수 있다. 그러나 ETA는 위험의 평가(Risk Evaluation)에는 적용할 수 없다는 한계를 가지고 있다. 이는 ETA를 통해 위험요소에 의한 결과는 확인할 수 있으나 이것의 위험도를 함께 평가하기는 한계가 있다는 것을 의미한다. 반면 베이지안 네트워크는 위험요소에 의한 결과와 더불어 그러한 위험의 평가에도 강점을 가지고 있는 도구로 나타나 있다. 위험분석의 결과를 통계적으로 분석하는 도구로는 다양한 도구들이 사용될 수 있으나 사전가능성을 바탕으로 조건부 가능성을 확인할 수 있는 베이지안 네트워크가 신뢰성이 좋고 불확실성 수준이 낮아 폭넓게 사용되기 때문에 본 논문에서는 위험분석을 위해 베이지안 네트워크를 사용하도록 한다.

Table 6 Applicability of tools used for risk assessment[25]

Tools and Techniques	Risk Assessment Process				
	Risk Identification	Risk Analysis			Risk Evaluation
		Consequence	Probability	Level of Risk	
Brainstorming	SA ¹⁾	NA ²⁾	NA	NA	NA
Structured or semi-structured interviews	SA	NA	NA	NA	NA
Delphi	SA	NA	NA	NA	NA
Check-lists	SA	NA	NA	NA	NA
Primary hazard analysis	SA	NA	NA	NA	NA
Hazard and operability studies (HAZOP)	SA	SA	A ³⁾	A	A
Hazard Analysis and Critical Control Points	SA	SA	NA	NA	NA
Environmental risk assessment	SA	SA	SA	SA	SA
« What if? » (SWIFT)	SA	SA	SA	SA	SA
Scenario analysis	SA	SA	A	A	A
Business impact analysis	A	SA	A	A	A
Root cause analysis	NA	SA	SA	SA	SA
Failure mode effect analysis	SA	SA	SA	SA	SA
Fault tree analysis	A	NA	SA	A	A
Event tree analysis	A	SA	A	A	NA
Cause and consequence analysis	A	SA	SA	A	A
Cause-and-effect analysis	SA	SA	NA	NA	NA
Layer protection analysis	A	SA	A	A	NA
Decision tree	NA	SA	SA	A	A
Human reliability analysis	SA	SA	SA	SA	A
Bow tie analysis	NA	A	SA	SA	A
Reliability centered maintenance	SA	SA	SA	SA	SA
Sneak circuit analysis	A	NA	NA	NA	NA
Markov analysis	A	SA	NA	NA	NA
Monte Carlo simulation	NA	NA	NA	NA	SA
Bayesian statistics and Bayes Nets	NA	SA	NA	NA	SA
FN curves	A	SA	SA	A	SA
Risk indices	A	SA	SA	A	SA
Consequence/probability matrix	SA	SA	SA	SA	A
Cost/benefit analysis	A	SA	A	A	A
Multi-criteria decision analysis	A	SA	A	SA	A

1) Strongly applicable, 2) Not applicable, 3) Applicable.

DP선박에 일반적으로 적용되는 FMEA는 위험의 식별, 분석 및 평가 모든 영역에서 강점을 가지고 있으나 FMEA는 그 자체로 모든 FSA의 단계를 포함하기 때문에 본 논문에서는 참조로만 활용한다.

인적오류 분석을 위해서는 앞서 언급된 바와 같이 DP선박 LOP사고 보고서에서 인적오류를 확인하고, 이를 해사분야에서 그 적용성이 확인된 HFACS에 따라 분류한다. 이를 바탕으로 베이지안 네트워크에 적용하여 DP선박 LOP사고에 대한 인적오류의 조건부 가능성을 분석한다.

브레인스토밍은 위험을 분석하는 과정에서 다양한 의견을 수집하기 위해 보조적 방법으로 사용되기 때문에 앞서 언급한 위험분석방법에 접목하여 사용한다.



제3장 DP선박의 위치손실사고 분석

3.1 서론

과거의 선박사고 보고서를 활용하면 이를 바탕으로 사고발생 원인을 밝혀 이를 피하거나 감소시킬 수 있는 방법을 찾을 수 있다. 그러나 선박의 전 생애에서 한번 발생할까 말까한 사고를 방지하기 위해 막대한 비용을 지불해야 한다면 이는 비용편익 측면에서 옳바르지 않기 때문에 사고의 빈도분석을 통해 고위험 사고를 식별하고 이를 중점적으로 관리하는 것이 효과적이다[7].

본 장에서는 DP선박 LOP사고에 대한 이해를 돕기 위해 먼저 DP선박과 그 시스템에 대해 설명한다. 이어서 DP선박에 대한 FSA의 적용을 위해 IMCA에 10년(2001~2010) 동안 보고된 DP선박 LOP사고 보고서의 정량적 분석을 통해 LOP사고의 주된 원인을 식별한다[29]~[32],[34]~[39].

IMCA는 국제 해양엔지니어링 기업협회로 전 세계 900여개 기업이 회원으로 가입되어 있으며, 주로 오프쇼어 분야와 관련된 자격 및 훈련과 안전·환경·법제도(Safety, Environment & Legislation)에 대한 산업계의 표준을 만들고 있다. 또한 IMCA는 4개 기술위원회(Diving, Marine, Offshore Survey, Remote System & ROV)를 중심으로 교육과정에 대한 가이드라인을 바탕으로 다양한 인증교육을 제공하고 있다. IMCA에 제출되는 DP선박 LOP사고 보고서는 산업계의 경험을 공유하기 위해 비강제적으로 시행하고 있는 제도이며, IMCA에서는 이를 바탕으로 연간 DP선박 LOP사고의 원인을 식별 및 분석하고 있다[5]. IMCA 이외의 DP선박과 관련된 사고보고서는 다양하게 존재할 수 있으나 이들 보고서는 대부분 DP선박을 운영하는 기업들이 소유하고 있으며, 이러한 사고보고서의 확보에는 한계가 있기 때문에 본 논문에서는 공식적으로 IMCA에서 발행하는 LOP사고 보고서를 활용한다. 선행 연구에서도 IMCA 보고서를 활용하여 DP선박 LOP사고를 분석한 사례가 있다[56].

DP선박 LOP사고의 분석은 다음과 같은 전제를 바탕으로 수행되었다.

본 논문을 작성하는 시점에 IMCA에 보고된 DP선박 LOP사고 보고서는 2010년이 가장 최신의 자료이며, 10년(2001~2010) 동안 IMCA에 보고된 DP선박 LOP사고 보고서가 발생한 모든 LOP사고를 포함하는 것은 아니다. 더불어 IMCA의 DP선박 LOP사고의 분류기준은 10년 동안 동일하지 않았기 때문에 이를 통일하기 위해 사고의 원인을 10가지로 정리하여 분류하였다.

3.2 DP선박

DP선박은 동력시스템, 추진시스템 및 DP 제어시스템을 사용하여 선박의 6자유도운동(Surge, Sway, Yaw, Pitch, Roll, Heave) 중에서 Surge, Sway 및 Yaw를 자동으로 제어한다[15]. 나머지 Pitch, Roll, Heave는 선박의 실제 위치변동이나 선수방위 변동이 아니기 때문에 DP선박에서는 이를 VRS(Vertical Reference Sensor) 장치로 측정하여 DP 시스템에서 보상하도록 되어 있다[3]. Fig. 10은 선박의 6자유도운동과 외력에 의한 Surge, Sway 및 Yaw 제어의 개념을 보여준다.

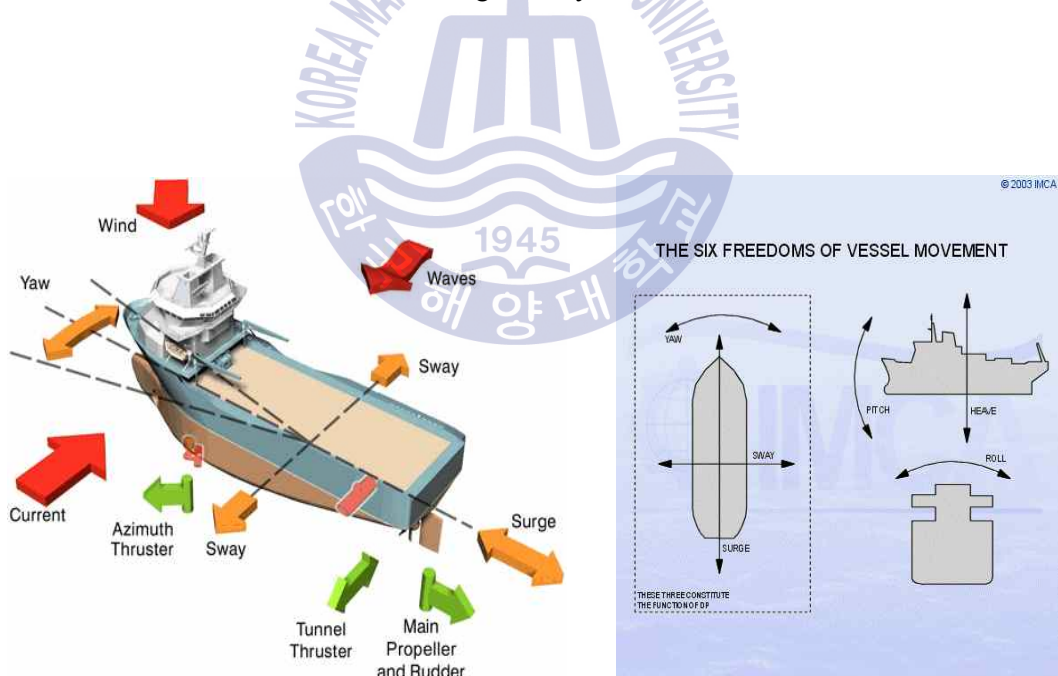


Fig. 10 6 Freedoms of vessel movement[28]

3.2.1 DP 시스템의 구성요소

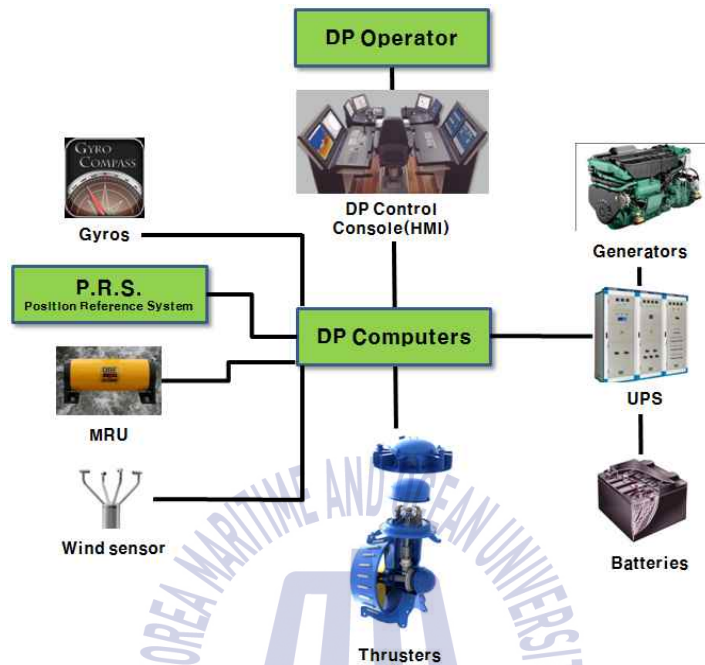


Fig. 11 Elements of DP systems[3]

IMO MSC/Circ. 645 문서를 바탕으로 DP 시스템의 구성요소를 살펴보면 Fig. 11과 같이 DPO, HMI(Human Machine Interface), Thruster, 동력시스템, 센서, PRS 및 DP 컴퓨터 등 7가지 요소이며[3], 각각의 역할은 다음과 같다.

1) DPO

DPO는 DP선박 운용자를 말하며 기본적으로 STCW 협약에 의한 해기사 면허를 보유하고 있는 사람이 DPO 자격을 취득하여 DP선박을 운용한다. DPO의 자격 및 훈련요건은 Nautical Institutes의 DPO 훈련 및 자격기준과, STCW 협약 Section B-V/f DP 시스템 운용자의 훈련 및 경력에 대한 지침에서 언급하고 있으며, IMCA M 117 문서에서는 DPO의 경험적 요건에 대한 지침을 제시하고 있다[26][50].

2) HMI(Human Machine Interface)

HMI는 DPO가 DPS를 운용하는데 있어 최적의 의사결정을 할 수 있도록 하는 중요한 장비를 말하며, 이러한 장치는 인적오류의 위험을 줄여줄 수 있도록 직관적으로 운용할 수 있는 배치, 인체공학적인 디자인, 논리적인 운용, 관련정보의 효과적인 표시 및 사용자 편의적인 요소들을 갖추고 있어야 한다[3].

3) Thruster 시스템

Thruster는 DP 컴퓨터가 필요한 동력을 계산하여 관련 정보를 보내면 DP선박을 원하는 위치에 유지하거나 이동하도록 하는 장치로 일반적으로 Propellers, Tunnel Thrusters, Azimuth Thrusters, Azipods 등 4종류의 추진장치가 DP선박에 설치되어 사용되고 있다[6]. Thruster는 DPS에 추진력을 제공하기 위해 필요한 모든 장치 및 시스템을 말하며 추진장치 및 보조장치, 주추진장치 및 Rudder, 추진제어장치 및 관련 케이블을 포함한다[28].

4) 동력시스템

동력시스템은 DPS에 동력을 공급하기 위한 모든 장치 및 시스템을 말하며, 파이프라인을 포함한 일반적인 보조 및 주 추진장치, 발전기, 배전반, 배전시스템 등을 포함한다[28].

DP선박의 운용에서 가장 중요한 사항중 하나가 동력의 생산, 공급 및 분배이다. 발전기에서 만들어진 동력은 추진장치, 보조장치 및 DP 제어장치와 센서 등에 공급되는데, 이들 중 추진장치가 가장 많은 동력을 소비하는 장치이며 해상 날씨변화에 따라 동력의 큰 변화가 요구되기 때문에 DP선박의 동력시스템은 동력의 소요에 대해 유연하고 신속하게 대응할 수 있어야 한다[3].

5) 센서

DP선박의 주된 센서는 외력을 측정하는 Wind 센서, 선수방위를 측정하는 자이로(Gyro), 선박의 6자유도 운동에서 Rolling, Pitching 및 Heaving을 측정할 수

있는 VRS 등이 있다. 외력을 측정하는 센서는 조류센서, 파고센서 등 다양한 장치들이 개발되어 있지만 DP선박에서는 유일하게 풍향/풍속만 외력으로 측정하기 때문에 Wind 센서의 정확도가 매우 중요하다[3].

6) PRS

DP선박에서 사용하는 PRS는 DPS를 설치하고 있는 선박이 그 위치를 유지 또는 이동할 때 위치변화를 확인할 수 있도록 해주는 시스템을 말하며, 가장 대표적인 PRS가 DGPS이다[3]. 이 외에도 음파를 이용하는 HPR(Hydro-aquatic Position Reference), 레이저를 이용한 Fanbeam 시스템, 물리적 와이어를 이용한 Taut-wire, 전파를 사용하는 Artemis 등 다양한 장치들이 사용 환경에 맞게 설치, 사용되고 있다. DGPS는 전 지구적인 위치표시 장치인 반면에 HPR, Artemis, Fanbeam, Taut-wire 등은 Local PRS로 특정 목표물과의 상대거리 및 방위를 측정하여 위치를 확인하는 방식이며 그 개념은 Fig. 12와 같다[33].

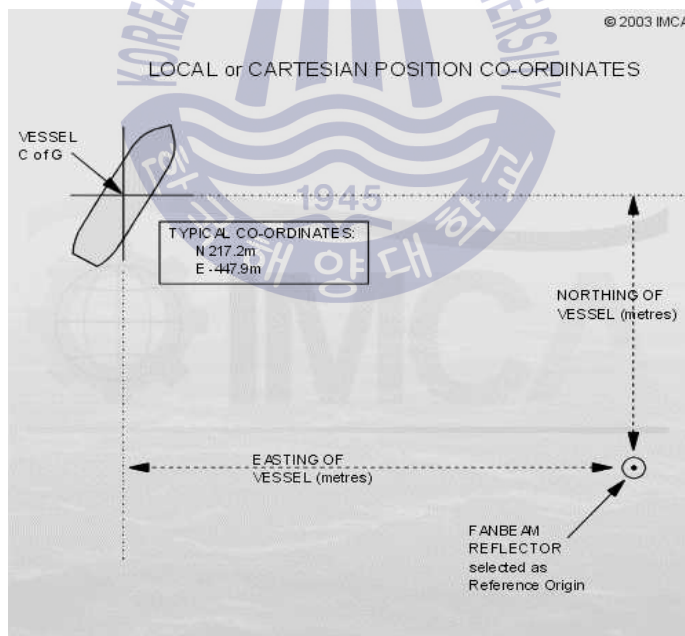


Fig. 12 Local position reference system (Fanbeam)

7) DP 컴퓨터

DP 컴퓨터는 DP선박의 운동모형을 수학적으로 만들어 선박모델에 작용하는 외력을 계산하고 PRS 및 센서로부터 받은 정보를 바탕으로 원하는 위치를 유지하기 위한 힘을 계산하여 추진장치를 배치 및 작동시키는 역할을 한다[28].

3.2.2 DP선박의 등급

1) IMO 등급기준

IMO에서는 DP선박의 등급을 신뢰성 또는 Redundancy 개념에 따라 Table 7과 같이 정의하고 있다[8][15][28].

Table 7 IMO DP equipment class[28]

Equipment Class 1	단일의 고장에 의해서 위치유지 기능을 상실
Equipment Class 2	구성요소나 시스템 단일의 고장사고에 의해서 위치유지 기능을 상실하지 않음. 보통 정적인 구성요소는 손상으로부터 적절한 보호를 수행할 수 있으므로 고장으로 고려되지 않으며, 단일고장의 기준은 다음을 포함 함. - 움직이는 구성요소 또는 시스템 (Generators, Thrusters, Switchboards, Remote controlled valve, etc.) - 보호 및 신뢰성을 위해 적절히 문서화 되지 않는 일반적인 정적 구성요소 (Cables, Pipes, Manual valves, etc.)
Equipment Class 3	구성요소나 시스템의 단일의 고장사고에 의해서 위치유지 기능을 상실하지 않고, 다음의 단일의 고장에도 DP 기능 유지 가능 - Class 2에 언급된 사항 및 일반적인 정적 구성요소 중 고장이 예측되는 것 - 화재나 침수로부터 방수가 되는 모든 구성요소의 고장 - 화재나 침수로부터 방화구역의 고장

IMO DP Equipment Class 1선박은 단일의 고장이 발생하면 DP 기능을 유지할 수 없는 등급으로 센서(Gyro, Wind 센서, VRS)에 문제가 발생하거나, 추진시스템이 1개 이상 사용불가한 상황이 되면 위치유지기능이 상실되는 등급을 말한다. IMO DP Equipment Class 2는 Redundancy 개념을 적용하여 단일의 고장이 발생하더라도 DP 기능을 유지할 수 있는 등급을 말한다.

Redundancy는 단일의 고장이 발생했을 때 그 기능을 유지 또는 회복시키는 장치나 시스템의 능력을 말하며, DP선박의 등급은 최악의 고장상태와 관련하여 고장이 발생했을 때 선박이 DP 기능을 유지 할 수 있는지 여부에 따라 분류한다[28]. DP선박이 어느 정도의 신뢰도를 가져야 하는지는 동 선박의 작업중 위치유지능력 상실로 인해 발생하는 위험도에 따라 정해진다[16].

2) 선급 등급기준

IMO 및 선급의 DP선박 등급기준 명칭과 요건을 정리하면 Table 8과 같다.

Table 8 DP class of IMO, DNV, LR and ABS[11]

System		Minimum Requirements		
IMO & Class notations	IMO Class DNV LR ABS	1 AUT DP(AM) DPS-1	2 AURT DP(AA) DPS-2	3 AUTRO DP(AAA) DPS-3
Power System	Generators and Prime movers	Non-redundant	Redundant	Redundant & separate compartments
	Main Switchboard	1	1 with bus tie	2 with normally open bus-tie in separate compartments
	Bus Tie Breaker	0	1	2
	Distribution system	Non-redundant	Redundant	Redundant & separate compartments
	Power management	no	yes	yes
Thrusters System	Arrangement of thrusters	Non-redundant	Redundant	Redundant & separate compartments
Control System	Auto control: no. of control computers	1	2	2+1 in alternative control station
	Manual control : joystick	Yes	Yes	Yes with auto heading
	Single levers for each thruster	Yes	Yes	Yes
Sensors and PRS	PRS	2	3	3 include 1 in alternative control station
	External Sensors			
	Wind VRS Gyro other	1(ABS 2) 1 1(ABS 2) 1	3(IMO 2) 3 3 2	3 3 3 2
UPS		1	2	2+1 in separate compartment
A-60 division		No	No	Yes

Table 8에서 보여주는 바와 같이 DP Class 1의 동력시스템은 Redundancy 동력시스템이 요구되지 않고, DP Class 2에서는 동력시스템의 스위치보드(Switchboard)가 하나의 시스템에 고장이 발생하였을 경우 다른 시스템을 사용할 수 있도록 Bus-tie로 2개 이상으로 분리되어 있어야 한다[28]. DP Class 3에서는 하나의 시스템에 고장이 발생하였을 경우 다른 시스템을 사용할 수 있도록 2개 이상으로 분리되어야 하며, 이렇게 분리된 동력시스템은 IMO SOLAS 협약에 의한 A-60 class 구획¹⁾으로 분리되어 별도의 장소에 위치해야 한다. 또한 동력시스템이 수면하에 위치하는 경우 그 구획은 수밀구조가 되어야 한다[28].

PRS와 관련하여 DP선박은 기본적으로 본선의 위치를 신뢰성을 가지고 지속적으로 확인할 수 있어야 하므로 여러 종류의 PRS를 동시에 사용한다. DP Class 2 및 3에서는 최소 3종류 이상의 PRS가 설치되어야 하며, DP Class 3에서는 최소 1개의 PRS가 A-60 Class로 분리된 Back-up 제어시스템에 직접 연결되어 설치되어야 한다[28].

DP Class 2는 최소 2개의 독립된 컴퓨터 시스템을 가지고 있어야 한다. DP Class 3는 자가진단장치를 포함한 최소 2개의 독립된 컴퓨터 시스템과 추가로 하나의 Back-up DP 컴퓨터가 A-60 Class로 분리된 구역에 설치되어야 한다[28].

DP선박은 3가지 종류의 센서로부터 들어오는 정보가 매우 중요하기 때문에 이러한 센서에 문제가 발생할 것에 대비하여 DP Class 2와 3 선박에는 Wind 센서, 자이로, VRS를 각각 3개 이상 설치하도록 요구하고 있다[15]. 그리고 DP Class 3에서는 적어도 1개의 센서가 A-60 Class로 분리된 Back-up 제어시스템에 직접 연결되어 설치되어야 한다[28].

3.3 DP선박의 LOP사고 분석

3.3.1 일반 분석

- 1) 60분 내에 화염에 노출되지 아니한 쪽의 평균 온도가 최초의 온도보다 섭씨 140도를 초과 상승하지 아니하도록 승인되고 또 이음매를 포함한 어느 한 점에서의 온도도 최초의 온도보다 섭씨 180도를 초과 상승하지 아니하도록 승인된 불연성 재료로 방열이 시공된 격벽 또는 갑판의 구획.

10년(2001~2010) 동안 IMCA에 보고된 DP선박 LOP사고는 총 612건이며, 이들 중 사고원인을 확인할 수 있는 것이 609건이었다. 사고의 원인은 2001~2007년까지 8가지로 분류하고 있었으나, 2008년 이후부터는 DP 컴퓨터, 동력장치, PRS, Thrusters, 인적과실, 환경영향, 전기장치의 결함, 외부영향, 기계적 결함(Mechanical), 운용절차(Procedure), 추진장치(Propulsion) 및 센서 등 총 12가지로 분류하였다. 2007년 이전에는 기계적 결함, 운용절차, 추진장치 및 센서 등 4가지 원인을 다른 8가지 요소에 포함시켜 분류하였기 때문에 동 원인에 의한 사고가 별도로 분류되지 않았다[36].

Table 9 Categorization of DP LOP incident causes

No.	Categorization	Criteria
1	DP 컴퓨터 (Computer)	PRS, 센서로부터 받은 정보를 바탕으로 원하는 위치를 유지하기 위한 힘을 계산하여 thruster를 배치 및 작동시키도록 하는 역할에 hardware나 software적으로 문제가 발생하는 경우
2	동력장치 (Power generation)	동력의 생산, 공급 및 분배에서 장치에 기계적인 문제가 발생하는 경우
3	PRS and Sensors	선박이 그 위치를 유지하거나 이동할 때 위치의 변화를 확인할 수 있도록 해주는 센서를 PRS라고 하며 가장 대표적인 PRS는 DGPS(Differential Global Positioning System)이고 그 외 Fanbeam, Artemis, Taut-wire, RADIUS, DARPS등이 있음. 이러한 장치에 문제가 발생하여 DP선박이 위치유지기능을 상실하는 경우
4	Thruster (Propulsion)	Thrusters는 본선을 원하는 위치로 유지하거나 이동하도록 하는 선박의 조종성능에 영향을 미치는 중요한 장치로써 이러한 장치에 전기적, 기계적 문제가 발생하는 경우
5	인적오류 (Human error)	DP 운용에 있어 DPO, DP 시스템 관련 Engineer, ETO등의 인적 오류에 의한 DP선박 LOP사고 가 발생하는 경우
6	환경영향(외력)	바람, 조류, 파도등 선박을 둘러싸고 있는 자연적인 외력에 의한 경우
7	전기장치 (Electrical)	DP 시스템 사이 전기장치의 연결과 관련하여 문제(예, Cable 연결 불량, 신호 수신 불량 등)가 발생하는 경우
8	외부영향 (External force)	바람이나 조류와 같은 환경적인 영향이외에 주위 통항선박에 의한 영향과 같이 인공적으로 외부에서 만들어지는 힘에 의한 영향을 받은 경우
9	기계적 결함 (Mechanical)	밸브나 파이프가 새는 것과 같은 기계적인 결함
10	운용절차문제 (Procedures)	DP선박이 보유하고 있는 운용 절차 자체의 문제로 LOP사고 발생하는 경우

2008년 이후부터는 IMCA에서 DP선박의 사고원인을 좀 더 상세하게 분류하

기 위해 12가지로 나누었으나 이러한 분류도 해마다 일부 변경되는 부분이 있었다[37]. 본 논문에서는 DP선박 LOP사고 원인분류기준의 통일을 위해 일부 세부항목을 큰 분류에 통합하여 Table 9와 같이 10가지로 분류하였다[39].

Table 9의 분류기준을 바탕으로 10년 동안 보고된 612건의 DP선박 LOP사고에 대한 원인별 분류결과를 Table 10에 제시하였다[10]. 사고보고서에서 원인을 알 수 없었던 것은 11번 항목에 배치하였다.

Table 10 Causes and frequency of DP LOP incidents(2001~2010)

Causes		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Sum
1	Computer	23	11	3	1	8	7	18	22	8	6	107
2	Environment	18	3	3	2	3	7	4	3	2	4	49
3	Power	8	13	5	8	4	12	11	9	13	5	88
4	Human error	8	8	2	6	5	13	7	5	10	3	67
5	PRS(Sensors)	14	14	2	12	5	11	13	27	18	21	137
6	Thruster	14	12	6	4	7	4	8	21	12	2	90
7	Electrical	10	3	0	1	4	3	5	10	10	12	58
8	External force	3	0	0	0	0	2	1	1	0	1	8
9	Mechanical	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
10	Procedures	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4
11	Undetermined	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	3
	Total	98	64	21	34	36	59	67	102	75	56	612

Table 10에서 알 수 있는 것처럼 해마다 약간의 변동은 있지만 10년 동안 DP선박 LOP사고의 원인으로 가장 큰 영향을 미쳤던 것은 PRS(Sensors 포함)이며 모두 137건이다. Table 10을 바탕으로 해마다 발생한 DP선박 LOP사고의 원인별 비율을 나타내면 Table 11 및 Fig. 13과 같다[10].

Table 11 10 Years average of DP LOP incident causes(%) [10]

Causes		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Ave.
1	Computer	23.5	17.2	14.3	2.9	22.2	11.9	26.9	21.6	10.7	10.7	16.2
2	Environment	18.4	4.7	14.3	5.9	8.3	11.9	6.0	2.9	2.7	7.1	8.2
3	Power	8.2	20.3	23.8	23.5	11.1	20.3	16.4	8.8	17.3	8.9	15.9
4	Human error	8.2	12.5	9.5	17.6	13.9	22.0	10.4	4.9	13.3	5.4	11.8
5	PRS(Sensors)	14.3	21.9	9.5	35.3	13.9	18.6	19.4	26.5	24.0	37.5	22.1
6	Thruster	14.3	18.8	28.6	11.8	19.4	6.8	11.9	20.6	16.0	3.6	15.2
7	Electrical	10.2	4.7	0.0	2.9	11.1	5.1	7.5	9.8	13.3	21.4	8.6
8	External force	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	1.5	1.0	0.0	1.8	1.1
9	Mechanical	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.1
10	Procedures	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	3.6	0.6
11	Undetermined	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.7	0.0	0.4
Total		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

연도별 사고원인 및 평균치에서 가장 큰 비율을 차지하는 것은 PRS(22.1%)이고, 그 다음으로 Computer(16.2%), Power(15.9%), Thruster(15.2%), Human error(11.8%) 등의 순으로 나타났다. 언급된 5가지 사고원인의 비율을 모두 합치면 81.2%인데, 이를 통해 DP선박 LOP사고는 하드웨어가 주된 원인으로 작용하고 있음을 알 수 있다[57].

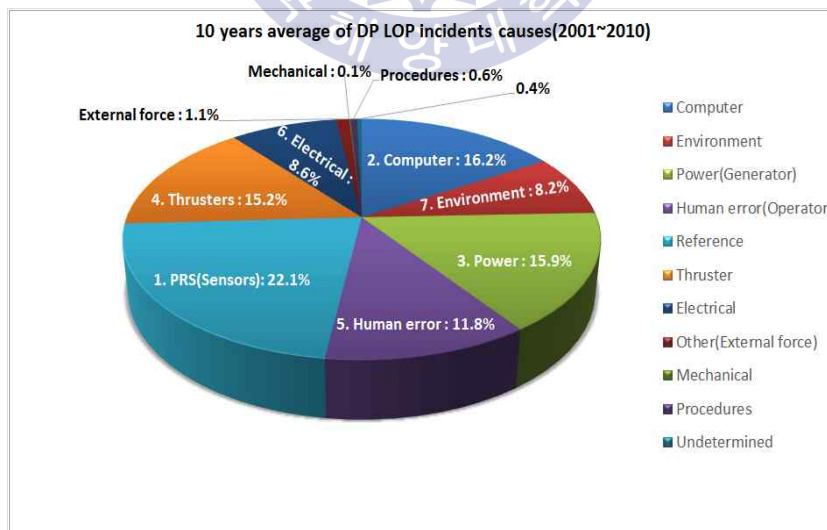


Fig. 13 10 Years average of DP LOP incident causes

3.3.2 원인별 상세 분석

1) 일반

DP선박 LOP사고 원인을 5년, 3년 및 1년 단위로 구분하여 그 평균 비율을 확인하였다.

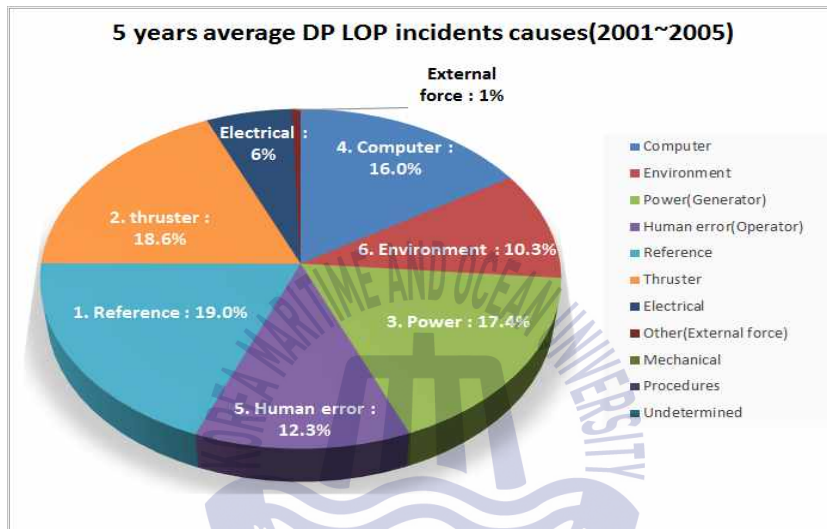


Fig. 14 5 Years average of DP LOP incident causes

Fig. 14는 2001~2005(5년) 동안의 DP선박 LOP사고의 주요 원인을 보여주고 있다. 분석 결과에 따르면 이 기간 동안 LOP사고의 주된 원인은 PRS 19.0%, Thruster 18.6%, Power 17.4%, Computer 16.0% 및 Human error 12.3% 등의 순으로 나타났으며 이들 5가지 원인을 모두 더하면 83.3%가 된다[10].

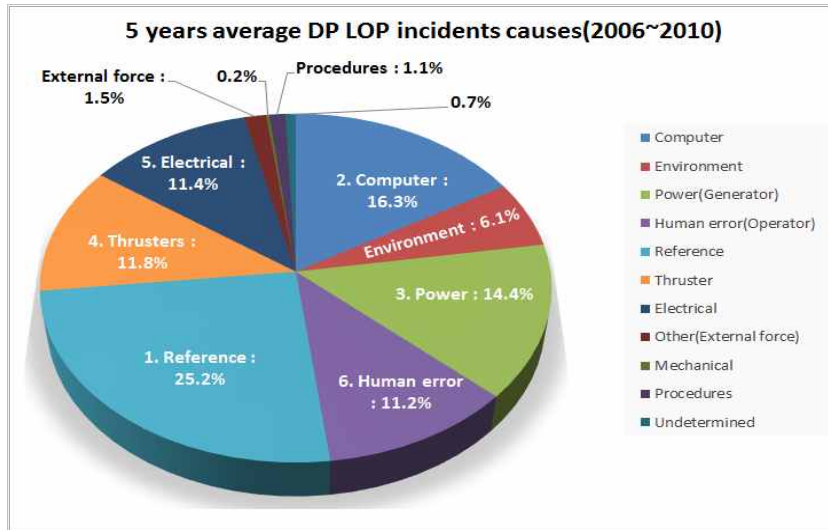


Fig. 15 5 Years average of DP LOP incident causes

Fig. 15는 2006~20010(5년) 동안의 DP선박 LOP사고의 주요 원인을 보여주고 있다. 분석 결과에 따르면 이 기간 동안 LOP사고의 주된 원인은 PRS 25.2%, Computer 16.3%, Power 14.4%, Thrusters 11.8% 및 Electrical 11.4% 등의 순으로 나타났으며 이들 5가지 원인을 모두 더하면 79.1%가 된다[10].

이러한 결과는 앞서 Fig. 13에서 확인된 10년 평균과 비교했을 때 DP선박 LOP사고의 주된 5가지 사고원인은 동일하지만, 그 순위에 있어서 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 PRS는 여전히 DP선박 LOP사고의 가장 주된 사고 원인임을 알 수 있다[10].

주목할 점은 초기 5년(01~05)과 후기 5년(06~10) 사이의 사고보고를 자세히 분석하여 확인한 결과, 초기 5년과 후기 5년 사이의 DP선박 LOP사고의 종류 및 원인이 98% 일치한다는 사실이다. 이는 DP선박 LOP사고가 비슷한 원인에 의해 반복적으로 발생한다는 것을 의미한다. 즉, 본 논문에서 분석을 위해 사용된 IMCA의 사고보고서가 전 세계의 DP선박 LOP사고를 모두 포함하는 것은 아니지만 사고의 종류 및 원인이 반복된다는 것은 다른 보고되지 않은 DP선박 LOP사고도 이 범주 내에서 발생하고 있음을 유추할 수 있다.

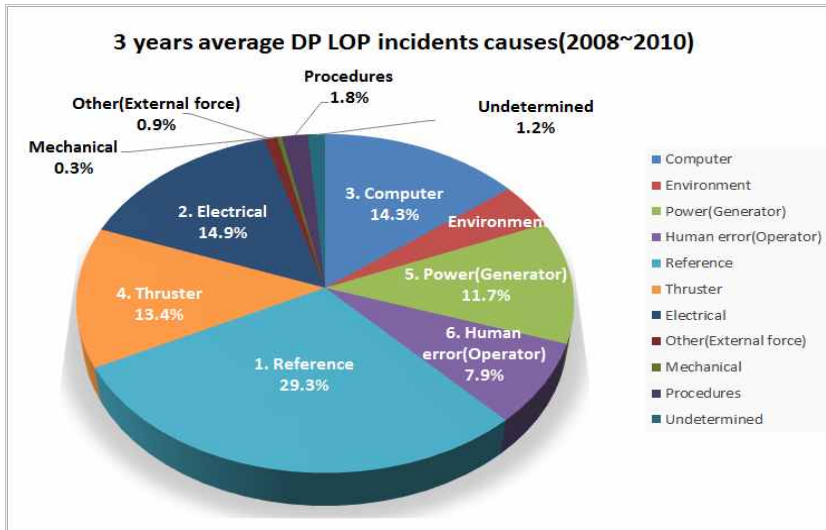


Fig. 16 3 Years average of DP LOP incident causes

Fig. 16은 2008~2010(3년) 동안의 DP선박 LOP사고의 주요 원인을 보여주고 있다. 분석 결과에 따르면 이 기간 동안 LOP사고의 주된 원인은 PRS 29.3% , Electrical 14.9%, Computer 14.9%, Thrusters 13.4% 및 Power 11.7% 등의 순으로 나타났으며 5가지 원인을 모두 더하면 84.2%가 된다[10]. 여기서도 PRS가 여전히 가장 주된 사고 원인임을 알 수 있다.

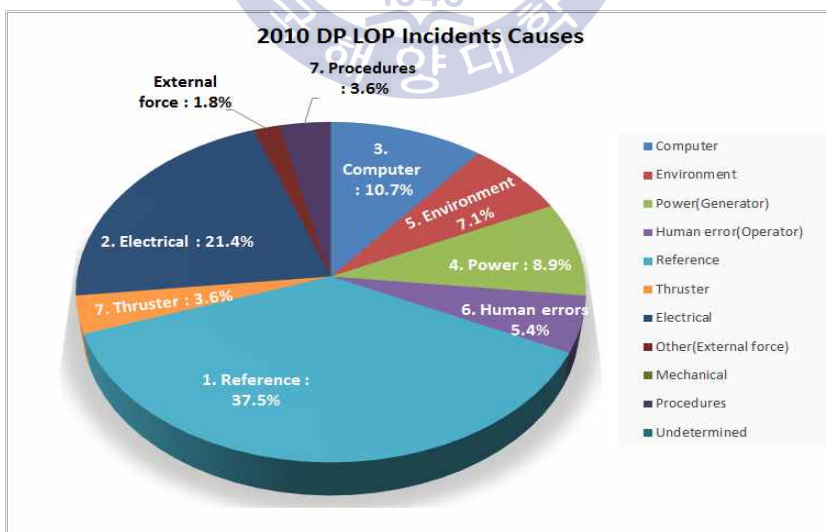


Fig. 17 2010 average of DP LOP incidents causes

Fig. 17은 2010년 동안의 DP선박 LOP사고의 주요 원인을 보여주고 있다. 분석 결과에 따르면 이 기간 동안 LOP사고의 주된 원인은 PRS 37.5%, Electrical 21.4%, Computer 10.7%, Power 8.9% 및 Thrusters 3.6% 등의 순으로 나타났다. 이들 5가지 원인을 모두 더하면 82.1%이고, 여전히 PRS가 가장 주된 사고원인임을 확인할 수 있다.

DP선박 LOP사고의 원인을 분석한 결과를 정리하면 Table 12와 같다[10]. 주목할 점은 각 분류에서 PRS가 항상 가장 주된 원인으로 작용하고 있다는 것이다. 물론 PRS가 2001년 3위, 2003년 5위, 2005년 3위, 2007년 2위로 그 순위의 변동은 있었지만 10년 평균을 보면 PRS가 주된 LOP사고의 원인이다. 아울러 이러한 특징은 Hauff(2014)에 의한 선행연구에서도 확인할 수 있는 사항이었다 [56].

Table 12 5 Categorization of average DP LOP incidents[10]

Ranks	10 years average (2001~2010)	5 years average (2001~2005)	5 years average (2006~2010)	3 years average (2008~2010)	1 year (2010)
1	PRS	PRS	PRS	PRS	PRS
2	DP Computer	Thrusters	DP computer	Electrical	Electrical
3	Power system	Power system	Power system	DP computer	DP computer
4	Human error	DP Computer	Thrusters	Thrusters	Power system
5	Thrusters	Human error	Electrical	Power system	Environment
Sum	81.2%	88.3%	79.1%	84.2%	82.1%

2) PRS 상세분석

612건의 DP선박 LOP사고에서 PRS 및 센서(Gyro, MRU 및 Wind sensor)와 관련된 사고는 137건이었다. 이 중 Tensioner²⁾에 의한 사고 1건과 Riser Angle Sensor³⁾에 의한 사고 2건은 DPS에서 일반적으로 PRS 또는 센서에 포함시키지 않으며 Gyro, VRS 및 Wind 센서도 PRS로 간주하지 않기 때문에 이와 관련된

2) Cable laying 선박이나 Pipe laying 선박에서 cable 또는 pipe를 hold하여 선미로 서서히 내려주는 장치를 말함

3) 해저 drilling pipe의 각도를 측정하는 센서

DP선박 LOP사고 17건을 제외하면 총 117건이 DP선박 LOP사고에서 PRS가 원인이 되었던 사고들이다. 이들 117건의 PRS관련 사고를 종류별로 분류하여 어떤 PRS장치에서 오류가 주로 발생하는지를 확인해 보았다[10].

선박에서 가장 보편적으로 많이 사용되는 PRS는 DGPS이다. 그러나 DP선박에서는 DGPS만 전적으로 의지하여 본선의 위치를 확인하지 않는다. 이는 DGPS 자체의 고장 및 신호오류 가능성 때문이며 이에 대비하여 DP선박에서는 운용중 여러 종류의 PRS를 동시에 사용하도록 요구한다[8][16]. 이처럼 DP선박의 PRS에는 가장 보편적으로 사용되는 DGPS를 포함하여 Microwave Systems⁴⁾, Laser Reference⁵⁾, Taut-wire⁶⁾, HPR⁷⁾ 및 DARPS⁸⁾ 등의 장비가 사용되고 있다. DP선박 LOP사고에서 117건의 PRS관련 사고를 종류별로 분류하여 분석한 결과를 Table 13과 Fig. 18에 제시하였다.

Table 13 Number of failures of each PRS(2001~2010)[10]

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Sum
DGPS	7	4	1	5	2	4	9	16	7	10	65
DARPS	3	1	0	2	0	1	0	0	0	0	7
Microwave reference	1	5	0	1	0	1	1	3	5	4	21
HPR	0	0	1	3	0	0	0	2	4	5	15
Laser	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3
Taut-wire	1	1	0	0	1	0	3	0	0	0	6
Total	12	11	2	11	3	6	13	22	17	20	117

Table 13을 보면 6가지 PRS 중 DGPS가 65건으로 가장 많은 사고의 원인으로 작용하였으며, 다음으로 HPR이 21건으로 LOP사고에 많은 영향을 미치고 있음

- 4) 선박에 설치된 interrogator와 물표에 설치된 transponder 사이에 전파를 주고받으며 방위와 거리를 측정할 수 있는 위치참조시스템
- 5) 레이저를 이용하여 상대 거리와 방위를 측정할 수 있는 위치참조시스템
- 6) 해저에 내려진 wire의 각도와 길이 변화를 측정하여 위치를 확인할 수 있는 위치참조시스템
- 7) Hydro-acoustic Position Reference, 음파를 이용하여 본선의 transducer와 해저에 설치된 transponder 사이의 거리와 방위를 측정하는 위치참조시스템
- 8) DARPS(Differential Absolute and Relative Positioning Sensor) : GPS에 의한 두 선박의 위치를 UHF link로 상호 주고 받아 두 선박 사이의 거리를 확인하고 일정 간격을 유지하도록 지원하는 시스템을 말함

을 알 수 있다. 이를 비율로 나타내면 Fig. 18과 같다. 이를 보면 10년간 DP선박 LOP사고에서 가장 큰 사고 원인으로 작용하였던 PRS는 DGPS 61.5%이고, 다음으로 Artemis 17.9%, HPR 12.8%, Taut-wire 5.1% 및 Laser sensor 2.6% 등으로 확인되었다.

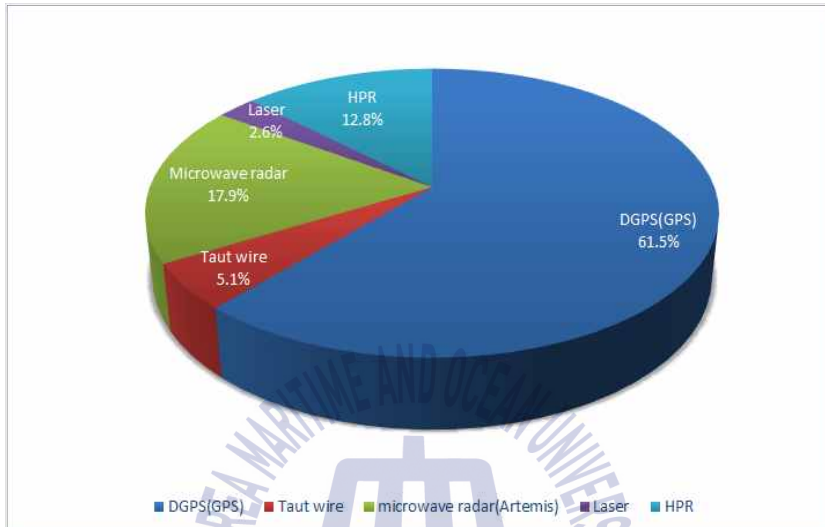


Fig. 18 LOP incidents ratio depend on PRS types(2001~2010)[8]

DGPS가 가장 높은 비율을 나타내는 이유는 모든 DP선박에서 DGPS는 가장 기본적으로 설치되는 장치이기 때문이라 할 수 있다. 즉, LOP사고가 발생한 선박에서 DGPS를 제외한 Artemis, HPR, DARPS, Taut-wire 및 Laser Reference 시스템 등을 모두 설치하고 있는 것이 아니기 때문에 빈도 측면에서 DGPS가 많이 발생하는 것처럼 보이는 것이라 할 수 있다.

이 부분을 PRS 장치의 설치여부에 따른 비율로 나타내기 위해 117건의 사고 보고를 바탕으로 LOP사고가 발생한 선박에 설치된 PRS의 종류를 확인하였다. 이를 바탕으로 수식 (3.1)과 같이 PRS 종류별 사고횟수를 PRS가 설치된 선박의 척수로 나누어 그 비율을 구하였으며, 이를 Table 14에 제시하였다.

$$PRS \text{ 종류별 사고 비율} = \frac{\text{종류별 PRS 사고 횟수}}{\text{종류별 PRS가 설치된 선박의 수}} \times 100 \quad (3.1)$$

Table 14 Adjusted frequency of PRS failure(2001~2010)

PRSs	PRS failures	Original failure frequency(%)	PRS installed	Adjusted failure frequency(%)
DGPS/DGNSS	65	55.6	117	55.6
Microwave system	21	17.9	34	61.8
HPR	15	12.8	52	28.8
Taut-wire	6	5.1	19	31.6
Laser reference	3	2.6	22	13.6
DARPS	7	6.0	17	41.2
	117	100.0		

Table 14에서 보는 것처럼 PRS관련 DP선박 LOP사고의 횟수는 DGPS에 의한 사고가 가장 많으나 설치된 PRS의 종류별로 보면 Microwave Systems(Artemis, RADIUS 등)에 의한 사고가 비율적으로 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 DP선박 LOP사고는 주로 전파를 이용하는 PRS(Microwave, DGPS, DARPS 등) 장치에 의해 발생하는 것을 확인할 수 있다.

3) 인적오류 상세분석

3.3.1의 Table 11에서 확인된 바와 같이 DP선박 LOP사고의 원인에 대한 인적 오류의 비율은 11.8%로 5번째의 주된 원인이었으며 일반적인 상선의 인적오류 비율보다 비교적 낮게 나타났다. 그러나 인적오류와 관련된 DP선박 LOP사고 보고서에서는 1차적 사고원인이 인적오류가 아니었다더라도 문제발생 이후 운영자의 지식부족, 실수 또는 적절한 대응을 위한 조직상의 배치가 적절치 못하여 2차적 사고원인으로 인적오류가 작용했던 것을 확인할 수 있으며, 이러한 부분을 포함하면 10년 평균 16.8%가 인적오류와 직, 간접적으로 연관되어 LOP사고가 발생하였음을 알 수 있었다.

또한 10년(2001~2010) 동안 IMCA에 보고된 전체 DP선박 LOP사고 612건 모두를 상세히 분석하여 직접적인 인적오류 뿐만 아니라 간접적으로 인적오류가 연관되어 있는 경우를 모두 확인해본 결과 375건(61.2%)의 LOP사고가 인적오

류와 직, 간접적으로 연관되어 있음을 알 수 있었다. 이는 인적오류가 DP선박에서도 크게 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다. 이러한 사실은 Sorensen et al.(2014)의 연구에서 처럼 24건의 DP선박 사고에서 17건이 DPO의 부적절한 의사결정으로 사고가 확대되었다는 것에서도 확인할 수 있다[64]. Fig. 19는 612건의 DP선박 LOP사고에서 인적오류가 직, 간접적으로 연관되었던 사고의 비율을 나타내고 있다.

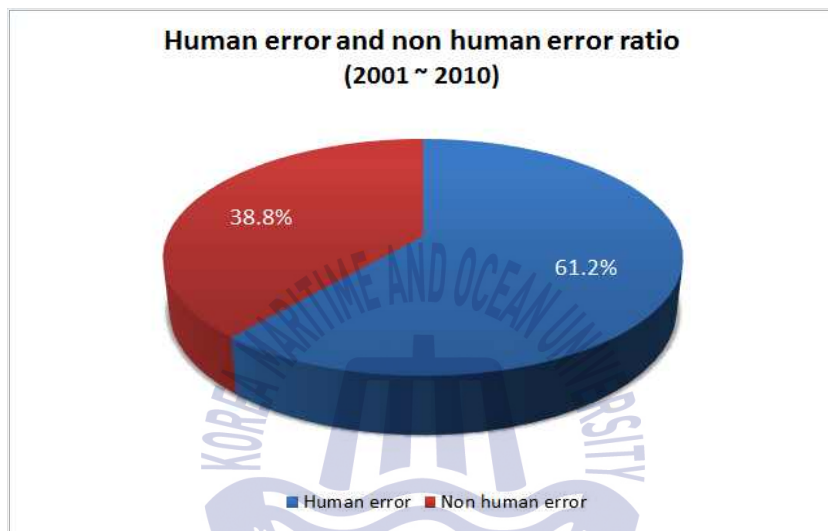


Fig. 19 Human error & non-human error incidents among 612 LOP incidents

3.4 소결론

본 장에서는 DP선박 LOP사고에 대한 이해를 돕기 위해 DPS의 구성요소와 DP선박의 등급에 대하여 설명하였다. 그리고 이를 바탕으로 DP선박 LOP사고의 주된 원인을 식별하기 위해 10년(2001~2010) 동안 IMCA에 보고된 DP선박 LOP사고 보고서를 정량적으로 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 10년 평균 DP선박 LOP사고에 주로 영향을 미친 사고의 원인들은 PRS 22.1%, DP Computer 16.2%, Power 15.9%, Thrusters 15.2% 및 Human errors 11.8% 등으로 확인되었다.

둘째, DP선박 LOP사고의 주된 사고원인을 5년, 3년 및 1년 기간별로 나누어 확인해 본 결과 PRS가 항상 주된 DP선박 LOP사고의 원인으로 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 더불어 초기 5년(2001~2005)과 후기 5년(2006~2010)에 발생한 DP선박 LOP사고의 종류 및 원인의 일치도를 확인해 본 결과 98%가 일치하였다.

셋째, 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고는 10년 평균 11.8%이며 이는 DP선박 LOP사고의 원인들 중 5번째로 높은 비율인 것으로 나타났다. 그러나 인적오류가 1차 및 2차적 원인으로 작용하여 DP선박 LOP사고가 발생한 경우까지 확인한 결과 16.8%가 인적오류와 관련되어 있음을 확인할 수 있었다.

넷째, 보고된 612건의 DP선박 LOP사고들을 모두 분석해본 결과 인적오류가 직, 간접적으로 LOP사고에 영향을 미친 경우가 375건(61.2%)임을 확인할 수 있었다. 이는 DP선박 LOP사고에서 인적오류가 겉으로는 낮게 나타나고 있지만, DP선박 LOP사고 발생시 이에 대한 대응과정에서 인적요인이 작용하고 있기 때문에 실제로는 상당히 큰 비중으로 DP선박 LOP사고에 연관되어 있음을 알 수 있었다.

본 장의 분석을 통해 DP선박 LOP사고의 원인으로는 다양한 하드웨어 및 인적요인이 작용하고 있으나, 주된 하드웨어는 장치는 PRS임을 확인하였다. 또한 인적오류가 직, 간접적으로 DP선박 LOP사고에 상당한 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

제4장 PRS 오류에 대한 FSA의 적용

4.1 서론

1장에서 언급하였듯이 FSA는 주로 여객선, 탱커선, 벌크선, 컨테이너선 및 액화가스선 등 상선에 적용되어 하드웨어 시스템의 추가설치(예 : ECDIS, AIS 레이다 통합시스템, Active Steering Gear Redundancy 설치 등), 신규교육의 시행(예 : 선교자원관리교육, ECDIS 시뮬레이터 교육) 및 신규절차의 도입(예 : Hot work 절차 및 훈련) 등이 권고되었다. 이러한 권고들은 대부분 IMO 국제협약을 통해 강제화되어 실제 선박에 적용 및 시행되고 있다. 이는 FSA가 선박의 안전한 운항을 위해 필요한 사항들을 결정하는데 있어 유용한 도구로 사용될 수 있음을 의미한다.

3장에서 수행된 DP선박 LOP사고의 원인분석 결과에 의하면 10년 평균 가장 주된 LOP사고 원인은 PRS 오류였다. 그 외의 하드웨어적 요소로 DP Computer, Thruster, Power 시스템 등이 있지만 이들 모든 원인에 대해 베이지안 네트워크를 적용한 FSA를 수행하기에는 자료가 방대하고 범위가 넓어 본 논문에서는 가장 주된 사고원인인 PRS 오류에 대한 FSA를 수행하고자 한다. PRS 오류에 대한 FSA 적용의 목적은 PRS 오류가 DP선박 LOP사고에 어느 정도의 확률로 영향을 미치는지 확인하고, 이를 바탕으로 DP선박 LOP사고를 예방하기 위한 RCOs를 도출한다. 이를 위한 FSA의 도구로는 브레인스토밍과 베이지안 네트워크를 이용한다.

4.2 FSA의 준비

4.2.1 FSA의 전제조건

DP선박에 대한 사고보고서는 IMCA의 자료가 거의 유일하고, 이 자료에는 DP선박 LOP사고의 인명피해, 충돌사고, 재산피해 등에 대해서는 언급이 없다.

따라서 본 논문에서는 기존에 IMO가 수행했던 FSA와 같이 인명피해, 재산손실 및 환경오염 등은 위험요소로 보지 않고 DP선박 LOP사고의 원인 및 사고의 종류별 심각성을 위험요소로 하여 FSA를 수행하도록 한다.

FSA를 수행함에 있어서 위험의 식별과 분석을 위한 도구로는 빈도분석 및 베이지안 네트워크를 사용하고, FMEA는 DP Class 2 이상의 선박에 적용되었던 사례 2건의 결과를 참조하도록 한다.

FSA의 수행에 앞서 DP선박 LOP사고의 종류는 심각성에 따라 Table 15와 같이 4가지로 구분하였다[64].

Table 15 4 Categorization of DP LOP incidents[63]

Type of Incidents	Definition
Drift off	본선의 동력이 상실되어 DP선박이 외력에 의해 밀려 원래의 위치에서 벗어나는 상태를 말하며, 보통 전체 Blackout, 부분 Blackout에 의한 Thruster 용량 부족에 의해 발생함
Drive off	본선이 가지고 있는 동력이 잘못된 위치 정보나 DPO의 잘못된 위치 입력에 의해 원하는 위치에서 벗어나게 되는 사례를 말함
Operation abort	LOP사고가 발생하지는 않았으나 DP운용이 중단됨
Time loss	LOP사고가 발생하지 않고, 운용중단도 발생하지 않았으나, DP등급이 낮아졌기 때문에 작업시간의 지연이 발생함

4.2.2 사용된 FSA 도구

1) 브레인스토밍

브레인스토밍은 저자를 포함하여 DPO 2명, DP선박 감독 1명, DPO 강사, 그리고 FMEA 전문가 1명 등 총 5명에 의해 2차례에 걸쳐 수행되었다. 브레인스토밍은 다양한 분야의 전문가들이 참여하도록 권고되고 있다. 그러나 본 연구에서는 DPS 설계자 및 제작관련 전문가를 국내에서 찾는데 한계가 있어 DP선박 감독과 DPO 강사를 전문가를 대신 참여시켜 주로 운용 측면에서 FSA를 수행하였음을 밝혀둔다. 브레인스토밍을 통해 결정된 사항은 다음과 같고 논의된

구체적 내용들은 부록에 첨부하였다.

가) PRS RCOs 식별과 우선순위의 결정

- 사전에 RCOs를 준비하여 적합성에 대한 동의를 구함(부록 참조)

나) PRS RCOs의 적용에 따른 위험감소량의 결정

2) 베이지안 네트워크

3장에서 분석한 DP선박 LOP사고 보고서는 전 세계에서 발생한 모든 DP선박의 LOP사고가 아니기 때문에 자료의 부족에 따른 신뢰성을 보완하기 위해 베이지안 네트워크를 활용하여 PRS 오류가 DP선박의 Drift off, Drive off, Time loss 및 Operation abort 등에 미치는 영향을 확인하도록 한다.

3장의 DP선박 LOP사고에 대한 원인별 분석결과에서 확인된 바와 같이 DP선박의 LOP사고는 동일한 원인에 의해 반복되고 있다. 베이지안 네트워크는 사전가능성 및 조건부 가능성을 파악할 수 있는 유용한 도구이므로, 이를 통해 특정기간 동안의 DP선박 LOP사고에 대한 정량적 분석을 수행하면 DP선박 LOP사고를 예방할 수 있는 효과적인 대책을 마련할 수 있을 것이다.

베이지안 네트워크의 적용을 위해 미국 피츠버그 대학에서 개발된 GeNIe 프로그램을 사용하였다[9]. GeNIe는 정성적 분석을 통해 만들어진 흐름도에 사고 관련 데이터를 접목하여 사전조건 및 조건부 가능성을 그래픽으로 보여주는 유용한 프로그램이다. 이 프로그램은 MS(Microsoft) 엑셀 파일 형태의 입력 데이터를 사용할 수 있기 때문에 DP선박 LOP사고 자료를 엑셀 파일로 작성하였다. 참고로 DP선박 LOP사고에서 사고의 원인 및 결과 사이에 서로 관련성이 있는 경우 “0”, 관련성이 없는 경우 “1”로 표시되며, 이렇게 작성된 엑셀 파일은 부록에 첨부되었다[10].

3) FMEA

FMEA는 시스템 오류에 따른 사고의 발생가능성(Probability of occurrence) 및 심각성(Severity)을 토대로 위험을 평가한다. DP Class 2 이상의 선박은 의무적

으로 FMEA를 수행하여야 하며, FMEA를 통해 DPS에 대한 위험도(Criticality)를 평가할 수 있다[24]. 따라서 DPO는 본선의 FMEA를 숙지하여 선박의 안전한 운용에 참조해야 한다. 본 연구에서는 DP선박 LOP사고의 주된 원인으로 작용하고 있는 PRS 오류를 FMEA에서 어떻게 분류하고 있는지 확인하기 위해 2건의 FMEA 사례를 참조하였다.

4.3 FSA의 수행

4.3.1 위험식별

1) 일반

앞서 언급한 바와 같이 DP선박 운용중 발생하는 LOP사고에는 Drift off, Drive off, Operation abort 및 Time loss 등이 있다[63]. 이 중에서 Drift off는 엔진 및 발전기의 고장으로 발생하는 것이고 PRS 오류로 발생하는 것이 아니기 때문에 FSA를 수행함에 있어서 PRS 오류에 따른 Drift off는 제외하였다.

2) LOP사고 빈도분석

(1) Risk Index

FSA에서 Risk는 사고의 발생가능성(Probability)과 피해의 정도(Consequence)를 서로 곱함으로써 평가된다. 이를 정량적으로 표시한 Index를 사용하여 나타내면 Risk Index(RI)는 Frequency Index(FI)와 Severity Index(SI)의 합으로 계산되고 다음과 같다.

$$\text{Risk} = \text{Frequency} \times \text{Consequence} \quad (4.1)$$

$$\text{Log(Risk)} = \text{Log(Frequency)} + \text{Log(Consequence)} \quad (4.2)$$

$$\text{Risk Index} = \text{Frequency Index} + \text{Severity Index} \quad (4.3)$$

Table 16 및 17은 RI를 구하기 위한 FI와 SI의 기준을 나타낸다. Table 16은 PRS 오류에 따른 LOP사고의 Severity Index(SI)를 보여준다. LOP사고는 Drive off, Operation abort 및 Time loss 등으로 나타나고 이를 Severity Index(SI)로 정량화한 것이다. Table 17은 PRS 오류에 따른 LOP사고의 Frequency Index(FI)를 나타낸다.

Table 16 Severity Index of LOP incidents

Severity Index (SI)			
SI	Severity	Effects on DP vessel	S (equivalent fatalities)
1	낮은 심각성 (Low severity)	충돌이 없으며 약간의 자본손실 있음, 부상자 및 환경손상 없음	시간손실 (time loss)
2	중간 심각성 (Medium severity)	충돌이 없으며 보통의 자본손실 있음, 부상자 및 환경손상 없음	DP선박 운용중단 (operation abort)
3	높은 심각성 (High severity)	충돌로 인한 화재 및 커다란 자본손실 가능성이 있음, 심각한 인명 부상 및 환경손상 가능성이 있음	위치이동 발생 (Drive off or drift off)

Table 17 Frequency Index of PRS error DP LOP incidents

Frequency Index			
FI	Frequency	Definition	F (per DP hour)
7	Frequent	1척의 DP선박에 1개월에 1회 발생	10^{-1}
6	Probable	1척의 DP선박에 1년에 1회 발생	10^{-2}
5	Reasonably probable	10척의 DP선박에서 1년에 1회 발생	10^{-3}
4	Unlikely	100척의 선박에 1년에 1회 발생	10^{-4}
3	Remote	1,000척의 선박에서 1년에 1회 발생	10^{-5}
2	Very remote	10,000척의 선박에서 1년에 1회 발생	10^{-6}
1	Extremely remote	전 세계 5,000척의 선박에서 20년에 1회 발생	10^{-7}

위의 기준을 바탕으로 Risk Index를 작성하면 Table 18과 같다.

Table 18 Risk Index of DP LOP incidents

Risk Index(RI) of PRS				
FI	Frequency	Severity Index(SI)		
		1	2	3
		Low (Time loss)	Medium (Operation abort)	High (Drive off)
7	Frequent	8	9	10
6	Probable	7	8	9
5	Reasonably probable	6	7	8
4	Unlikely	5	6	7
3	Remote	4	5	6
2	Very remote	3	4	5
1	Extremely remote	2	3	4

(2) 빈도분석

DP선박에 있어서 LOP사고의 빈도는 일정 기간 동안 발생한 LOP사고의 횟수를 동일한 기간 동안에 해당 DP선박이 위험에 노출된 기간(DP vessel year)으로 나누어 구할 수 있다. DP선박은 년중 항상 운항되는 것이 아니고, 또한 운항중 항상 DPS를 운용하는 것도 아니다. 따라서 1척의 DP선박이 년중 DPS를 운용하는 기간(DP vessel year)은, 년중 DP선박이 운항하는 기간을 70%, DPS가 운용되는 기간을 70%로 본다면, $365 \times 0.7 \times 0.7 = 178.85(\text{day})$ 로 계산된다[27].

2001년부터 2010년까지 10년 동안 실제 운항된 DP선박의 총 척수를 나타내는 자료가 없어서, Clarkson(2012) 및 KMI(2012) 보고서를 참고하여 추정하였다. 즉, KMI(2012) 보고서에 제시된 2011년 기준 DP선박의 총 척수 6,052척을 바탕으로 Clarkson(2012) 보고서에 제시된 연평균 성장률 9%를 역으로 적용하여 38,840척을 얻을 수 있었다.

10년간 운항된 DP선박의 총 척수 38,840척에 앞서 확인한 년중 1척의 DP선박이 위험에 노출된 기간 178.85(day)를 곱하면 10년간 DP선박이 위험에 노출

된 총 일수 6,946,534(day)가 계산된다. 이를 다시 365(day)로 나누면 19,302 DP vessel year를 구할 수 있다.

여기서 추정을 통해 10년 동안 DP선박의 총 척수를 계산하였으나, 이는 여러 Offshore market overview에 발표된 자료가 서로 다르고 연평균 성장률도 동일하게 적용할 수 없는 한계가 있었음을 밝혀둔다.

이상을 정리하면 다음과 같다.

가) 1척의 DP선박이 1년간 위험에 노출된 기간 : $365 \times 0.7 \times 0.7 = 178.85(\text{day})$

나) 전체 DP선박이 10년간 위험에 노출된 기간 : $38,840(\text{척}) \times 178.85(\text{day}) = 6,946,534(\text{day})$

다) 10년간 전체 DP선박의 DP vessel year : $6,946,534/365 = 19,032$

19,032 DP vessel year는 해당 위험노출 동안에 117건의 PRS 오류에 의한 DP선박 LOP사고가 발생하였음을 의미한다. DP선박 LOP사고에서 PRS와 관련된 Drive off, Operation abort 및 Time loss 발생 빈도를 계산하면 Table 19와 같다. PRS 오류로 인한 LOP사고 중에서 가장 높은 빈도를 보이는 것은 Time Loss이며, 그 다음으로 Drive off라는 것을 알 수 있다.

Table 19 Frequency of DP LOP incidents scenario caused by PRS

Incidents scenario	Numbers	Incidents frequency (per DP vessel hour)	F-Proportion
Drive off	43	2.26×10^{-3}	36.75%
Operation abort	10	5.25×10^{-4}	8.55%
Time loss	64	3.36×10^{-3}	54.70%
Total	117	6.15×10^{-3}	100%

Table 20은 Drive off, Operation abort 및 Time loss 등을 발생시킨 PRS 오류를 종류별로 분류하고 그 빈도를 계산한 것이다. 이를 바탕으로 Severity Index 및 Frequency Index를 적용하여 Table 21과 같은 Risk Index를 얻었다. 이를 보면 DGPS에 의한 Drive off(RI 8)가 가장 높은 위험도를 나타내고, 그 다음으로 Artemis에 의한 Drive off(RI 7), HPR에 의한 Drive off(RI 7) 등의 순서이다.

Table 20 Frequency of each PRS

Frequency of each PRS						
PRS	Drive off	Frequency	Operation abort	Frequency	Time loss	Frequency
DGPS	31	1.63^{-3}	4	2.10^{-4}	31	1.63^{-3}
Microwave system	2	1.05^{-4}	1	5.25^{-5}	18	9.46^{-4}
HPR	5	2.63^{-4}	3	1.58^{-4}	6	3.15^{-4}
Taut-wire	2	1.05^{-4}	2	1.05^{-4}	2	1.05^{-4}
Laser reference	1	5.25^{-5}	-	-	2	1.05^{-4}
DARPS	2	1.05^{-4}	-	-	5	2.63^{-4}
Total	43	2.26^{-3}	10	5.25^{-4}	64	3.36^{-3}

Fleet at risk : 19,032 DP vessel years

Table 21 Risk Index of each PRS for DP LOP incidents

Risk Index						
Types of PRS	Drive off (FI)	Operation abort (FI)	Time loss (FI)	RI = FI + SI		
				Drive off SI = 3	Operation abort SI = 2	Time loss SI = 1
DGPS	5	4	5	8	6	6
Microwave system	4	3	4	7	5	5
HPR	4	4	4	7	6	5
Taut-wire	4	4	4	7	6	5
Laser reference	3	-	4	6	-	5
DARPS	4	-	4	7	-	5

Fleet at risk : 19,032 DP vessel years

3) FMEA 사례

DP Class 2 이상의 선박에 적용되는 FMEA에서는 PRS 오류의 발생 가능성 및 심각도를 어떻게 분석하고 있는지 참조하기 위해 실제 사례를 확인하였다. 각 FMEA의 상세내용은 부록에 첨부하였다.

가) OSV Adams Challenge호의 FMEA에서는 PRS 오류의 발생 가능성을 낮음(Low), 심각성을 낮음(Minor)으로 분석하였으며[20],

나) OSV Relume호의 FMEA에서는 PRS 문제의 발생 가능성을 중간(Medium), 심각성을 낮음(Minor)으로 분석하였다[21].

FMEA에서는 DP Class 2 이상의 선박의 경우 PRS 오류에 의한 사고의 심각성이 비교적 낮은 것으로 확인된다. 그 이유는 DP Class 2 선박의 경우 IMO 및 선급 기준에 따라 기본적으로 3종류 이상의 PRS를 설치하고 있기 때문에 PRS 오류가 LOP사고로 연결될 가능성이 낮기 때문이다. 그러나 DP선박 LOP사고에는 DP Class 1도 포함되어 있기 때문에 이들의 PRS 오류에 의한 사고발생 가능성 및 심각성은 높다고 할 수 있다.

4.3.2 위험분석

1) 누적빈도 분석

(1) 누적빈도 및 F-N선도

FSA에서 사고의 위험도는 보통 2차원 F-N선도로 표현된다[51]. F-N선도에서 가로축의 “N”은 사고에 따른 사상자의 수를 나타내고, 세로축의 “F”는 그에 대한 누적빈도를 나타내며, 수용 불가능한 위험을 확인할 수 있는 도구이다[25].

본 논문의 DP선박 LOP사고 보고서에는 인명사고에 대한 자료가 없기 때문에 앞서 확인한 PRS 오류에 의한 Drive off, Operation abort 및 Time loss 등의 빈도를 가로축의 “N”으로, 그에 대한 누적빈도를 세로축의 “F”로 하였다.

이를 위해 Drive off, Operation abort 및 Time loss 등에 대한 LOP사고의 빈도

및 누적빈도를 Table 22~24와 같이 계산하였다.

Table 22 Cumulative frequency of drive off

Cumulative frequency of Drive off			
Types of PRS	Drive off	Frequency (per DP vessel year)	Cumulative Frequency (per DP vessel year)
DGPS	31	1.63^{-3}	1.63^{-3}
HPR	5	2.63^{-4}	1.89^{-3}
Microwave system	2	1.05^{-4}	2.00^{-3}
Taut-wire	2	1.05^{-4}	2.10^{-3}
DARPS	2	1.05^{-4}	2.21^{-3}
Laser reference	1	5.25^{-4}	2.26^{-3}
Total	43	2.26^{-3}	
Fleet at risk : 19,032 DP vessel years			

Table 23 Cumulative frequency of operation abort

Cumulative frequency Operation abort			
Types of PRS	Operation abort	Frequency (per DP vessel year)	Cumulative Frequency (per DP vessel year)
DGPS	4	2.10^{-4}	2.10^{-4}
HPR	3	1.58^{-4}	3.68^{-4}
Taut-wire	2	1.05^{-4}	4.73^{-4}
Microwave system	1	5.25^{-5}	5.25^{-4}
Total	10	5.25^{-4}	
Fleet at risk : 19,032 DP vessel years			

Table 24 Cumulative frequency of time loss

Cumulative frequency Time loss			
Types of PRS	Time loss	Frequency (DP vessel year)	Cumulative Frequency (DP vessel year)
DGPS	31	1.63^{-3}	1.63^{-3}
Microwave system	18	9.46^{-4}	2.57^{-3}
HPR	6	3.15^{-4}	2.89^{-3}
DARPS	5	2.63^{-4}	3.15^{-3}
Taut-wire	2	1.05^{-4}	3.26^{-3}
Laser reference	2	1.05^{-4}	3.36^{-3}
Total	64	3.36^{-3}	
Fleet at risk : 19,032 DP vessel years			

Table 22~24에서 확인된 Drive off, Operation abort 및 Time loss 등에 대한 누적빈도를 바탕으로 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)를 적용하여 F-N 선도를 작성한 것이 Fig. 20이다. 일반적으로 Intolerable은 비용에 상관없이 위험도를 감소시켜야하는 영역이고, Tolerable if ALARP은 합리적으로 실행 가능한 위험도를 감소시켜야 하는 영역이며, Broadly Acceptable은 별다른 조치가 없이 수용이 가능한 영역이다.

ALARP의 경계는 그 허용기준에 대하여 산업계 별로 연구된 바가 있다[40]. 그러나 DP선박의 운용에 대한 사회적 위험도와 개인위험도에 대한 허용기준은 없고, 이를 산출 하는 것은 매우 어렵다. 아울러 본 논문에서 분석된 DP선박의 LOP사고는 사망자, 재산손실 및 환경피해 등의 자료를 포함하고 있지 않아 사회적 위험도나 개인위험도를 바로 적용하는 데 한계가 있다.

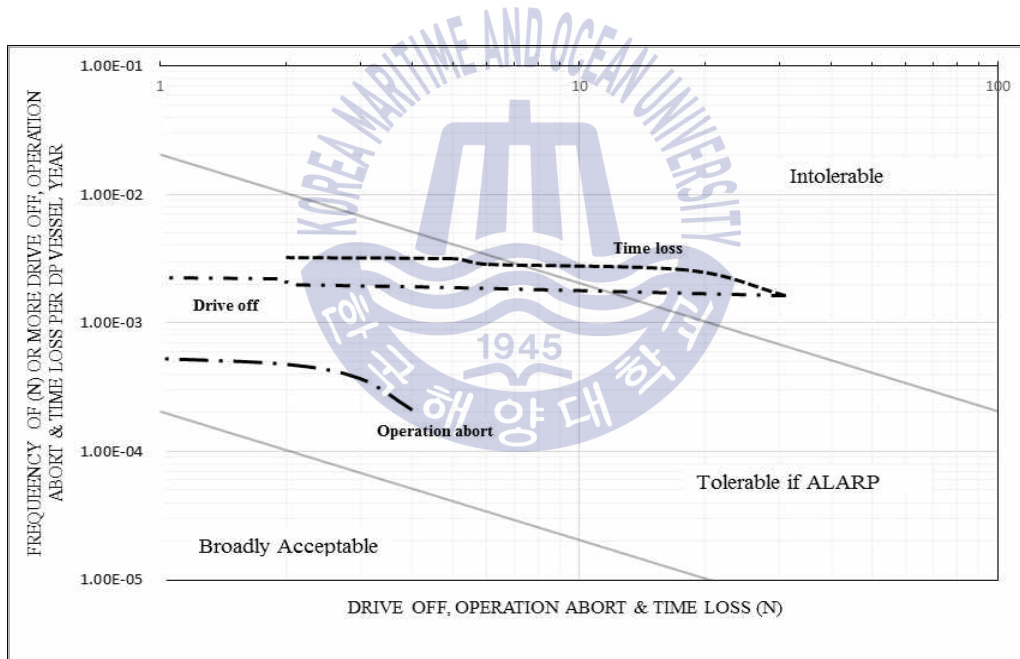


Fig. 20 F-N Curve of Drive off, Operation abort and Time loss[1][46]

F-N선도에서 ALARP의 경계는 Drive off, Operation abort 및 Time loss 빈도에 대한 평균값을 임의로 적용하였는데, 이 부분은 추후 관련 연구를 통해 합리적인 기준이 마련되어야 할 필요가 있다.

한편, FSA 지침에 의하면 누적빈도의 10배를 Intolerable과 ALARP의 경계로,

누적빈도의 -10배를 ALARP와 Broadly Acceptable의 경계로 보고 있기 때문에 이를 적용하여 Fig. 20과 같이 나타내었다[1][46]. 여기서 보면 Drive off 및 Time loss의 일부가 ALARP 범위를 넘어가는 부분이 있음을 확인할 수 있다.

그러나 Fig. 20의 ALARP 경계는 사회적 수용기준을 나타내는 것은 아니기 때문에 ALARP를 넘어가는 부분에 대하여 비용과 상관없이 반드시 위험도를 감소시켜야 하는 것은 아니며, 합리적인 방법으로 PRS 오류에 의한 LOP사고 위험을 감소시켜야 할 것으로 생각된다.

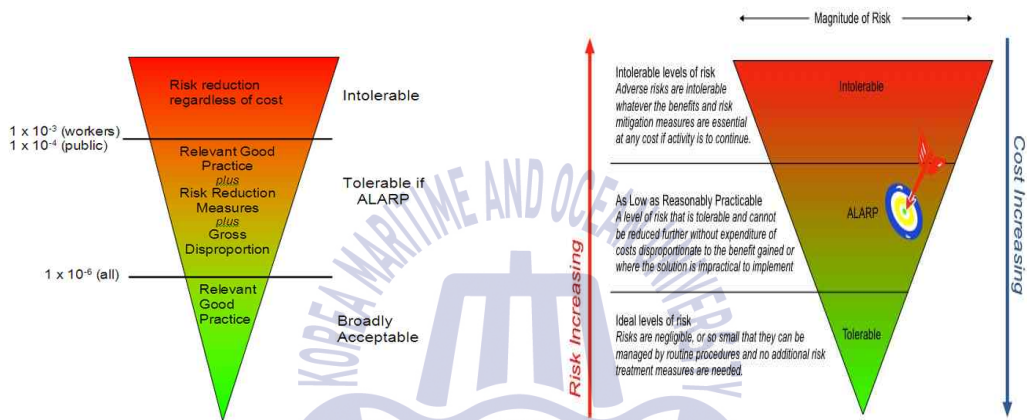


Fig. 21 ALARP Concept[22][51][52]

Fig. 21은 ALARP의 개념도를 보여준다. 여기서 보는 바와 같이 ALARP는 위로 갈수록 위험이 증가하고 아래로 갈수록 비용이 증가한다. IMO에서 수행된 FSA 결과에 따르면 해운분야 대부분의 위험들은 수용 가능한 범위 내에 있기 때문에 위험성을 바탕으로 한 의사결정에는 비용편익평가를 통해 ALARP를 적용하도록 권고하고 있다[52].

F-N선도에서 수용불가 부분은 과거 10년 동안의 누적빈도에서 특정 PRS가 다른 PRS에 비해 높은 빈도를 보인다는 것을 의미하는 것이기 때문에 이러한 누적 빈도에 의한 F-N선도를 바탕으로 ALARP 개념을 적용하여 위험성을 감소시키기 위한 조치를 취할 필요가 있다.

(2) 위험제어가 필요한 영역

Table 21의 PRS별 Risk Index 및 Fig. 20의 F-N선도를 바탕으로 PRS 오류에 의한 LOP사고의 위험 제어가 필요한 부분을 RI 순으로 다음과 같이 식별하였다. 가장 큰 RI를 나타낸 것은 DGPS 오류에 의한 Drive off이다. 이는 빈도측면에서도 PRS 오류에 의한 Drive off의 발생 가능성이 높음을 의미한다.

Table 25 Drive off, Operation abort & Time loss Risks caused by PRS

No.	Risks	RI
1	DGPS 문제에 의한 Drive off	8
2	HPR 문제에 의한 Drive off	7
3	Artemis 문제에 의한 Drive off	7
4	Taut-wire 문제에 의한 Drive off	7
5	DARPS 문제에 의한 Drive off	7
6	Laser reference 문제에 의한 Drive off	6
7	DGPS 문제에 의한 Operation abort	6
8	DGPS에 의한 Time loss	6
9	HPR에 의한 Operation abort	6
10	Taut-wire에 의한 Operation abort	6
11	Microwave system에 의한 Operation abort	5
12	Microwave system에 의한 Time loss	5
13	HPR에 의한 Time loss	5
14	Laser reference에 의한 Time loss	5
15	DARPS에 의한 Time loss	5
16	Taut-wire에 의한 Time loss	5

2) 베이지안 네트워크 분석

(1) PRS 오류 흐름도 작성

DP선박 LOP사고 보고서에 대한 분석을 바탕으로 Fig. 22와 같이 LOP사고의 종류, PRS 종류 및 PRS 오류 종류와의 상호 관계에 대한 흐름도를 GeNIe에서 작성하였다. 이는 PRS 오류에 의한 사고 117건을 분석하여 DP선박에 사용된 6 종류의 PRS 및 10종류의 PRS 오류 원인을 식별한 후 이들의 Drive off, Operation abort 및 Time loss 사건과의 연관성에 대한 흐름도를 나타낸다.

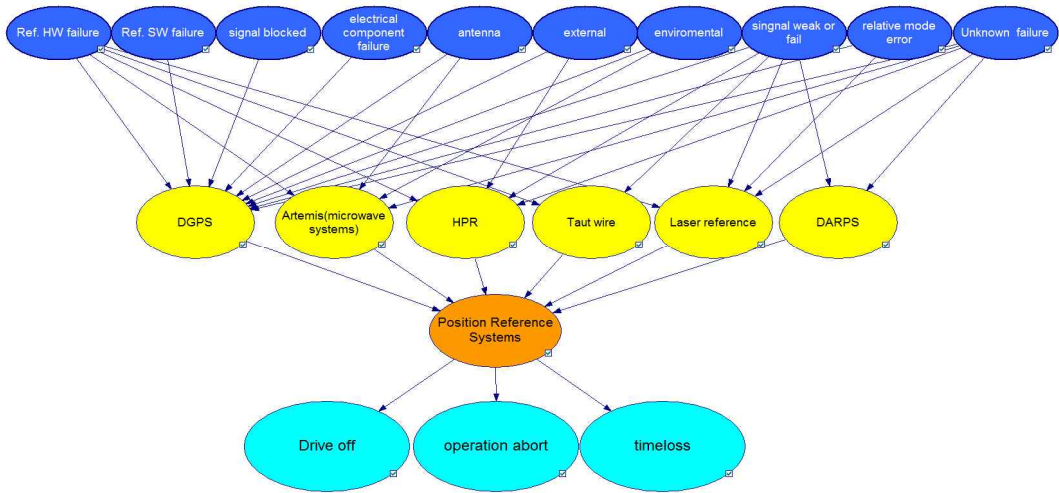


Fig. 22 Interrelation flowchart of PRSs LOP incidents

Fig. 22 흐름도에 사용된 노드는 그 부모(Parents)의 조건에 따라 분석되는데 이를 NPT라고 하며, 이것의 역할은 앞서 2장에서 설명하였다.

Fig. 22의 흐름도를 보면 각 원인과의 상호관계는 확인할 수 있지만 어떤 항목이 어떻게 영향을 미치는지에 대해서는 알 수 없다. 따라서 Fig. 22를 바탕으로 베이지안 네트워크를 사용하여 117건의 PRS 오류에 의한 LOP사고의 사전가능성을 확인한다.

이를 위해 117건의 PRS 관련 LOP사고를 MS 엑셀로 고장여부에 따라 분류하였고, 작성된 파일을 GeNIe에서 실행하여 Fig. 23와 같은 DP선박 LOP사고의 사전가능성을 확인하였다.

그 결과 PRS 오류에 의한 LOP사고의 가능성은 Time loss 48%, Drive off 41%, Operation abort 14%로 나타났다. 이는 앞서 빈도 분석의 결과와 동일하다. 더불어 PRS는 DGPS가 오류가 54%로 가장 높게 나타났으며, 그 원인으로는 신호가 약하거나 끊기는 경우가 21%의 확률로 나타났으며, PRS 장비의 하드웨어적인 문제 발생이 19%확률이 있음을 확인하였다.

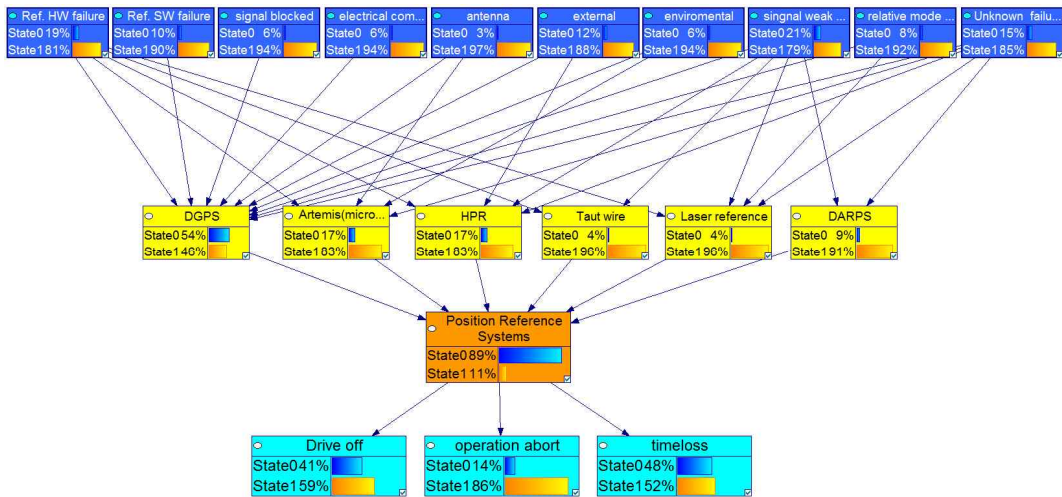


Fig. 23 Prior Probability of PRS errors and LOP incidents

GeNIe를 이용하여 Drive off, Operation abort 및 Time loss와 관련하여 민감도를 Fig. 24와 같이 확인해 보면 가장 민감하게 작용하는 PRS는 Taut-wire이며, 그 원인으로는 신호불량과 PRS의 하드웨어적인 문제가 가장 민감하게 작용하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

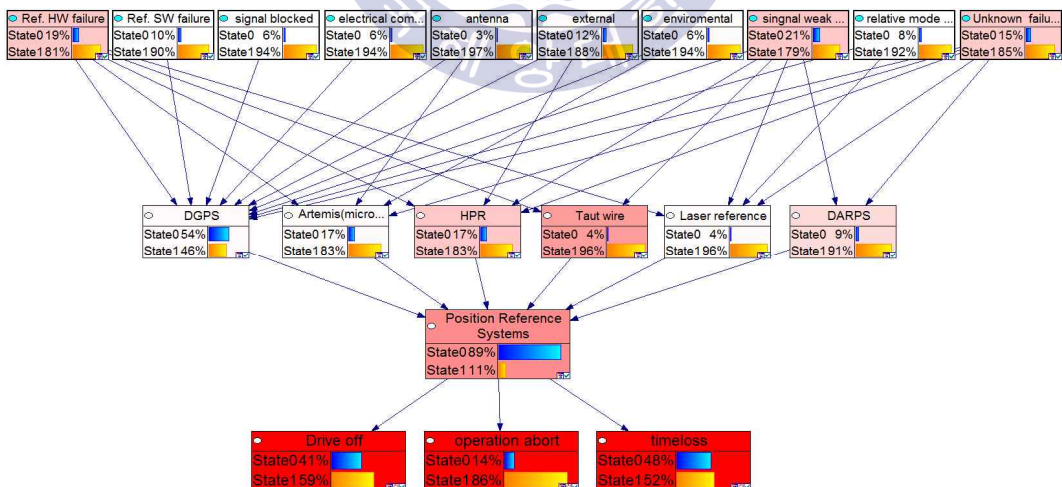


Fig. 24 Sensitivity of Drive off, Operation abort and Time loss

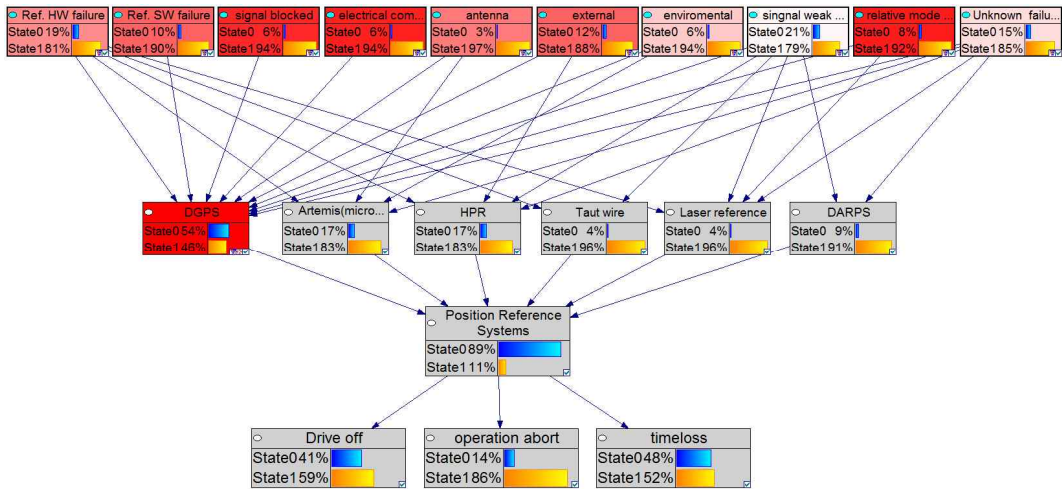


Fig. 25 Sensitivity of DGPS

가장 오류빈도가 높게 나타난 DGPS에 대한 원인별 민감도를 Fig. 25와 같이 확인해 본 결과 DPGS 에러는 신호 막힘, 전기적 문제 및 상대방위 모드사용이 가장 민감하게 작용하고 있다는 것을 확인 할 수 있다.

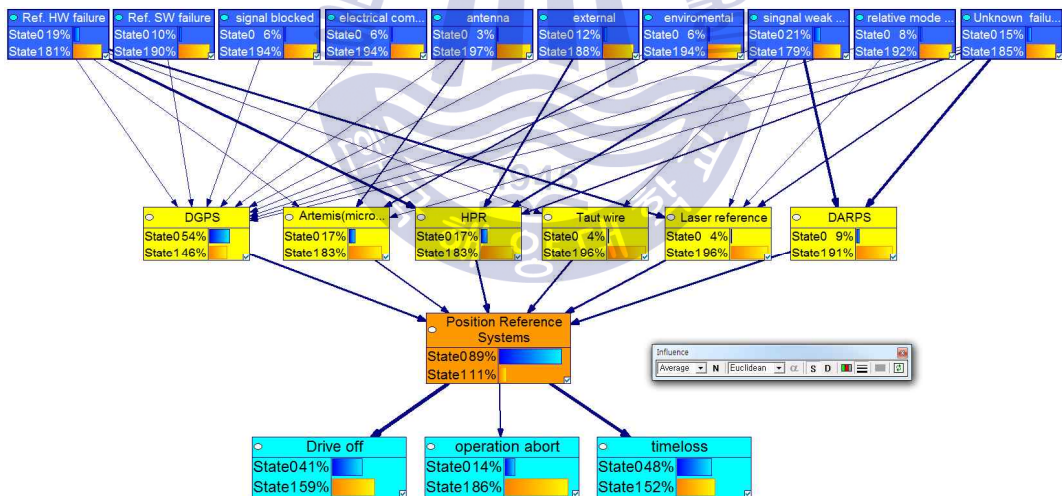


Fig. 26 Strength of influence to LOP incidents by PRS

Fig. 26은 각 원인별 영향의 강도(Strength of influence)를 보여주는 것으로 LOP사고에 어떠한 오류들이 강하게 영향을 미치고 있는지 나타내고 있다. 이를 보면 LOP사고는 PRS의 소프트웨어 고장, 하드웨어 고장 및 PRS 신호 미약이 Drive off와 Time loss에 큰 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있다.

(2) 위험에 대한 조건부 가능성

Fig. 27과 Fig. 28은 Drive off 발생 가능성을 100%로 설정(이를 조건부 가능성, Conditional probability)했을 때 그 원인들의 발생 확률을 나타낸 것이다. 이에 따르면 Drive off에 DGPS는 약 57% 확률로 작용하고 HPR은 31.7%, Artemis는 19.6%의 확률로 작용하는 것으로 나타났다. 그리고 PRS 오류의 주된 원인은 신호가 약하거나 수신되지 않는 경우가 28.2%의 확률로 작용하였고, PRS의 하드웨어적 오류 25.0%, 본선주위 다른 선박이나 구조물에 의한 영향 12.3% 등으로 작용한다는 것을 확인 할 수 있다.

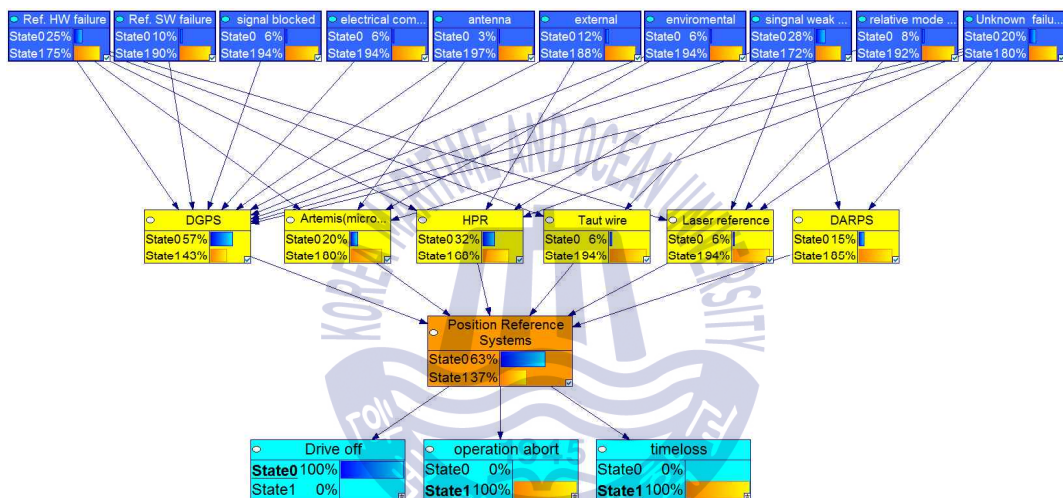


Fig. 27 Drive off conditional probability

Ranked Targets	Probability
Drive off:State0	1.00000
DGPS:State0	0.57003
HPR:State0	0.31692
Artemis(microwave systems):Stat...	0.19597
DARPS:State0	0.14962
Taut wire:State0	0.06400
electrical component failure:State0	0.05945
Laser reference:State0	0.05915

Ranked Targets	Probability
Drive off:State0	1.00000
signal weak or fail:State0	0.28208
Ref. HW failure:State0	0.24953
Unknown failure:State0	0.20262
external:State0	0.12285
Ref. SW failure:State0	0.10349
relative mode error:State0	0.07734
enviromental:State0	0.06064
electrical component failure:State0	0.05945
signal blocked:State0	0.05921
antenna:State0	0.03498

Fig. 28 Drive off conditional probabilities & error probability

Fig. 29와 Fig. 30은 Operation abort에 대한 조건부 가능성을 나타낸 것이다. Operation abort LOP사고에서도 DGPS가 약 52%로 가장 높은 확률로 작용하고 있다는 것을 알 수 있고, Artemis는 15.7%, HPR은 11.2%의 확률로 작용한다는 것을 알 수 있다. 그리고 PRS 오류의 주된 원인은 신호가 약하거나 수신되지 않는 경우가 18.4%, PRS의 하드웨어적인 오류가 16.2%, 본선주위 다른 선박이나 구조물에 의한 영향이 11.8%의 확률로 작용하였다는 것을 확인할 수 있다.

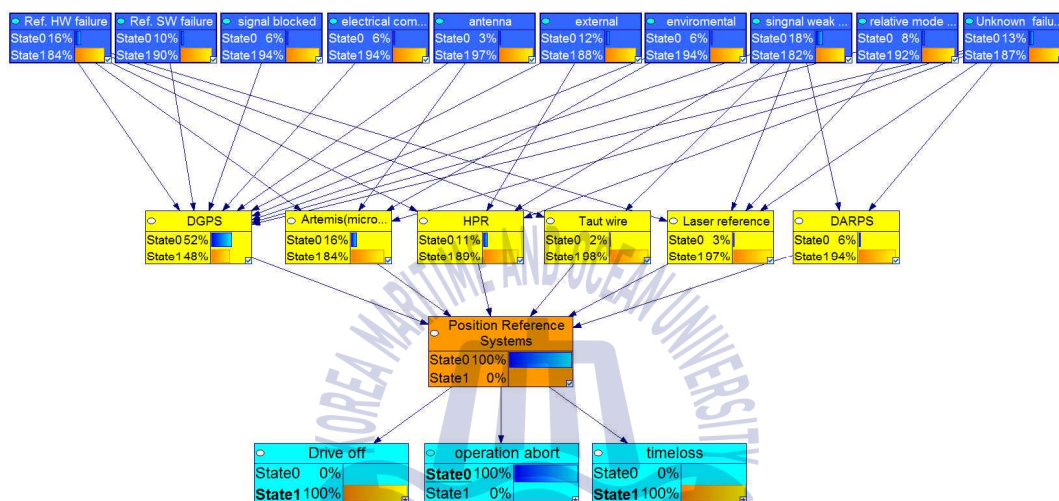


Fig. 29 Operation abort conditional probability

Ranked Targets	Probability	
operation abort:State0	1.00000	
DGPS:State0	0.52000	
Artemis(microwave systems):State0	0.15699	
HPR:State0	0.11184	
DARPS:State0	0.05837	
Laser reference:State0	0.03104	
Taut wire:State0	0.02428	

Ranked Targets	Probability	
operation abort:State0	1.00000	
signal weak or fail:State0	0.18381	
Ref. HW failure:State0	0.16171	
Unknown failure:State0	0.13274	
external:State0	0.11810	
Ref. SW failure:State0	0.10247	
relative mode error:State0	0.07663	
electrical component failure:State0	0.06009	
signal blocked:State0	0.06001	
enviromental:State0	0.05948	
antenna:State0	0.03379	

Fig. 30 Operation abort conditional probabilities & error probability

Fig. 31과 Fig. 32는 Time loss에 대한 조건부 가능성을 나타낸 것이다. Time

loss에서도 DGPS가 52%로 가장 높은 확률로 작용하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 PRS 오류의 주된 원인은 신호불량 또는 상실이 18.4%, PRS의 하드웨어적인 오류가 16.7%의 확률로 작용하고 있음을 알 수 있다.

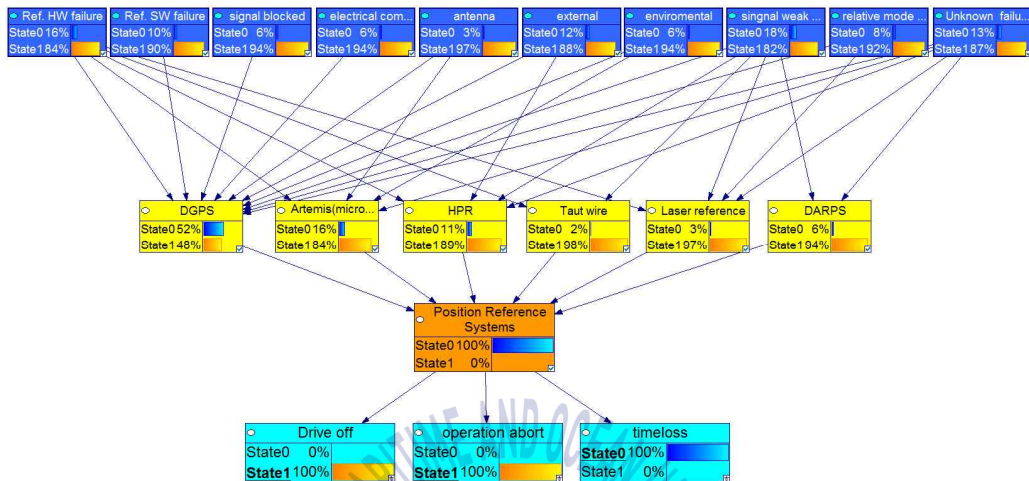


Fig. 31 Time loss conditional probability

Ranked Targets	Probability	Ranked Targets	Probability
timeloss:State0	1.00000	timeloss:State0	1.00000
DGPS:State0	0.52000	signal weak or fail:State0	0.18381
Artemis(microwave systems):State0	0.15639	Ref. HW failure:State0	0.16171
HPR:State0	0.11184	Unknown failure:State0	0.13274
DARPS:State0	0.05837	external:State0	0.11810
Laser reference:State0	0.03104	Ref. SW failure:State0	0.10247
Taut wire:State0	0.02428	relative mode error:State0	0.07663
		electrical component failure:State0	0.06009
		signal blocked:State0	0.06001
		enviromental:State0	0.05948
		antenna:State0	0.03379

Fig. 32 Time loss conditional probabilities & error probability

GeNIe 프로그램을 활용한 베이지안 네트워크를 통해 LOP사고에 대한 조건부 가능성을 확인해 본 결과 주된 LOP사고의 원인들은 DGPS, HPR 및 Artemis의 하드웨어 및 신호 에러에 의한 Drive off, Operation abort, Time loss라는 것을 알 수 있었다. 이는 앞서 시행한 빈도분석을 통한 결과와도 일치한다.

(3) 주변확률 분포(Marginal probability distribution)

주변확률 분포는 어떤 하나의 사건이 일어날 단순 확률로 이 사건이 일어나기 위한 아무 조건이 붙지 않는 확률을 말한다. GeNIe를 통해 PRS 종류별 주변확률 분포를 확인한 결과 다음과 같이 나타났다.

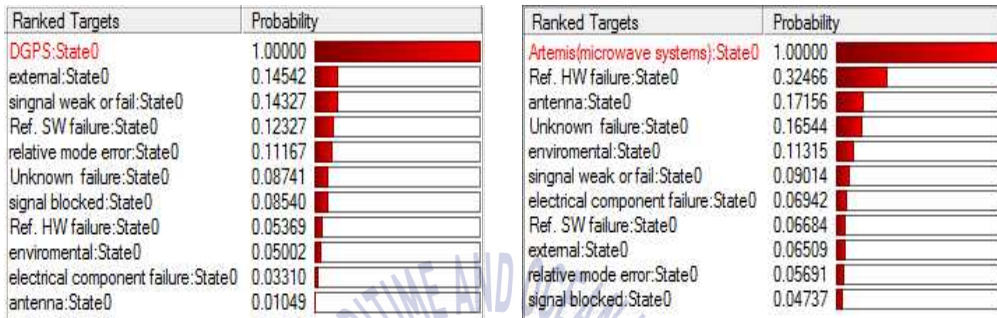


Fig. 33 Marginal probability distribution of DGPS & Artemis

Fig. 33을 보면 DGPS는 외부 장애물에 의한 오류, 신호가 약하거나 수신되지 않는 것, 소프트웨어 오류, 상대모드 설정 오류가 많이 발생한다는 것을 알 수 있다. Artemis는 하드웨어 고장, 안테나, 외부 환경영향에 의한 문제가 많이 발생하였다.

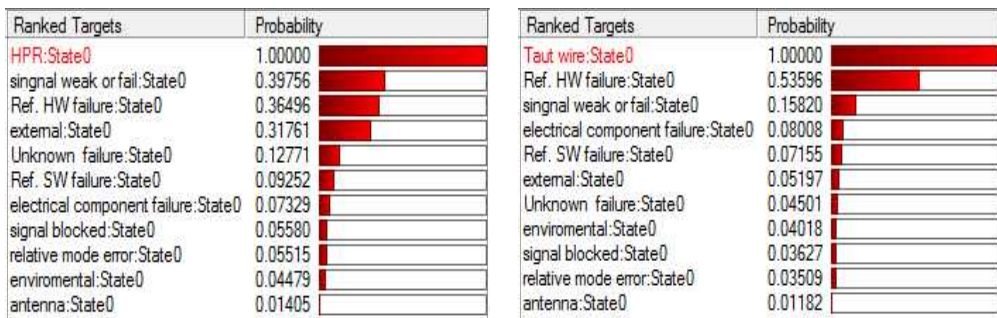


Fig. 34 Marginal probability distribution of HPR & Taut-wire

Fig. 34의 HPR은 신호 약함 또는 수신실패, 하드웨어고장, 외부 구조물이나 장치에 의한 오류가 주요하게 작용하였다. Taut-wire는 하드웨어고장, 신호 약함 또는 수신실패가 높게 나타났다.

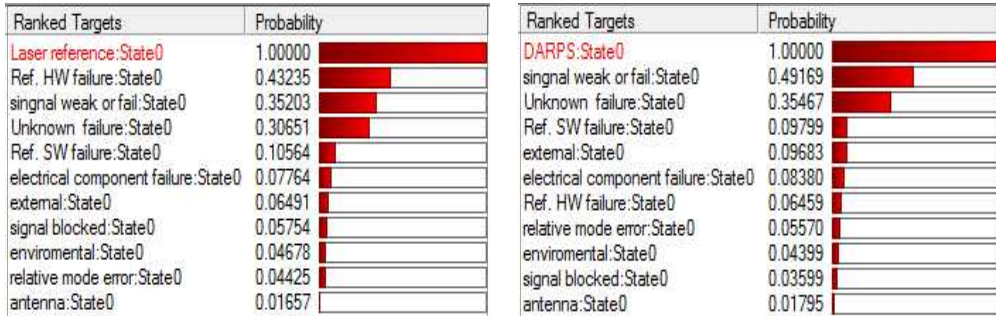


Fig. 35 Marginal probability distribution of laser reference & DARPS

Fig. 35를 보면 Laser Reference는 하드웨어고장, 신호 약함 또는 수신 실패, 소프트웨어 문제가 많았고, DARPS는 신호 약함 또는 수신 실패가 주된 원인이었다. 이러한 내용을 정리하면 PRS의 주된 오류 원인은 다음과 같다.

Table 26 Summary of PRS error causes

Lists of main PRS error causes	
DGPS	Signal blocked, Signal weak or fail, Software error
Artemis	Hardware failure, Antenna position, External environmental
HPR	Signal weak or fail, Hardware failure, External structure or equipment error
Taut-wire	Hardware failure, Signal weak or fail
Laser reference	Hardware failure, Signal weak or fail, Software failure
DARPS	Signal weak or fail

3) PRS 위험분석 요약

DP선박 LOP사고에 대한 베이지안 네트워크 분석을 통해 LOP사고의 주된 원인 및 위험을 정량적으로 확인하였으며 그 결과는 Table 27과 같다.

Table 27 Summary of risks caused by PRS

Risks caused by PRS	
Drive off	- DGPS의 error에 의한 DP선박의 Drive off (57 %) - HPR의 error에 의한 DP선박의 Drive off (31.7%) - Artemis의 error에 의한 DP선박의 Drive off (19.6%) - DARPS에 의한 DP선박의 Drive off (15.0%) - Taut-wire에 의한 DP선박의 Drive off (6.4%) - Laser reference에 의한 DP선박의 Drive off (5.9%)
Operation abort	- DGPS에 의한 DP선박의 Operation abort (52.0%) - Artemis에 의한 DP선박의 Operation abort (15.7%) - HPR에 의한 DP선박의 Operation abort (11.2%) - DARPS에 의한 DP선박의 Operation abort (5.8%) - Laser reference에 의한 DP선박의 Operation abort (3.1%) - Taut-wire에 의한 DP선박의 Operation abort (2.4%)
Time loss	- DGPS에 의한 DP선박의 Time loss (52.0%) - Artemis에 의한 DP선박의 Time loss (15.7%) - HPR에 의한 DP선박의 Time loss (11.2%) - DARPS에 의한 DP선박의 Time loss (5.8%) - Laser reference에 의한 DP선박의 Time loss (3.1%) - Taut-wire에 의한 DP선박의 Time loss (2.4%)

4.3.3 위험제어방안

1) RCOs의 식별 및 적용

지금까지 DP선박 LOP사고에서 주요하게 영향을 미치는 위험요소들을 확인하였다. 이렇게 확인된 위험요소에 대한 위험제어방안을 식별한다[51].

위험제어방안의 식별은 다음의 절차로 진행하였다.

- 가) 빈도분석과 베이저안 네트워크에서 확인된 제어가 필요한 위험영역 식별
- 나) 브레인스토밍을 통한 RCOs의 식별
- 다) 브레인스토밍과 시뮬레이션을 통한 RCOs 적용에 따른 위험감소량 결정
- 라) 비용편익평가가 필요한 RCOs의 식별 및 수행

PRS 오류로 인한 위험을 제어하기 위한 RCOs는 IMO의 FSA에서 언급하고 있는 기준을 바탕으로 전문가들의 브레인스토밍을 통해 Table 28와 같이 제시하였다. 브레인스토밍은 사전에 각 PRS 장치에 대한 RCOs를 작성하여 각 항목에 대한 동의 여부를 확인하였다. 브레인스토밍을 통한 전문가들의 동의 및 제시된 항목의 우선순위 결정을 위해서는 MSC 83/INF. 2에서 언급하고 있는 전문가 일치도(Degree of agreement between experts concordance matrix)을 적용하였으며 수식은 다음과 같다[46].

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^I \cdot \left[\sum_{j=1}^J X_{ij} - \frac{1}{2} J(I+1) \right]^2}{J^2 (I^3 - I)} \quad (4.4)$$

W = 전문가 일치도

J = 참여한 전체 전문가 수

I = 제시된 RCOs의 수

W가 “0”이 되면 전문가들 사이에서 전혀 동의가 이루어지지 않았음을 의미하고, “1”이 되면 모든 전문가가 제시된 시나리오에 100% 동의 하였다는 것을 의미한다[46]. 지침에 의하면 $W > 0.7$ 보다 크면 비교적 좋은 일치도를 나타내고 $0.5 < W < 0.7$ 는 중간정도의 일치도, 그리고 $W < 0.5$ 이면 신뢰 할 수 없는 전문가 일치도를 나타낸다[46].

Table 28은 RCOs에 대한 브레인스토밍의 결과이며 전문가 일치도 $W = 0.91$

로 비교적 좋은 일치도를 보였다. 브레인스토밍을 위해 제시된 RCOs 및 전문가 일치도에 대한 내용은 부록에 첨부하였다.

Table 28 Risk Control Options

PRS Types	Code	RCOs
DGPS	A1	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	A2	DGPS 제조사 교육 의무화
	A3	독립된 DGPS에 2개 이상의 spot beam 위성 service 사용
	A4	소프트웨어의 주기적 원격 점검 시스템
Artemis	B1	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	B2	Artemis 제조사 교육 의무화
	B3	FMEA에 안테나의 설치 위치에 대한 안전성 부분 삽입
	B4	신호 문제요소를 미리 식별 및 Checklist를 통해 점검
HPR	C1	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	C2	HPR 제조사 교육 의무화
	C3	음파 수/발신 강화를 위한 출력 증대
Taut-wire	D1	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	D2	Taut-wire 제조사 교육 의무화
Laser reference	E1	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	E2	Laser reference 제조사 교육 의무화
	E3	소프트웨어의 주기적 원격 점검 시스템 의무화
DARPS	F1	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	F2	DARPS 제조사 교육 의무화

Remarks : 선급 기준에 의하면 DP Class 2이상의 선박에는 PRS를 3종류 이상 설치하도록 요구하고 있음. 그러나 PRS의 종류 요건만 언급을 하고 있고 이들의 보완적인 관계에 대한 요건은 없음.

Table 28의 RCOs를 IMO FSA 지침에서 언급하고 있는 카테고리 별로 분류하면 Table 29와 같으며, 이를 통해 제시된 RCOs가 어떠한 역할로 위험을 감소시키는지 확인 할 수 있다[51].

제시된 모든 RCOs를 적용하여 위험을 낮추는 것은 비효율적이므로 이를 다시 브레인스토밍을 거쳐 Table 30과 같이 RCOs의 적용 우선순위를 결정하였다.

DP선박은 기본적으로 Redundancy에 대한 개념이 매우 중요하게 적용되는 선박이기 때문에 전문가들은 DP Class 1인 선박에 2개 이상의 PRS를 설치하는 것을 가장 우선적인 RCO로 결정하였다. 더불어 PRS 및 관련 장비의 제조사 교

육을 통해 장비의 사용법 및 한계에 대해서 명확히 이해하도록 하는 것도 우선적인 RCO로 적용하는 것에 동의하였다.

Table 29 Categorization of risk control measures

Categories of Risk Control Measures		
CATEGORY A		
Preventive risk control	A Preventive	A4, E3
Mitigating risk control	A Mitigating	
CATEGORY B		
Engineering risk control	B Engineering	C3
Inherent risk control	B Inherent	
Procedural risk control	B Procedural	A2, B2, B3, B4, C2, D2, E2, F2
CATEGORY C		
Diverse risk control	C Diverse	
Redundant risk control	C Redundant	A1, A3, B1, C1, D1, E1, F1,
Passive risk control	C Passive	
Independent risk control	C Independent	
Dependent risk control	C Dependent	
Involved human factors	C Involved Human	
Critical human factors	C Critical Human	
Auditable or not Auditable	C Audit	
Quantitative or Qualitative	C Quantitative, Qualitative	
Established or Novel	C Established	
Developed or Non-developed	C Developed	

Table 30 Priority of RCOs

PRS types	High	Medium	Low
DGPS	A1, A2	A3, A4	
HPR	C1, C2	C3	
Artemis	B1, B2		B3, B4
DARPS	F1, F2		
Taut-wire	D1, D2		
Laser reference	E1, E2	E3	

2) DP 시뮬레이션의 적용

제시된 RCOs들 중에서 A1, B1, C1, E1에 대해서는 DP 시뮬레이션을 적용하여 위험의 감소량을 확인하였다. 단, D1과 F1은 시뮬레이터의 DP 모델선박에 설치되어 있지 않아 적용할 수 없었다.

DP 시뮬레이션은 각 RCOs를 적용할 경우 Drive off, Operation abort 및 Time loss가 어느 정도 빈도로 그 발생이 감소되는지를 확인하기 위해 DPO가 OSV를 Rig선에 접근하는 작업을 통해 수행되었다. OSV는 Rig의 각 측면에서 250m거리에서 접근을 시작하였고 각 25회씩 적용하였다. DP선박에서 PRS를 2종류 이상 사용하는 경우 시뮬레이션에서 실제 1개의 PRS에 오류가 발생하는 경우도 있었지만, 그렇지 않은 경우에는 운용도중 인위적으로 PRS에 오류를 발생시켜 이에 대해 DPO들이 대응하도록 하여 Drive off, Operation abort 및 Time loss 발생 빈도를 확인하였다. DP 시뮬레이션에 사용된 선박의 상세는 다음과 같다.

Ship's Particulars			
Length overall	80.4 m	Type of bow	-
Breadth	18 m	Type of stern	U-shaped
Anchor Chain(Port)	14 shackles		
Anchor Chain(Starboard)	14 shackles		
Anchor Chain(Stern)	N/A shackles	(1 shackle = 27.5 m / 15 fathoms)	

Steering characteristics			
Steering device(s) (type/No.)	- / 2	Number of bow thrusters	1
Maximum angle	45	Power	883 kW
Rudder angle for neutral effect	0 degrees	Number of stern thrusters	1
Hard over to over(2 pumps)	17 seconds	Power	883 kW
Flanking Rudder(s)	0	Auxiliary Steering Device(s)	

Stopping			Turning circle	
Description	Full Time	Head reach	Ordered Engine: 100%, Ordered rudder: 35 degrees	
FAH to FAS	79.55 s	1.35 cbcls	Advance	1.76 cbcls
HAH to HAS	78.5 s	1.08 cbcls	Transfer	0.79 cbcls
SAH to SAS	78.5 s	0.78 cbcls	Tactical diameter	1.54 cbcls

Main Engine(s)			
Type of Main Engine	Medium speed diesel	Number of propellers	2
Number of Main Engine(s)	2	Propeller rotation	Outward
Maximum power per shaft	2 x 6166 kW	Propeller type	CPP
Astern power	100 % ahead	Min. RPM	7.5
Time limit astern	N/A	Emergency FAH to FAS	17.25 seconds

Fig. 36 Simulation model DP Vessel Ship's Particulars

DP 시뮬레이션 운용위치, 기상상태 및 운용상황은 다음과 같다.

가) 운용위치 : 50°38.91N, 010° 41.74W

나) 바람, 조류 및 파도 상태

- Wind speed and direction : 13.0kts, 180°, Depth : 168.6m
- Currents and direction : 0.7kts, 090°, Wave and direction : 1.3m, 170°



Fig. 37 Visual DP vessel approach simulation concepts

시뮬레이션 수행결과 DP선박 LOP사고 감소율은 Table 31, 32, 33과 같이 나타났다. DP선박에 2개의 PRS를 설치하여 사용하는 경우 Drive off, Operation abort 및 Time loss는 평균 각 11%, 10% 및 15% 감소한다는 결과를 얻었다. Drive off의 경우 가장 높은 빈도를 나타낸 것은 4건(16%)이었다. 이는 외력의 영향에 의한 것으로 판단된다. Operation abort의 경우도 4건(16%)이 가장 높은 빈도를 나타냈고, Time loss의 경우에는 5건(20%)가 가장 높은 빈도였다.

Table 31 Frequency of drive off caused by PRS during simulation

Frequency of drive off caused by PRS						
RCOs	Types of PRS	000° (25 times)	090° (25 times)	180° (25 times)	270° (25 times)	F reduced(%)
A1	DGPS only	4(16%)	3(12%)	2(8%)	3(12%)	
	DGPS, Laser reference	0	0	0	0	12
B1	DGPS only	3(12%)	2(8%)	4(16%)	2(8%)	
	DGPS, Artemis	0	0	0	0	11
C1	DGPS only	3(12%)	2(8%)	3(12%)	3(12%)	
	DGPS, HPR	0	0	0	0	11
External force		Wind speed and direction : 13.0kts, 180° Currents and direction : 0.7kts, 090° Wave and direction : 1.3m, 170°				

Table 32 Frequency of operation abort caused by PRS during simulation

Frequency of operation abort caused by PRS						
RCOs	Types of PRS	000° (25 times)	090° (25 times)	180° (25 times)	270° (25 times)	F reduced(%)
A1	DGPS only	2(8%)	3(12%)	2(8%)	1(4%)	
	DGPS, Laser reference	0	0	0	0	8
B1	DGPS only	4(16%)	4(16%)	3(12%)	3(12%)	
	DGPS, Artemis	0	0	0	0	14
C1	DGPS only	2(8%)	2(8%)	3(12%)	2(8%)	
	DGPS, HPR	0	0	0	0	9
External force		Wind speed and direction : 13.0kts, 180° Currents and direction : 0.7kts, 090° Wave and direction : 1.3m, 170°				

Table 33 Frequency of time loss caused by PRS through simulation

Frequency of time loss caused by PRS						
RCOs	Types of PRS	000° (25 times)	090° (25 times)	180° (25 times)	270° (25 times)	F reduced(%)
A1	DGPS only	5(20%)	4(16%)	4(16%)	3(12%)	
	DGPS, Laser reference	0	0	0	0	16
B1	DGPS only	4(16%)	3(12%)	4(16%)	3(12%)	
	DGPS, Artemis	0	0	0	0	14
C1	DGPS only	5(20%)	4(16%)	4(16%)	3(12%)	
	DGPS, HPR	0	0	0	0	16
External force		Wind speed and direction : 13kts, 180° Currents and direction : 0.7kts, 090° Wave and direction : 1.3m, 170°				

3) PRS 제조사 교육

PRS 장비에 대한 제조사 교육을 통해 장비의 사용한계에 대한 명확한 이해를 바탕으로 LOP사고의 빈도를 감소시킬 수 있다고 판단하였으며, 이것에 의한 위험 감소율은 브레인스토밍을 통해 실제 DPO의 약 30% 정도가 제조사 교육을 받지 않는다는 DPO 강사의 의견을 바탕으로 30%로 합의하였다.

PRS 오류에 의한 Drive off 16%, Operation abort 16%, Time loss 20%의 LOP 사고빈도에 대한 시뮬레이션 결과와 제조사 교육을 통한 위험감소량 30%를 바탕으로 앞서 FSA 위험분석 단계에서 확인되었던 F-N선도에 위험감소량을 반영한 결과 Fig. 38과 같이 나타났다. 제시된 RCOs의 시뮬레이션 결과에 따른 DP선박 LOP사고 위험감소량과 제조사 교육을 통한 위험감소량을 바탕으로 F-N선도로 나타낸 결과, 모든 DP선박에 PRS를 2종류 이상 설치하고 이에 대한 장비 교육을 통해 DP선박의 Drive off, Operation Abort 및 Time loss 사고의 위험을 상당히 감소시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

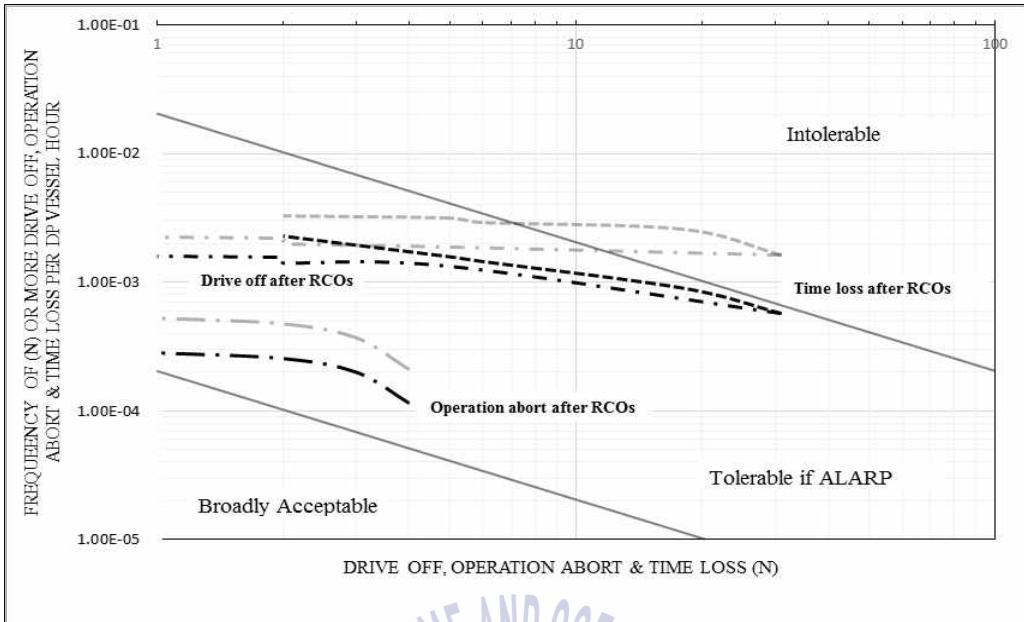


Fig. 38 F-N curve after RCOs applied

브레인스토밍 결과에 편차가 있을 수 있음을 감안하면 제안된 RCOs를 적용하는데 있어서는 기본적으로 여러 RCOs를 동시에 적용하는 것이 위험의 감소량을 극대화 할 수 있다고 하겠다. 예를 들어 DP Class 1선박에 PRS를 2종류 이상 설치하도록 한 후 각 장비들에 대한 교육을 동시에 실시하면 Drive off는 46%, Operation abort는 46%, Time loss는 50%정도 감소될 수 있으므로 이를 통해 효과적으로 LOP사고의 위험을 제어할 수 있다.

4.3.4 비용편익평가

1) 비용편익평가의 기준

IMO FSA 지침에서는 식별된 모든 RCOs에 대한 비용편익평가의 수행이 어려울 경우 일반적으로 정성적 평가를 통해 상세 비용편익평가를 수행할 RCOs 대상을 식별하도록 권고하고 있다[51].

IMO 지침에 따르면 위험도 감소를 위한 RCOs의 비용편익을 측정하기 위해

서 사용되는 기준은 GCAF(Gross Cost of Averting a Fatality)와 NCAF(Net Cost of Averting a Fatality)가 있다. GCAF는 인명에 대한 위험을 감소하기 위해 사용된 RCOs의 부가적 비용의 비율을 확인하여 비용편익을 측정하는 방법이며, NCAF는 인명에 대한 위험을 감소하기 위해서 사용된 RCOs의 경제적 이득을 고려한 부가적 비용의 비율을 확인하여 비용편익을 측정하는 방법이다[51]. 관련 수식은 다음과 같다.

$$GCAF = \frac{\Delta Cost}{\Delta Risk} \quad (4.5)$$

$$NCAF = \frac{\Delta Cost - \Delta EconomicBenefit}{\Delta Risk} = GCAF - \frac{\Delta EconomicBenefit}{\Delta Risk} \quad (4.6)$$

여기서, ΔC 는 RCOs를 적용하면서 소요되는 선박생애 동안의 비용, ΔB 는 RCOs를 적용하면서 얻게 되는 선박생애 동안의 경제적 이득, ΔR 는 위험도 제어방안을 적용함으로써 얻게 되는 DP선박 LOP사고의 선박생애 동안의 위험도 감소량이다.

본 논문에서는 DP선박 LOP사고 보고서가 인명사상에 대한 내용을 포함하고 있지는 않기 때문에 DP선박 LOP사고의 위험을 감소시키기 위해 사용된 비용을 계산하였다. 그리고 NCAF는 경제적 편익에 포함되는 인명보호에 대한 비용, 전손시 선박 및 화물의 가치, 선원비용, 수리비용 등을 계량화하여야 하나 이러한 자료를 국내/외에서 확보하는데 한계가 있어 GCAF만 적용하였다[2]. 이러한 전제를 바탕으로 본 논문에서는 다음과 같은 방법으로 비용편익평가를 수행하였다.

- 가) PRS의 추가설치에 의한 위험감소량의 확인을 위해 시뮬레이션 적용 및 감소량 확인(ΔR)
- 나) 브레인스토밍을 통해 얻어진 LOP사고 위험감소량 확인
- 다) 추가되는 PRS 장치의 가격 및 유지비용의 확인을 위해 제조사, 선사의 의견을 수렴하여 RCOs 적용시 소요비용 확인(ΔC)
- 라) ΔC 는 RCOs의 적용으로 소요되는 비용의 합을 말하며 NPV(Net Present

Value) 식을 이용하여 구함

마) RCOs에 대한 GCAF 계산

바) RCOs 적용시 기대되는 위험감소량, GCAF 및 관련 수식 확인

$$\Delta R = T \times \Delta PLOP \quad (4.7)$$

여기서, PLOP는 DP vessel year당 감소된 LOP사고 위험(Reduced risk of LOP incidents/DP vessel year)이고 $\Delta PLOP$ 는 RCOs 적용후 DP선박의 잠재적 LOP사고 위험도 감소량이다.

$$NPV = A + \frac{X_1}{(1+r)} + \frac{X_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{X_T}{(1+r)^T} = A + \sum_{t=1}^T \frac{X_t}{(1+r)^t} \quad (4.8)$$

여기서, X_t 는 RCOs의 적용에 따른 시간 t 에서의 소요비용 또는 이득, A 는 RCOs의 초기 적용비용, r 는 감가상각 (5%), T 는 선박 생애기간(25년)이다.

PRS의 초기 설치비용은 DP선박 운용회사 및 장비제조 회사로부터 자료를 제공받았으며 그 결과는 Table 34와 같다.

Table 34 PRS installation & maintenance costs(Unit US\$)

	DGPS	Artemis	HPR	Taut-wire	Laser	DARPS
Initial installation costs(A) US\$	65,000	135,000	300,000	250,000	50,000	95,000
Maintenance cost/year(X_t) US\$	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000

(Source : STX marine service, Kongsberg Maritime Korea)

2) 제안된 RCO에 대한 비용편익평가

(1) RCO A1

Table 35 Cost-benefit assessment for RCO A1

RCO A1	Initial F	% Reduction	F Reduction	PLOP Final
Drive off	1.63^{-3}	12%	1.95^{-4}	1.43^{-3}
Operation abort	2.10^{-4}	8%	1.68^{-5}	1.93^{-4}
Time loss	1.63^{-3}	16%	2.61^{-4}	1.37^{-3}
Total	3.47^{-3}		4.73^{-4}	2.99^{-3}
		Risk Reduction ΔR	Cost(US\$) ΔC	GCAF(US\$)
RCO A1-1(HPR)		2.11	581,879	275,772
RCO A1-2(Taut-wire)		2.11	531,879	252,075

(2) RCO B1

Table 36 Cost-benefit assessment for RCO B1

RCO B1	Initial F	% Reduction	F Reduction	PLOP Final
Drive off	1.05^{-4}	11%	1.16^{-5}	9.36^{-5}
Operation abort	5.25^{-5}	14%	7.36^{-6}	4.52^{-5}
Time loss	9.46^{-4}	14%	1.32^{-4}	8.13^{-4}
Total	1.10^{-3}		1.51^{-4}	9.52^{-4}
		Risk reduction ΔR	Cost ΔC (US\$)	GCAF (US\$)
RCO B1-1(HPR)		6.75^{-1}	581,879	862,043
RCO B1-2(Taut-wire)		6.75^{-1}	531,879	787,969

(3) RCO C1

Table 37 Cost-benefit assessment for RCO C1

RCO C1	Initial F	% Reduction	F Reduction	PLOP Final
Drive off	2.63 ⁻⁴	11%	2.89 ⁻⁵	2.34 ⁻⁴
Operation abort	1.58 ⁻⁴	14%	2.21 ⁻⁵	1.36 ⁻⁴
Time loss	3.15 ⁻⁴	16%	5.04 ⁻⁵	2.65 ⁻⁴
Total	7.36 ⁻⁴		1.01 ⁻⁴	6.34 ⁻⁴
		Risk reduction ΔR	Cost(US\$) ΔC	GCAF (US\$)
RCO C1(Taut-wire)		4.52 ⁻¹	531,879	1,176,723

Table 35~37에서 확인할 수 있는 바와 같이 RCOs A1, B1 및 C1의 GCAF는 각 275,772 US\$, 862,043 US\$, 1,176,723 US\$로 확인되었다. IMO의 지침에 의하면 GCAF가 3,000,000 US\$ 이하의 경우 비용편익이 있는 것으로 보고 있다 [43][47]. 따라서 모든 DP선박에 PRS를 2종류 이상 설치하는 RCOs A1, B1 및 C1은 비용편익 측면에서도 합리적이라는 것을 의미한다.

4.3.5 권고

DP선박의 PRS에 대한 FSA 결과 DP선박 LOP사고 위험을 감소시키기 위한 권고는 다음과 같다.

- (가) RCO A1 : PRS로서 DGPS만을 설치하고 있는 DP선박의 경우 HPR 또는 Taut-wire를 추가로 설치하는 것이 권고된다.
- (나) RCO B1 : PRS로서 DGPS와 Artemis가 설치되어 있는 DP선박의 경우 3번째 PRS는 HPR의 설치가 권고된다.
- (다) RCO C1 : PRS로서 DGPS와 HPR가 설치되어 있는 DP선박의 경우 3번째 PRS는 Taut-wire의 설치가 권고된다.
- (라) RCO A2, B2, C2, D2, E2, F2 : PRS 및 DP 시스템에 대한 제조사 교육이 권고된다.

4.4 소결론

본 장에서는 DP선박의 안전운용을 위해 3장에서 식별된 DP선박 LOP사고의 가장 주된 원인인 PRS 오류에 대한 FSA를 브레인스토밍과 베이지안 네트워크를 사용하여 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

첫째, PRS 오류에 의한 DP선박 LOP사고 117건을 베이지안 네트워크를 이용하여 분석하였으며, 이를 통해 Drive off에 대한 PRS의 조건부 가능성은 DGPS 57.0%, HPR 31.7% 및 Microwave 시스템 19.6%임을 확인하였다. 또한 Operation abort에 대한 조건부 가능성은 DGPS 52.0%, Microwave 시스템 15.7%, HPR 11.2%임을 확인할 수 있었다. 더불어 이러한 오류의 원인으로는 신호 약함, 하드웨어 고장, 외부영향 등이 주요하게 작용하였다는 것을 확인하였다.

둘째, 빈도 및 베이지안 네트워크 분석을 바탕으로 F-N선도를 그려본 결과 Drive off 및 Time loss의 일부분이 PRS 오류에 의한 LOP사고 위험의 합리적인 수용가능 경계를 넘어가는 부분이 있음을 확인할 수 있었다. PRS 오류에 의한 Drive off 및 Time loss 사고의 위험을 합리적인 수용가능 범위 내로 감소시키기 위해 모든 DP선박에 2종류 이상의 PRS 설치를 RCOs로 제안하였으며, 제안된 RCO를 시뮬레이션을 통해 적용 효과를 확인한 결과 평균 17%의 위험감소량을 확인하였다. 또한 브레인스토밍 결과 PRS 제조사 교육을 통해 30% 정도의 LOP사고 위험을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

셋째, 확인된 위험감소량을 F-N선도에 적용한 결과 Drive off와 Time loss가 수용가능 범위 이내에 들어오는 것을 확인할 수 있었으며, 제시된 위험감소량에 편차가 있을 수 있음을 감안하면 여러 RCOs를 동시에 적용하는 것이 위험감소에 효과적인 방법이 될 수 있다. 아울러 제시된 RCOs에 대한 비용편익평가 결과 2종류 이상의 PRS를 설치하는 것과 제조사 교육이 비용편익 측면에서 합리적임을 확인하였다.

넷째, FSA를 수행하는 과정에서 베이지안 네트워크는 위험분석에 유용하게 적용될 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 시뮬레이션을 통한 RCO의 검증은 RCO의 적용 효과를 확인하기 위한 유용한 도구가 될 수 있음을 확인하였다.

제5장 인적오류에 대한 FSA의 적용

5.1 서론

3장에서 수행한 DP선박 LOP사고원인 분석결과에 따르면 인적오류에 의한 LOP사고는 10년 평균 11.8%로 나타나 다른 원인에 비해 비교적 작게 나타났다. 그러나 보고된 612건의 사고 보고서를 상세히 분석해본 결과 375건(61.2%)의 LOP사고가 인적오류와 직/간접적인 원인으로 작용한 사고였다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 DP선박의 LOP사고에서도 인적오류는 주된 영향을 미치는 원인이라는 것을 확인 할 수 있었다.

이러한 분석결과를 바탕으로 본 장에서는 DP선박의 안전운용을 위해 DP선박 LOP사고의 인적오류에 대한 FSA를 수행한다. 이를 통해 인적오류가 DP선박 LOP사고에 어느 정도의 확률로 영향을 주는지 확인하고, 이러한 인적오류를 감소시키기 위한 RCOs를 비용편익평가를 통해 제시한다.

해사분야에서의 인적오류 분석은 Rothblum et al.(2002)이 인적요인을 포함한 사고의 효과적인 평가 프로그램을 제안하였다[7]. 또한 Griggs(2012)는 HFACS를 적용하여 미국 NTSB 해양사고 보고서, 캐나다 TSB 해양사고 보고서, 영국 MAIB 해양사고보고서 데이터를 바탕으로 인적요인을 분석해본 결과 HFACS가 해양사고에서 인적요인을 분석하는데 유용한 도구임을 증명하였다[19]. 그리고 Hauff(2014)는 DP선박 LOP사고의 인적요인에 HFACS를 적용하여 DP선박 LOP 사고에서 인적오류가 미치는 영향을 분석하였다[56].

본 장에서는 이러한 선행연구를 참조하여 3장의 DP선박 LOP사고 인적오류 빈도 분석결과를 바탕으로 HFACS를 활용하여 인적오류를 분류하고, 이를 베이저안 네트워크에 적용하여 인적오류에 대한 주된 원인을 정량화한다.

5.2 FSA의 준비

5.2.1 FSA의 전제조건

앞서 4장에서 언급된 바와 같이 분석된 DP선박 LOP사고 보고서에는 인명피해, 충돌사고, 재산피해 등은 언급되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 인적 오류에 의한 DP선박 LOP사고의 원인과 사고의 종류별 심각성을 바탕으로 FSA를 수행한다.

612건의 DP선박 LOP사고를 모두 분석해보면 직/간접적으로 인적오류가 원인으로 작용한 사고는 375건으로 약 61.2%를 차지하고 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 본 논문에서는 이러한 LOP사고 보고서 분석의 결과가 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다는 점을 감안하여 IMCA에 보고된 DP선박 LOP사고 보고서에서 인적오류를 LOP사고의 1차 및 2차 원인으로 기재하고 있는 103건에 대해서만 FSA를 수행한다. 그리고 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고의 종류 및 심각성은 4장 Table 15와 동일하게 적용한다.

5.2.2 사용된 FSA 도구

사고데이터의 분석방법에는 개별사고의 분석, 빈도분석을 통한 고위험요소 분석, 사고트렌트 파악, 비슷한 사고들의 분석, 문제를 발생하도록 만든 상황 분석, 통계분석을 통한 사고들 사이의 관계 확인 등이 있다[13]. 이러한 방법들 중 본 논문에서는 빈도분석을 통한 고위험 원인의 확인을 위해 DP선박 LOP사고의 인적오류를 분류 및 분석하였으며, 이를 위해 브레인스토밍, HFACS 및 베이지안 네트워크를 도구로 사용하였다.

1) 브레인스토밍

브레인스토밍은 앞서 4장과 동일하게 저자를 포함하여 DPO 2명, DP선박 감독 1명, DPO 강사 및 FMEA 전문가 1명 등 총 5명에 의해 2차례에 걸쳐 수행되었다.

가) 인적오류 RCOs 식별과 우선순위의 결정

나) 인적오류 RCOs의 적용에 따른 위험감소량의 결정

2) HFACS 및 베이지안 네트워크

2장에서 설명된 인적오류 분류와 세부 인적오류의 특징을 참조하여, 3장에서 분석된 인적오류에 의해 발생한 103건의 DP선박 LOP사고를 HFACS 분류기준에 따라 분석하였다.

HFACS에 따라 분류된 인적오류에 대한 사전가능성 및 조건부 가능성을 확인하기 위해 DP선박 LOP사고의 인적오류를 베이지안 네트워크 흐름도로 작성하였으며, MS 엑셀로 작성된 입력 데이터를 GeNIe로 분석하였다.

5.3 FSA의 수행

5.3.1 위험식별

1) HFACS 분류

103건의 인적오류를 HFACS로 분류한 결과 Table 38과 같이 확인되었다. DP선박 LOP사고의 인적오류는 모두 불안전 행동(Unsafe acts)에 의해 발생하였으며, 불안전 행동 전제조건(Precondition for unsafe acts) 40건(38.8%), 불안전 감독(Unsafe supervision) 88건(85.4%), 조직상의 영향(Organizational influences) 68건(66.0%)으로 확인되었다[12].

Table 38 HFACS categorization of human errors for DP LOP incidents

HFACS Category	Numbers	Percentage(%)
Organizational influences	68	66.0
Unsafe supervision	88	85.4
Precondition for unsafe acts	40	38.8
Unsafe acts	103	100.0

HFACS를 분류함에 있어 인적오류는 해당되는 경우 중복 적용하였다. 주목할 점은 불안전 행동의 원인은 불안전 행동의 사전 조건보다는 불안전 감독과 조직의 영향이 더 큰 비중을 차지하고 있다는 것이고, 이는 불안전 행동을 효과적으로 제어하기 위해서는 감독과 조직적인 측면의 개선이 더 큰 효과를 가져올 수 있다는 것을 의미한다.

Table 38의 인적오류를 2장에서 설명한 HFACS 분류기준으로 상세하게 분석해본 결과 4가지 단계 인적오류는 Table 39~42와 같이 분석되었다.

Table 39 Human error DP LOP incidents caused by organizational influences[12]

Organizational influences			
Categories	Errors	No.	%
Resource Management	Inadequate management of human resources	22	32.3%
	Inadequate management of monetary resources	-	-
	Inadequate design and maintenance of facilities	6	8.8%
Organizational Climate	Adequacy of organizational structure	-	-
	Adequacy of organizational policies	-	-
	Adequacy of safety culture	-	-
Organizational Process	Adequacy of established conditions of work	-	-
	Adequacy of established procedures	37	54.4%
	Adequacy of oversight	3	2.9%

Table 39에서 볼 수 있는 바와 같이 103건의 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고의 원인에서 조직상의 영향은 수립된 절차에 문제가 있어 이것이 사고로 연결되는 경우가 54.4%로 가장 높게 나타났고, 작업 수행에 적합한 능력이 있는 사람의 선택 또는 조직의 인적자원관리 문제가 32.3%로 분석되었다[12].

Table 40의 불안전 감독에서는 운용계획의 적합성 미흡이 37.5%로 가장 높은 원인으로 작용하였고, 감독의 부재도 28.4%로 나타났다. 세부적으로는 부적절한 감독에서 지침 제공의 실패(Failed to provide guidance) 9.1%, 운용자의 능력에 대한 검증 실패(Failed to track performance) 8.0%, 그리고 교육제공 실패(Failed

to provide training) 6.8%로 분석되었다[12].

Table 40 Human error DP LOP incidents caused by unsafe supervision[12]

Unsafe supervision			
Categories	Errors	No.	%
Inadequate Supervision	Failed to provide guidance	8	9.1%
	Failed to provide operational doctrine	2	2.3%
	Failed to provide oversight	25	28.4%
	Failed to provide training	6	6.8%
	Failed to track qualifications	1	1.1%
	Failed to track performance	7	8.0%
Planned Inappropriate Operations	Failed to provide correct data	1	1.1%
	Failed to provide adequate brief time	-	-
	Improper manning	1	1.1%
	Adequacy of operational procedure or plan	33	37.5%
	Provided inadequate opportunity for crew rest	-	-
Failed to Correct a known Problem	Failed to correct document in error	-	-
	Failed to identify an at risk behavior	-	-
	Failed to initiate corrective action	4	4.5%
	Failed to report unsafe tendencies	-	-
Supervisory Violations	Authorized an unnecessary hazard	-	-
	Failed to enforce rules and regulations	-	-
	Authorized unqualified crew	-	-

Table 41 불안전 행동 전제조건에서는 관련 지식부족이 35%로 가장 높았고 부주의 20%, 상황인식 실패 15%로 작용하였다. 그리고 언어가 다름으로 인한 적절치 못한 의사소통도 5%로 분석되었다[12].

Table 41 Human error DP LOP incidents caused by precondition for unsafe acts

Precondition for unsafe acts				
Categories		Errors	No.	%
Substandard Conditions of Operators	Adverse Mental States	Channelized attention	5	12.5%
		Complacency	1	2.5%
		Distraction	8	20.0%
		Mental fatigue	-	-
		Haste	1	2.5%
		Loss of situational awareness	6	15.0%
		Misplaced motivation	2	5.0%
		Task saturation	-	-
	Adverse Physiological States	Impaired physiological state	-	-
		Medical illness	-	-
		Physiological incapacitation	-	-
		Physical fatigue	-	-
	Physical/ Mental Limitations	Insufficient reaction time	1	2.5%
		Poor vision/hearing	-	-
		Lack of knowledge	14	35%
		Incompatible physical capability	-	-
Substandard Practices of Operators	Crew Resource Mgt.	Impaired communications due to language difference	2	5.0%
		Interpersonal conflict among crew	-	-
		Failed to use all available resources	-	-
		Failure of leadership	-	-
		Misinterpretation of traffic calls	-	-
		Failed to conduct adequate brief	-	-
		Impaired communication/conflict due to cultural difference	-	-
	Personal Readiness	Self-medicated	-	-
		Inadequate rest	-	-

불안전 행동은 Table 42와 같이 기술기반 오류(Skill-based error)가 71건 68.9%로 가장 많았고, 의사결정 오류(Decision error) 27.2%, 지각적 오류(Perceptual error) 2.9%, 일상적 위법(Routine violation)이 1.0%로 분석되었다[12].

Table 42 Human error DP LOP incidents caused by unsafe acts[12]

Unsafe acts					
Categories		Errors	No.	%	
Errors	Skill-based	Failed to prioritize attention	1	1.0%	68.9%
		Inadvertent use of controls	60	58.3%	
		Omitted step in procedure, or executed step out of sequence.	8	7.8%	
		Omitted checklist item or completed check list item out of sequence.	1	1.0%	
	Perceptual	Misjudged distance/rate/time	-	-	2.9%
		Misread dial or indicator	1	1.0%	
		Failed to see/hear/otherwise sense	2	1.9%	
	Decision	Improper procedure or maneuver	21	20.4%	27.2%
		Misdiagnosed emergency	2	1.9%	
		Wrong response to emergency	4	3.9%	
		Poor decision	2	1.9%	
Violations	Routine	Definition: Common or habitual instance of breaking the rules and regulations (taking a shortcut)	1	1.0%	1.0%
	Exceptional	Definition: Isolated departure from authority, rules and regulations	-	-	

2) 인적오류 빈도분석

인적오류에 의한 DP선박 LOP사고의 심각성 기준은 Table 43과 같이 앞서 PRS에 대한 FSA와 동일하게 적용하였다. 인적오류 발생빈도 기준은 Table 44와 같이 5단계로 설정하였고 이를 바탕으로 Table 45와 같이 Risk Index를 작성하였다. 인적오류에 대한 Risk Index를 위한 수식은 앞서 수식 (4.1), (4.2) 및 (4.3)과 동일하다.

Table 43 Severity Index of human error DP LOP incidents

Severity Index (SI)			
SI	Severity	Effects on DP vessel	S (equivalent fatalities)
1	낮은 심각성 (Low severity)	충돌이 없으며 약간의 자본손실 있음, 부상자 및 환경손상 없음	시간손실 (time loss)
2	중간 심각성 (Medium severity)	충돌이 없으며 보통의 자본손실 있음. 부상자 및 환경손상 없음.	DP선박 운용중단 (operation abort)
3	높은 심각성 (High severity)	충돌로 인한 화재 및 커다란 자본손실 가능성이 있음. 심각한 인명 부상 및 환경손상 가능성이 있음.	위치이동 발생 (Drive off or drift off)

Table 44 Frequency Index of human error DP LOP incidents

Frequency Index(FI)			
FI	Frequency	Definition	F (per DP vessel year)
5	Frequent	1척의 DP선박에서 100시간에 1회 발생	10^{-2}
4	Probable	1척의 DP선박에서 1,000시간에 1회 발생	10^{-3}
3	Unlikely	1척의 DP선박에서 10,000시간에 1회 발생	10^{-4}
2	Remote	10척의 선박에서 10,000시간에 1회 발생	10^{-5}
1	Very remote	100척의 선박에서 10,000시간에 1회 발생	10^{-6}

Table 45 Risk Index of human error DP LOP incidents

Risk Index(RI) of Human errors				
FI	Frequency	Severity(SI)		
		1	2	3
		Low(time loss)	Medium (operation abort)	High(Drive off)
5	Frequent	6	7	8
4	Probable	5	6	7
3	Unlikely	4	5	6
2	Remote	3	4	5
1	Very remote	2	3	4

(1) Risk Index

HFACS로 분류한 인적오류의 빈도를 확인하고 이를 Table 44와 Table 45에 적용하면 Table 46과 같은 불안전 행동 인적오류별 Risk Index 값을 얻는다. 이를 보면 인적오류는 기술기반 오류에 의한 Drift off 및 Drive off가 가장 위험한 요소라는 것을 확인할 수 있다.

Table 46 Risk Index of DP LOP incidents caused Unsafe acts

Risk Index (RI)						
Unsafe acts	Number of error	Frequency	FI	RI = FI + SI		
				Drift off or Drive off SI = 3	Operation abort SI = 2	Time loss SI = 1
Skill-based	70	3.68^{-3}	4	7	6	5
Perceptual	3	1.58^{-4}	3	6	5	4
Decision	29	1.52^{-3}	4	7	6	5
Routine	1	5.25^{-5}	2	5	4	3
Exceptional	-					
Total	103	5.41^{-3}				
Fleet at risk : 19,032 DP vessel years						

(2) 빈도분석

Table 46의 불안전 행동에 대한 인적오류별 빈도를 Drive off, Operation abort 및 Time loss 심각도(SI)로 나누어 계산하면 Table 47과 같이 LOP사고 종류에 따른 불안전 행동 인적오류 빈도를 구할 수 있다. 이를 바탕으로 Drive off, Operation abort 및 Time loss관련 RI를 구하면 Table 48과 같다.

인적오류에 의한 DP선박 LOP사고는 기술기반 오류 및 의사결정 오류에 의한 Drive off(RI 7)가 가장 높은 위험도로 나타났고, 다음으로 지각적 오류에 의한 Drive off(RI 6)의 순으로 확인되었다.

Table 47 Frequency of unsafe acts

Unsafe acts frequency						
Unsafe acts	Drive off	Frequency	Operation abort	Frequency	Time Loss	Frequency
Skill-based	57	2.99^{-3}	1	5.25^{-5}	12	6.31^{-4}
Perceptual	2	1.05^{-4}	-		1	5.25^{-5}
Decision	21	1.10^{-3}	3	1.58^{-4}	5	2.63^{-4}
Routine	1	5.25^{-5}	-	-	-	-
Exceptional	-	-	-	-	-	-
Total	81	4.26^{-3}	4	2.10^{-4}	18	9.46^{-4}

Fleet at risk : 19,032 DP vessel years

Table 48 Risk Index of DP LOP incidents caused by human errors

Risk Index						
Unsafe acts	Drive off (FI)	Operation abort (FI)	Time Loss (FI)	RI = FI + SI		
				(Drive off) SI = 3	(Operation abort) SI=2	(Time loss) SI=1
Skill-based	4	2	3	7	4	4
Perceptual	3	-	2	6	-	3
Decision	4	3	3	7	5	4
Routine	2	-	-	5	-	-
Exceptional	-	-	-	-	-	-

5.3.2 위험분석

1) 누적빈도 분석

(1) 누적빈도 및 F-N선도

F-N선도를 그리기 위해 Drive off, Operation abort 및 Time loss의 각 인적오류에 대한 누적빈도를 구하면 Table 49, 50 및 51과 같다.

Table 49 Cumulative frequency of Drive off by Unsafe acts

Cumulative Frequency of Drive off(2001~2010)			
Unsafe acts	Drive off	Frequency (per DP vessel year)	Cumulative Frequency (per DP vessel year)
Skill-based	57	2.99^{-3}	2.99^{-3}
Decision	21	1.10^{-3}	4.10^{-3}
Perceptual	2	1.05^{-4}	4.20^{-3}
Routine	1	5.25^{-5}	4.26^{-3}
Exceptional	-	-	-
Total	81	4.26^{-3}	

Fleet at risk : 19,032 DP vessel years

Table 50 Cumulative frequency of Operation abort by Unsafe acts

Cumulative Frequency of Operation abort			
Unsafe acts	Operation abort	Frequency (per DP vessel year)	Cumulative Frequency (per DP vessel year)
Decision	3	1.58^{-4}	1.58^{-4}
Skill-based	1	5.25^{-5}	2.10^{-4}
Perceptual	-	-	-
Routine	-	-	-
Exceptional	-	-	-
Total	4	2.10^{-4}	

Fleet at risk : 19,032 DP vessel years

Table 51 Cumulative frequency of Time loss by Unsafe acts

Cumulative Frequency of time loss			
Unsafe acts	Time Loss	Frequency (per DP vessel year)	Cumulative Frequency (per DP vessel year)
Skill-based	12	6.31^{-4}	6.31^{-4}
Decision	5	2.63^{-4}	8.94^{-4}
Perceptual	1	5.26^{-5}	9.46^{-4}
Routine	-	-	-
Exceptional	-	-	-
Total	18	9.46^{-4}	

Fleet at risk : 19,032 DP vessel years

Table 49~51을 바탕으로 F-N선도를 그리면 Fig. 39와 같다. 4에서와 마찬가지로 본 논문에서 분석한 DP선박 LOP사고는 사망자, 재산손실, 환경피해 등의 내용을 포함하고 있지 않기 때문에 F-N선도의 ALARP 경계선은 Drift off, Drive off, Operation abort 및 Time loss 누적빈도의 평균값을 기준으로 적용하였다. 따라서 경계선은 사회적 위험도 및 개인위험도를 나타내는 것이 아니라 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고의 평균 빈도를 일반적인 허용기준으로 활용하였음을 밝혀둔다.

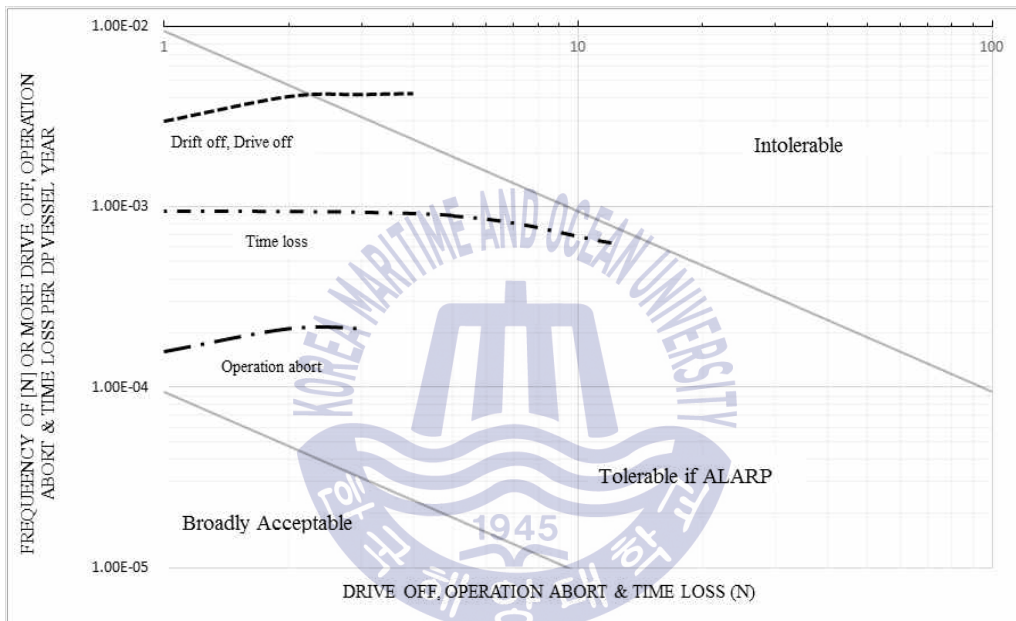


Fig. 39 Human errors F-N curve

Fig. 39와 같이 Drift off 및 Drive off는 그 일부가 ALARP 범위를 넘어서고 있다. 그러나 Fig. 39의 ALARP 경계는 사회적 수용기준을 나타내는 것은 아니기 때문에 ALARP를 넘어가는 부분에 대하여 비용과 상관없이 반드시 위험도를 감소시켜야 하는 것은 아니며, 합리적인 방법으로 인적오류에 의한 LOP사고 위험도를 감소시켜야 할 것이다.

(2) 위험제어가 필요한 영역

빈도분석을 통해 확인된 인적오류관련 위험요소들을 Table 52에 나타내었다.

Table 52 Risks Caused by human errors

No.	Risks required RCOs	Risk Index
1	기술기반 오류에 의한 Drive off	7
2	의사결정 오류에 의한 Drive off	7
3	지각적 오류에 의한 Drive off	6
4	일반적 규정 위반에 의한 Drive off	5
5	의사결정 오류에 의한 Operation abort	5
6	기술기반 오류에 의한 Operation abort	4
7	기술기반 오류에 의한 Time loss	4
8	의사결정 오류에 의한 Time loss	4
9	지각적 오류에 의한 Time Loss	3

2) 베이저안 네트워크 분석

(1) 인적오류 흐름도 작성

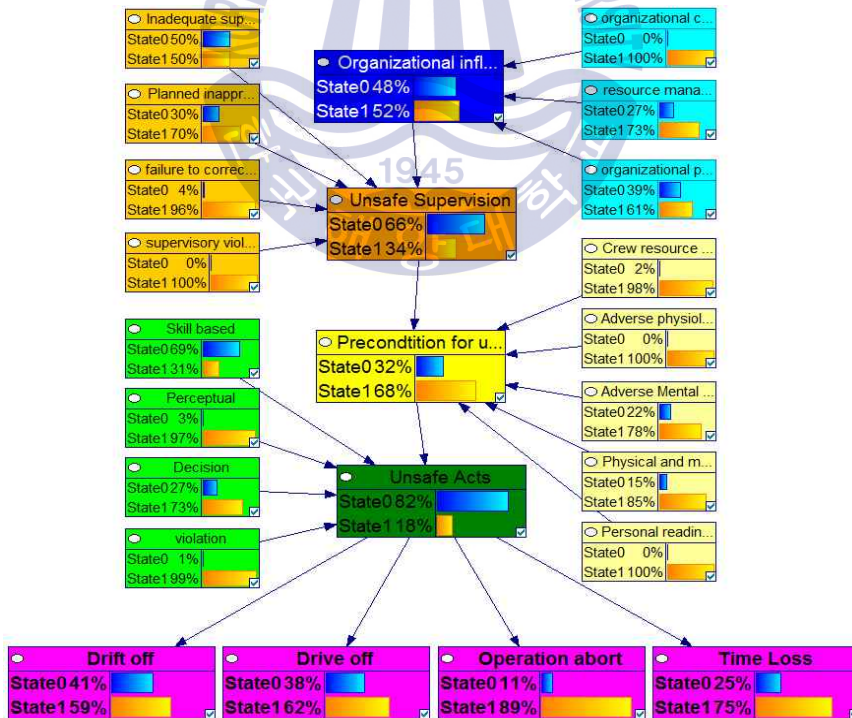


Fig. 40 Prior Probability of human error on DP LOP incidents

HFACS 바탕으로 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고 흐름도를 GeNIe에서 작성한 후, 103건의 인적오류 관련 LOP사고를 MS 엑셀로 작성하였다. 이를 GeNIe에서 실행하여 Drift off, Drive off, Operation abort 및 Time loss에 대한 사전가능성을 구하였으며 그 결과는 Fig. 40과 같다. 이를 통해 Drift off는 41%, Drive off는 38%, Operation abort는 11% 그리고 Time lose는 25%의 발생 가능성을 확인하였다.

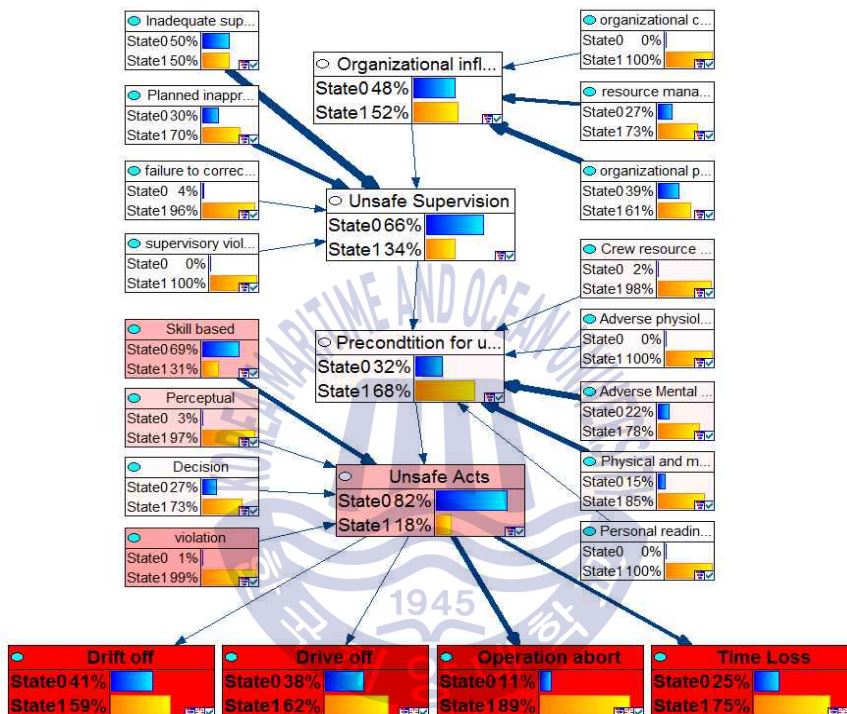


Fig. 41 Human errors sensitivity for drift off, drive off, operation abort & time loss

GeNIe를 이용하여 DP선박 LOP사고의 민감도를 확인해 보면 Fig. 41 및 Fig. 42와 같다. 이를 통해 기술기반 불안전 행동(Skill based Unsafe Acts)이 가장 민감한 요인으로 작용하여 LOP사고를 발생시키고 있음을 확인할 수 있다. 불안전 행동의 사전조건(Precondition for Unsafe acts)부분에서는 Fig. 42와 같이 사람의 정신적, 육체적 문제가 가장 영향을 크게 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

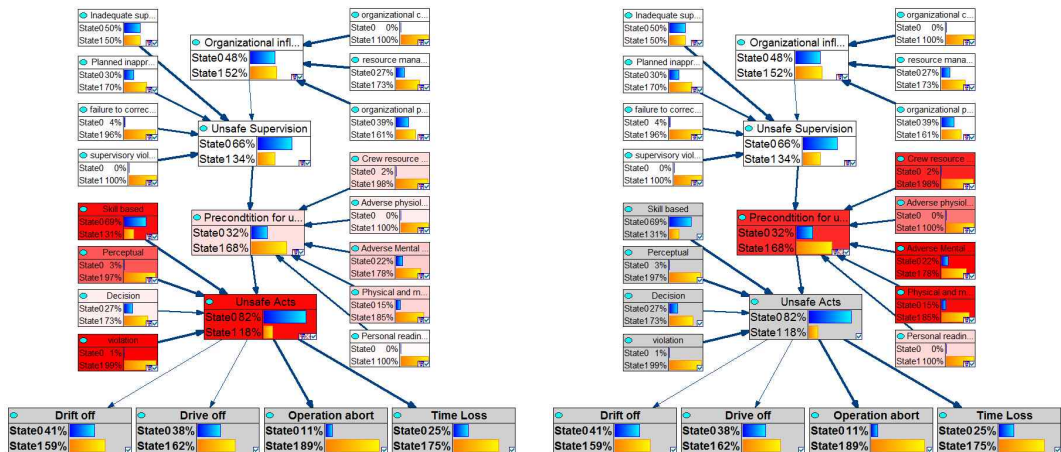


Fig. 42 Sensitivity of unsafe acts & precondition for unsafe acts

Fig. 43의 불안전 감독 부분에서는 감독 부적절 및 계획된 절차의 부적절이 가장 민감하게 반응하고 있었고, 조직 영향에서는 대부분의 요소가 모두 민감하게 작용하는 요소라는 것을 확인할 수 있었다.

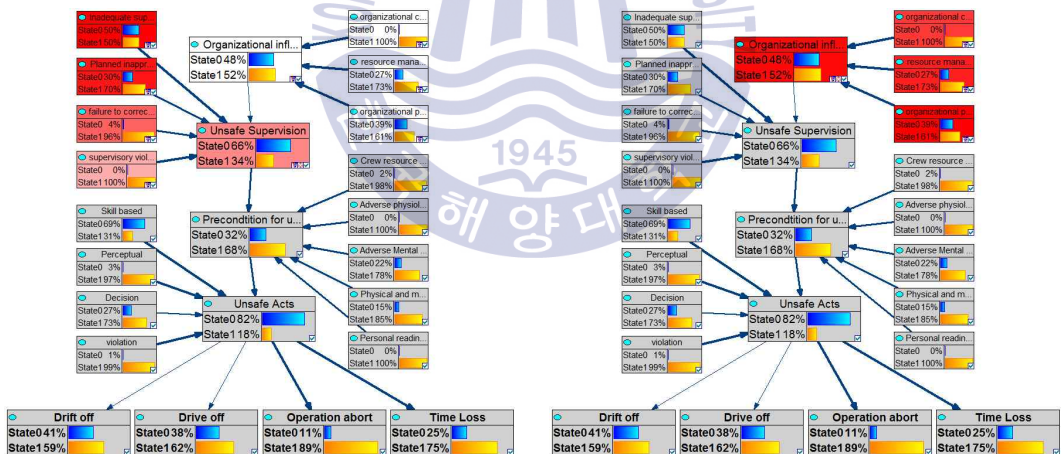


Fig. 43 Sensitivity unsafe supervision & organizational influence

(2) 위험에 대한 조건부 가능성

Fig. 40을 바탕으로 Drift off, Drive off, Operation abort 및 Time loss 사고 발생에 대한 조건부 가능성을 확인하였으며, 그 결과는 Fig. 44와 같다.

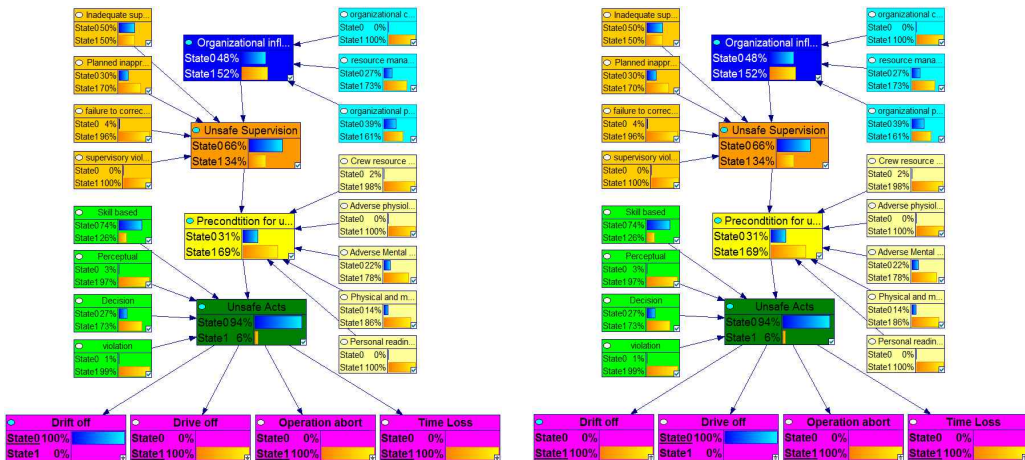


Fig. 44 Conditional probabilities of Drift off & drive off by Human error

Fig. 44와 같이 Drift off와 Drive off의 발생 가능성을 100%로 두고 조건부 가능성을 확인해 보면 Drift off와 Drive off의 인적오류 원인으로 불안전 행동 94%, 불안전 행동 사전조건 31%, 불안전 감독 66%, 조직상의 영향 48%로 나타났다. 이것은 10년간 발생한 DP선박 LOP사고에서 불안전 행동이 Drift off 및 Drive off 사고의 주된 원인이라는 것을 보여준다. 또한 불안전 행동 인적오류는 운용자의 정신상태 부족, 물리적인 제약, 준비상태가 부족하였다기보다는 적절한 감독의 부재, 만들어진 절차의 부적합이 더 크게 작용한 원인이라는 것도 확인할 수 있다. 이러한 베이지안 네트워크를 통한 분석은 앞서 사고의 빈도분석을 통해서 확인된 사항과 비슷한 결과를 보이고 있다는 것도 확인할 수 있다.

(3) 주변확률 분포(Marginal probability distribution)

GeNIe를 통해 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고의 확률을 확인해 보았으며, 그 결과는 Fig. 45 및 Fig. 46과 같다.

Fig. 45는 Drift off와 Drive off를 발생시키는 주된 원인을 순위별로 표시한 것이다. 이를 보면 Drift off 및 Drive off의 인적오류는 불안전 행동의 기술기반오류가 74%로 가장 높은 확률을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 불안전 감독이 50%의 확률로 나타났다.

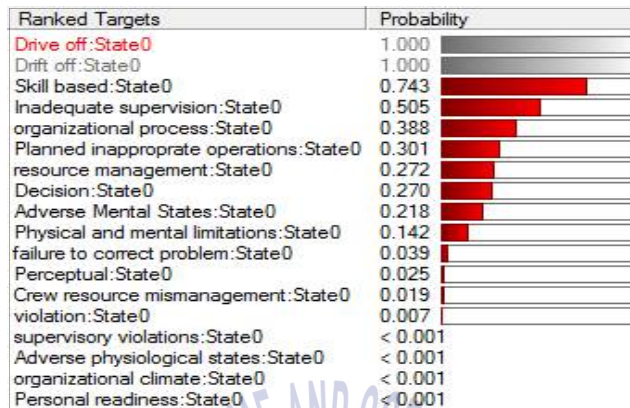
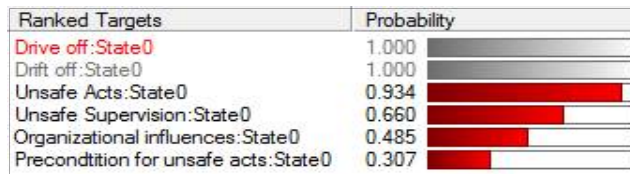


Fig. 45 Probability ranks of Drive off & drift off by human errors

Fig. 46을 보면 Operation abort와 Time loss에서도 기술기반 오류는 각각 51.9% 및 64%로 가장 큰 원인으로 작용하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

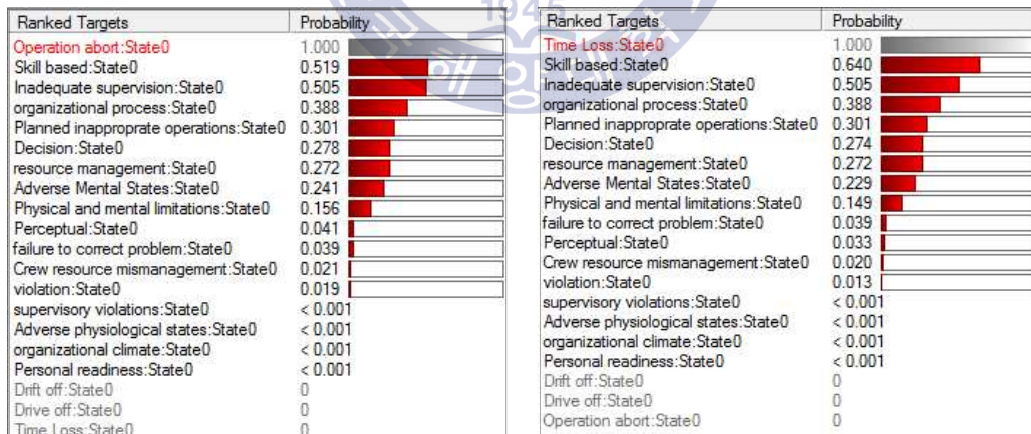


Fig. 46 Probability ranks of operation abort & time loss by human errors

3) 인적오류 위험분석 요약

지금까지 103건의 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고에 대한 빈도분석과 베이 지안 네트워크를 수행하였으며, 이를 통해 DP선박 LOP사고에 주요하게 영향을 미치는 요소를 정리하면 Table 53과 같다. 앞서 설명한 바와 같이 인적오류에 의한 LOP사고의 가장 큰 원인은 기술기반오류이고, 부적절한 감독과 조직상의 영향은 이러한 인적오류에 큰 영향을 미치고 있는 요소들이다.

Table 53 Summary of risks caused by human errors

Risks RCOs required	
Drive off	- 기술기반 오류에 의한 Drive off (74.3%) - 부적절한 감독에 의한 Drive off (50.5%) - 조직의 절차문제에 의한 Drive off (38.8%) - 자원관리 문제에 의한 Drive off (27.2%) - 의사결정 오류에 의한 Drive off (27.0%) - 비정상적 정신 상태에 의한 Drive off (21.8%) - 신체적 정신적 문제에 의한 Drive off (14.2%)
Operation abort	- 기술기반 오류에 의한 Operation abort (51.9%) - 부적절한 감독에 의한 Operation abort (50.5%) - 조직의 절차문제에 의한 Operation abort (38.8%) - 수립된 계획의 부적절에 의한 Operation abort (30.1%) - 의사결정 오류에 의한 Operation abort (27.8%) - 자원관리 문제에 의한 Operation abort (27.2%) - 비정상적 정신 상태에 의한 Operation abort (24.1%) - 신체적 정신적 문제에 의한 Operation abort (15.6%)
Time loss	- 기술기반 오류에 의한 Time loss (64.0%) - 부적절한 감독에 의한 Time loss (50.5%) - 조직의 절차문제에 의한 Time loss (38.8%) - 수립된 계획의 부적절에 의한 Time loss (30.1%) - 의사결정 오류에 의한 Time loss (27.4%) - 자원관리 문제에 의한 Time loss (27.2%) - 비정상적 정신 상태에 의한 Time loss (22.9%) - 신체적 정신적 문제에 의한 Time loss (14.9%)

5.3.3 위험제어방안

1) RCOs의 식별 및 적용

HFACS와 베이지안 네트워크를 통해 확인된 인적오류의 위험제어를 위한 개념으로 유효성 삼각형(Triangle of effectiveness)을 적용한다. 이는 HFACS를 바탕으로 만들어진 모델로 인적오류를 예방하거나 감소시키기 위한 8단계 조치 및 각 조치의 영향을 Fig. 47과 같이 모델화한 것이다.

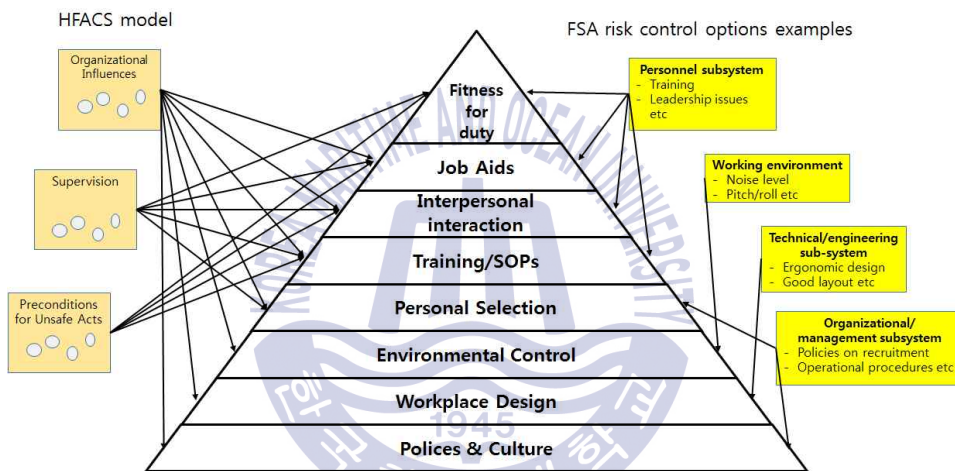


Fig. 47 Triangle of effectiveness to reduce human error

유효성 삼각형의 인적오류 제어를 위한 8가지 요소들은 다음과 같다[12].

- 가) 정책 및 문화(Policies and culture) : 안전, 인간중심 작업 환경을 권장하는 관리정책 및 기업문화
- 나) 작업 공간 설계(Workplace design) : 인체공학적인 설계 및 배치
- 다) 환경 제어(Environmental control) : 인간과 잘 융화 될 수 있는 조명, 온도, 소음수준 유지
- 라) 사람의 선택(Personnel selection) : 직무에 적합한 사람의 선택

마) 훈련 및 표준 운용 절차(Training and standard operating procedures, SOPs)
: 작업자가 직무를 수행하기 위해 필요한 지식과 기술을 가지도록 하고
SOPs는 정확하고 우수사례를 통해 일관되어야 함

바) 내부 구성원의 관계(Interpersonal relationships) : 팀 구성 원간 필요한 정보
교환

사) 작업 장치(Job aids) : 이해 및 사용하기 쉬워야 함

아) 업무에 적합한 건강(Fitness for duty) : 작업자의 정신이 정상적이며, 집중
하여 안전하게 작업 능력을 발휘할 수 있다는 것을 확인

이들 8가지 요소들 중에서 위험제어에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 정책
및 문화, 작업 장소 설계와 같이 Fig. 47의 삼각형에서 넓은 면적을 차지하는
부분이다. 따라서 인적오류에 대한 RCOs는 이러한 부분의 변경을 제안하는 것
이 효과적인 방법이다.

HFACS 분류 및 베이지안 네트워크를 통해 확인된 인적오류의 위험을 예방
하거나 감소시키기 위한 RCOs는 브레인스토밍을 통해 Table 54와 같이 도출하
였다. 브레인스토밍을 위한 RCOs는 사전에 작성하여 이를 회의에서 제안하였
고 제안된 RCOs에 대한 합의를 구하는 방식으로 진행하였다. 더불어 브레인스
토밍을 통해 합의된 모든 RCOs를 적용할 수는 없기 때문에 빈도분석에서 위험
도가 높았던 항목과 베이지안 네트워크에서 확인된 주된 인적오류를 고려하여
전문가 합의를 통해 Table 54와 같이 RCOs의 우선순위를 결정하였다.

전문가 합의는 MSC 83/INF. 2에서 언급하고 있는 전문가 일치수준을 적용하
였다. 이는 앞서 PRS에 대한 FSA에서도 활용하였으며 수식 (4.4)를 적용하여
Table 54 및 Table 55와 같이 RCOs의 우선순위를 결정하였다. 각 RCOs Code에
대한 전문가 일치도 W는 RCOs A가 0.78, RCOs B는 0.91, RCOs C는 0.88,
RCOs D는 0.83)으로 계산되었다. IMO에 지침에 따르면 $W > 0.7$ 의 전문가 일
치도를 좋은 수준의 일치도로 보고 있다[46]. 사전에 제안된 RCOs와 전문가 일
치도 관련 계산 자료는 부록에 첨부하였다.

제안된 RCOs 중에서 선박에 DP 시뮬레이터를 설치하는 경우 이를 활용하여

다양한 방법으로 인적오류에 의한 위험을 감소시킬 수 있다는 것에 대해서 전문가들이 모두 동의하여 이와 관련된 RCOs들이 우선적으로 선정되었다.

Table 54 RCOs for Human errors

HFACS		Code	RCOs	P
Organizational influences	Resource Management	A1	DPO 교육과정의 강제화(STCW 협약)	1
		A2	DP 운용자 선발 및 능력평가 절차 수립	2
		A3	인적오류를 최소화할 수 있는 설계지침의 개발 및 적용	4
	Process	A4	DP선박 운용절차를 산업계의 기준을 바탕으로 최신화 하고 실제 적용 여부를 확인하는 절차 수립	3
		A5	DP선박 운용 감독의 효과 확인을 위한 절차 수립	5
Unsafe supervision	Inadequate Supervision	B1	DP 운용관련 지침의 숙지여부 확인 절차 수립	2
		B2	공식적인 DPO 운용 감독 절차의 수립 및 필요시 감독의 추가 배치	3
		B3	DPO 평가 및 능력 향상을 위한 절차 수립	4
		B4	상세한 DPO 선상/육상 교육 훈련 절차 수립	5
	Planned Inappropriate Operations	B5	DP 운용절차 개발 프로그램의 이용(TAM, SMOP etc.)	6
	Failed to Correct a known Problem	B6	DP 운용 비상대응 시뮬레이션 훈련 시행	1
Precondition for unsafe acts	Adverse Mental States	C1	주기적인 DP 운용 직무교대 절차 수립 및 시행	2
		C2	Leadership & Teamwork 교육을 통한 상황인식 훈련	3
		C3	DP선박 안전운용을 위한 최적 선교 인력배치 절차 수립	4
		C4	적절한 휴식시간 및 휴식시설 제공	5
	Crew Resource Mgt.	C5	DPO 채용시 언어능력 검증절차 수립 및 평가	1
Unsafe acts	Skill-based	D1	DP 운용 시뮬레이터 본선 설치 및 사전훈련 시행 (예 : DP 운용시 발생 가능한 고장에 대한 훈련 시나리오 개발 및 교육의 시행)	1
		D2	작업수행 절차 checklist 작성 및 운용중 확인	4
	Decision	D3	다양한 DP 운용 시나리오 개발 및 시뮬레이션 교육	2
		D4	DP 운용 비상대응훈련 시나리오 개발 및 교육 시행	3

Table 55 Priority of RCOs for Human errors

HFACS	High	Medium	Low
Organizational influences	A1, A2, A4	A3	A5
Unsafe supervision	B1, B2, B6	B3, B4	B5
Precondition for unsafe acts	C1, C2, C5	C3, C4	
Unsafe acts	D1, D3, D4	D2	

Table 54의 RCOs는 정책(Policies) 및 조직문화(Culture)와 관련된 RCOs들이 주로 선택되었으며, 이를 유효성 삼각형 8가지 요소로 분류하면 Table 56과 같다.

Table 56 Triangle of effectiveness categorization

RCOs Policies, Culture	
A1	DPO 교육과정의 강제화
A4	DP 운용 절차를 산업계의 기준을 바탕으로 최신화하고 실제 적용 여부를 확인하는 절차 수립
B1	DP 운용관련 지침 숙지여부 확인절차 수립
B2	공식적인 DPO 운용감독 절차수립 및 필요시 감독 충원
B5	DP 운용절차 개발 프로그램 이용(TAM, CAM etc.)
C1	주기적인 DP 운용 직무교대 절차 수립 및 시행
D2	작업수행절차 점검표(Checklist) 작성 및 운용 중 확인
RCOs Workplace Design	
D1	DP 운용 시뮬레이터 본선 설치 및 사전 훈련 시행 (예 : DP 운용시 발생 가능한 고장에 대한 훈련 시나리오 개발 및 교육시행)
RCOs Personal selection	
A2	DP 운용자 선발 및 능력평가 절차 수립
RCOs Training/SOPs	
C2	Leadership & Teamwork 교육을 통한 DP 운용 관련 상황인식 훈련 시행
D3	다양한 DP 운용 시나리오 개발 및 시뮬레이션 교육
D4	DP 운용 비상대응훈련 시나리오 개발 및 교육시행

제안된 RCOs의 적용을 통해 전문가들은 다음과 같이 위험이 감소한다고 보았다.

가) RCO A1 : NI에서 발행하는 DPO 자격증을 보유하지 않고 승선하는 DPO를 약 30%정도로 보고, DPO 교육의 강제화를 통해 30% 정도 위험이 감소하는 것에 동의하였다.

나) RCOs A4, B1 : 산업계에서 지속적으로 만들어지는 DP 운용절차를 최신화 하고 DPO가 이를 숙지하도록 하는 것을 통해 인적오류가 20% 감소하는 것으로 동의하였다.

다) RCOs B2 : 인적오류는 불안전 감독에 의해서 많이 발생하고 있었기 때문에 DP 운용 작업에 대한 적절한 감독을 통해 30%정도 위험이 감소하는 것으로 보았다.

라) RCOs B5 : DP 운용절차에 대한 전문 시스템의 활용을 통해 위험이 30% 감소한다고 보았다. (RCO A4와는 다른 전문적인 DP선박운용절차 임)

마) RCOs C1, D2 : 이는 현재 DP선박 운용시 시행되고 있는 부분이기거나 형식적으로 시행되는 비율이 20%정도 된다고 보고 감독자가 좀 더 철저히 확인함으로써 20%정도의 위험을 감소시킬 수 있다고 판단하였다.

바) RCOs D1, D3, D4 : 본선에 설치된 시뮬레이터를 이용하여 사전에 작업에 대한 모의운용을 통해 작업에 익숙하도록 하는 것이 매우 효과적일 것이라는 의견에 동의하였으며, 이를 통해 인적오류 빈도 및 위험이 50%정도 감소될 수 있을 것으로 보았다.

사) RCOs A2, C2, C5 : DPO의 능력을 지속적으로 평가하도록 하고 상황인식, 의사결정, 선교자원관리 등에 대한 교육으로 20%의 위험을 감소시킬 수 있다고 동의하였다.

제안된 RCOs에 의한 위험감소량을 정리하면 Table 57과 같다. 이를 바탕으로 위험감소량을 적용하면 Fig. 48과 같이 F-N선도가 그려진다. 단, 브레인스토밍을 통해 도출된 인적오류의 감소량은 정성적인 것이기 때문에 오차가 있을 수 있다는 한계는 있다.

Table 57 Risk reduction rates through RCOs

Risk reduction rate through RCOs			
RCOs	Types of RCOs	Risk reduction rates (Assumption)	HFACS categories
A1	Policies, culture	30%	Resource managements
A4		20%	Inadequate supervision
B1		20%	Inadequate supervision
B2		30%	Inadequate supervision
B5		30%	Planned inappropriate operations
C1		20%	Adverse mental states
D2		20%	Skill-based
D1	Work place design	50%	Skill-based
A2	Personal selection	20%	Process
C5	Training/SOPs	20%	Physical/Mental limitations
D1-1		50%	Skill-based
C2		20%	Adverse Mental status
D3		50%	Decision

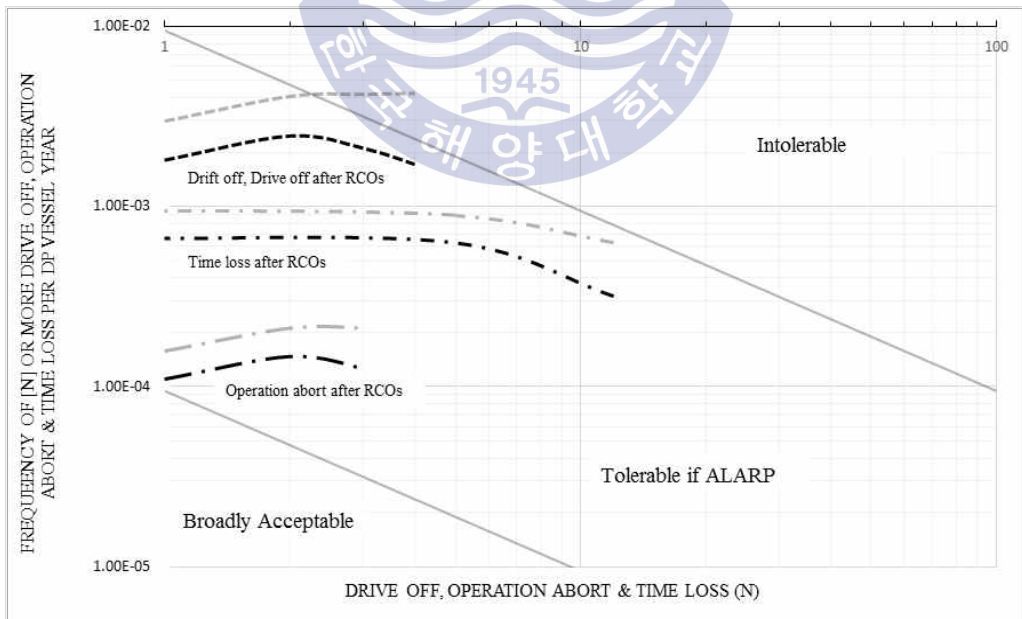


Fig. 48 F-N curve after apply RCOs for Human errors

Fig. 48을 보면 제안된 RCOs의 적용을 통해 Drift off 및 Drive off가 Tolerable if ALARP 범위 내에 들어온다는 것을 확인할 수 있다. 이는 제안된 RCOs가 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고위험의 빈도를 감소시키는데 합리적인 조치라는 것을 의미한다.

전문가의 브레인스토밍 결과에 편차가 있을 수 있음을 감안하면 제안된 RCOs를 적용하는데 있어서는 기본적으로 여러 가지 RCOs를 동시에 적용하는 것이 위험의 감소량을 극대화 할 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 예를 들어 DP 시뮬레이터의 설치를 통해 작업에 대한 사전 시뮬레이션교육 (50%감소), 긴급상황 대응교육(20%감소), 의사결정능력 향상교육(50%감소), 기술기반오류 감소교육(50%감소)등을 동시에 적용할 수 있으며, 이를 통해 전문가 의견을 바탕으로 약 50% 이상의 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고 위험을 감소시킬 수 있다.

2) 제안된 RCOs 상세 설명

(1) RCOs A1, A2, B1

RCO A1 : DPO의 교육 및 증서 발행은 Nautical Institute⁹⁾가 수행하고 있다 [59]. 그러나 NI가 적용하는 교육 및 훈련 절차는 해기사 면허와 같이 강제사항이 아니기 때문에 DPO는 관련 교육을 받지 않고도 DP선박에 승선할 수 있다. 이러한 경우에는 DPO에 대한 능력 검증이 어렵고 이것이 DP선박의 안전 운용에 있어 큰 위험 요소로 작용할 수 있다.

RCO A2 : DPO 증서를 보유하고 있다고 하더라도 DPO가 해양플랜트분야 다양한 DP선박의 운용에 적합한 능력을 보유했다고 볼 수는 없다. 예를 들어 Anchor handling vessel에 승선했던 DPO가 Drill-ship에 승선하여 바로 직무를 수행할 수는 없다. 따라서 DPO를 선택하고 배승할 때는 RCO A2와 같이 이들의 능력을 검증하는 절차를 수립하여 시행할 필요가 있다[55].

RCO B1 : DPO를 채용하거나 채용후 이들의 능력을 평가하고 확인하는 절차

9) 영국에 소재한 선박 운항 및 안전에 대한 연구 수행 협회

를 수립하여 시행하는 것으로 이는 쉽게 각 회사가 자체적으로 수립하여 시행할 수 있다[55].

(2) RCOs A4, B2, B5, C1, D2

RCO A4 : 산업계에는 많은 DP선박 운용절차를 개발하여 적용하고 있으나 이러한 사항의 숙지 여부를 검증하는 데에는 한계가 있기 때문에 관련 사항을 검증할 수 있도록 관련 내부 절차 수립이 필요하다.

RCO B2 : IMCA M 117 문서에 의하면 Senior DPO가 Junior DPO의 감독 역할을 하도록 되어 있으나 DPO 스스로가 관련 증서를 보유하고 있지 않은 상태로 승선한다면 이러한 권고자체가 의미가 없다고 할 수 있다. 따라서 이러한 절차를 회사 차원에서 시스템화하여 적용할 필요가 있다.

RCO B5 : 산업계에서는 SMO(Safest Mode of Operation), WSOG(Well Specific Operating Guidances), ASOG(Acitivity Specific Operating Guidelines), CAM(Critical Activity Mode), TAM(Task Appropriate Mode) 등 DP선박의 안전운용과 관련된 절차를 개발하여 사용하고 있으나 모든 DP선박들이 이러한 절차를 적용하고 있지는 않다[14][18]. 따라서 전문적으로 개발된 DP 운용절차를 모든 DP선박의 운용에 적용한다면 안전운용에 도움이 될 것이다[14].

(3) RCOs D1, D3, D4

RCOs D1, D3, D4 : DP선박 운용 시뮬레이터를 본선에 설치하고 이를 활용하여 작업 수행전 시뮬레이션을 통해 작업에 대해서 미리 숙지하도록 하면 DP선박의 안전운용에 도움이 될 것이다. 이는 비용편익평가와 함께 고려되어야 하므로 FSA Step 4에서 이를 확인할 필요가 있다.

(4) RCOs C2, C5

RCOs C2, C5 : 리더십 및 팀워크 교육은 STCW 협약에 의한 강제교육사항으로 인적요소 측면에서 의사결정, 긴급 상황대응, 자원관리, 조직문화 등과 같은 교육을 통해 인적오류를 감소시킬 수 있다.

5.3.4 비용편익평가

1) 비용편익평가의 기준

제안된 RCOs의 비용편익을 확인하기 위해서는 앞서 4장과 동일하게 GCAF를 적용한다. 제안된 대부분의 RCOs들은 비용이 거의 소요되지 않는 RCOs이기 때문에 비용편익평가는 RCOs A1 및 D1만 적용하였다.

RCOs A1 및 D1에 대한 비용편익평가는 다음과 같이 수행하였다.

가) 브레인스토밍을 통해 DPO 교육의 강제 적용을 통해 기대되는 위험도 감소량은 30%로 적용함

나) 브레인스토밍을 통해 DP 시뮬레이터를 설치함으로써 기대되는 위험도 감소량은 50%로 적용함

다) DP 시뮬레이터의 설치 및 유지비용은 DPS 제조사로부터 확인함(RCOs 적용으로 소요되는 비용 ΔC 는 NPV로 구함, 수식 (5.2) 참조)

라) RCOs에 대한 GCAF를 구함(수식 (4.5) 참조)

$$\Delta R = T \times \Delta PLOP \quad (5.1)$$

$$NPV = A + \frac{X_1}{(1+r)} + \frac{X_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{X_T}{(1+r)^T} = A + \sum_{t=1}^T \frac{X_t}{(1+r)^t} \quad (5.2)$$

여기서, ΔR 는 시뮬레이터 전체 사용기간 동안의 위험도 감소량, $\Delta PLOP$ 는 RCOs 적용후 DP선박의 잠재적 LOP사고 위험도 감소량, X_t 는 RCOs 적용에 따른 시간 t 에서의 소요비용 또는 이득, A 는 RCOs 적용 초기 비용, r 는 감가상각비(시뮬레이터는 10%적용, DPO 교육은 적용하지 않음), T 는 DP 시뮬레이터 사용가능기간(10년) 또는 DPO 교육유효기간(5년)이다.

2) 제안된 RCO에 대한 비용편익평가

(1) RCO A1

DPO 교육요건을 STCW 협약에 의한 강제교육으로 적용할 경우 교육비 전체는 1인당 10,000 US\$로 확인하였고, 이것의 유지비 및 감가상각비는 없다. 이를 바탕으로 비용편익평가를 수행하였으며, 그 결과 Table 58과 같이 GCAF가 1,234,568 US\$로 확인되었다.

Table 58 Cost-benefit assessment for RCO A1

RCO A1	Initial F	% Reduction	F Reduction	PLOP
Drive off	4.26^{-3}	30%	1.28^{-3}	2.98^{-3}
Operation abort	2.10^{-4}	30%	6.31^{-5}	1.47^{-4}
Time loss	9.46^{-4}	30%	2.84^{-4}	6.62^{-4}
Total	5.41^{-3}		1.62^{-3}	3.79^{-3}
		Risk reduction ΔR	Cost(US\$) ΔC	GCAF(US\$)
RCO A1		8.1^{-3}	10,000	1,234,568

IMO의 기준에 의하면 GCAF가 3,000,000 US\$ 이하이면 비용대비 효과가 있는 것으로 보고 있다[18]. 따라서 DPO 교육의 강제화는 비용편익 측면에서도 합리적인 방안이라고 할 수 있다.

(2) RCOs D1, D3, D4

DP 시뮬레이터의 초기 설치비용은 제조사를 통해 1,000,000 US\$, 1년 유지비용은 10,000 US\$, 감가상각비는 10%로 확인하였다. 이를 바탕으로 DP 시뮬레이터의 설치에 대한 비용편익평가를 수행하였으며, 그 결과 Table 59와 같이 GCAF가 20,717,552 US\$로 확인되었다.

Table 59 Cost-benefit assessment for RCO D1

RCO D1	Initial F	% Reduction	F Reduction	PLOP
Drive off	4.26 ⁻³	50%	2.13 ⁻³	2.13 ⁻³
Operation abort	2.10 ⁻⁴	50%	1.05 ⁻⁴	1.05 ⁻⁴
Time loss	9.46 ⁻⁴	50%	4.73 ⁻⁴	4.73 ⁻⁴
Total	5.41 ⁻³		2.71 ⁻³	2.71 ⁻³
		Risk reduction △R	Cost(US\$) △C	GCAF(US\$)
RCO D1		2.71 ⁻²	561,446	20,717,552

IMO의 기준에 따르면 GCAF가 3,000,000 US\$ 이하이면 비용대비 효과가 있는 것으로 보고 있다[18]. DP 시뮬레이터의 설치에 대한 GCAF는 동 범위를 넘어서기 때문에 위험량의 감소에는 효과적이나, 비용편익 측면에서는 선주가 합리적으로 판단하여 시행할 필요가 있다.

5.3.5 권고

DP선박 LOP사고의 인적오류에 대한 FSA를 수행한 결과 인적오류를 감소시키기 위한 권고는 다음과 같다.

(가) DPO 교육 강제화(RCO A1) : STCW 협약 Section B-V/f조에 따르면 DPO에 대한 교육은 권고로 하고 있다. 따라서 이를 STCW 협약 Section A-V “특정 선박에 승선하는 승무원에 대한 교육훈련요건”으로 이관하여 관련 교육을 강제화할 필요가 있다. 이는 앞서 비용편익 측면에서도 효과가 있는 것으로 확인되었다.

(나) DP선박 시뮬레이터 설치(RCOs D1, D3, D4) : DP 시뮬레이터를 본선에 설치하여 작업에 대한 시뮬레이션을 수행하고 사전에 작업의 위험들을 파악하여 실제 운용시 발생할 수 있는 인적오류에 의한 사고위험을 감소시킨다. 비용편익 측면에서는 합리적이지 않다는 결론이 도출되었으나 위험감소에 대한 효과는 매우 우수하여 운용자의 합리적인 판단으로 적용할 필요가 있다.

(다) DP 안전운용관련 절차의 숙지 및 최신화(A2, A4, B1, B2, B5) : DPO의 안전운용관련 절차의 숙지 여부를 확인하고, 회사 내부적으로 산업계에서 만들어지고 있는 DP선박 안전운용지침을 최신화하는 절차를 수립하여 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고를 감소시킬 필요가 있다.

5.4 소결론

본 장에서는 DP선박의 안전운용을 위해 3장에서 식별된 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고에 대해 HFACS와 베이지안 네트워크를 사용하여 FSA를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 기술기반 오류에 의한 Drift off 및 Drive off의 조건부 가능성이 각각 74.3%로 가장 높게 나타났으며, 부적절한 감독에 의한 Drift off, Drive off, Operation abort 및 Time loss 등의 조건부 가능성도 50.5%로 높게 나타났다. 따라서 기술기반 오류 및 부적절한 감독이 높은 확률로 사고에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 빈도분석 및 베이지안 네트워크 분석을 바탕으로 F-N선도를 그려본 결과 Drift off 및 Drive off의 일부가 인적오류에 의한 LOP사고 위험의 합리적인 수용가능 경계를 넘어서는 부분이 있음을 확인할 수 있었다. 인적오류에 의한 DP선박 LOP사고의 위험을 합리적인 수용가능 범위 이내로 감소시키기 위해 STCW 협약에 의한 DPO 교육의 강제화, DP선박 시뮬레이터의 설치, DP선박 안전운용절차의 숙지를 위한 대책 마련, DP선박 안전운용절차의 최신화 등이 RCOs로 제안되었다. 또한, 제안된 RCOs를 적용한 결과 인적오류에 의한 LOP사고의 위험이 약 50% 정도 감소함을 확인하였다.

셋째, RCOs를 적용한 결과 F-N선도에서 Drift off 및 Drive off가 수용가능 범위 이내로 들어오는 것을 확인하였다. 아울러 제안된 RCOs 중에서 DPO 교육의 강제화는 비용편익 측면에서 합리적임을 확인하였고, DP 시뮬레이터의 설치 위험감소량이 비교적 큰 편이지만 비용편익 측면에서는 선주가 합리적으로 판단하여 시행할 필요가 있다.

넷째, 인적오류에 대한 FSA를 수행함에 있어서 HFACS와 베이지안 네트워크는 인적오류에 의한 사고위험의 분석에 유용하게 사용할 수 있는 도구임이 확인되었다.



제6장 결 론

본 논문에서는 DP선박의 안전운용과 직결된 LOP사고의 주된 원인을 식별하고, 이에 대한 대응방안을 강구하기 위해 FSA를 수행하였다. 효과적인 FSA의 수행을 위해 베이지안 네트워크와 HFACS를 도구로 사용하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, DP선박 LOP사고의 주된 원인을 식별하기 위하여 10년(2001~2010) 동안 IMCA에 보고된 612건의 DP선박 LOP사고 보고서를 분석하였다. 그 결과 PRS 오류가 22.1%, DP 컴퓨터 오류 16.2%, 동력시스템 문제 15.9%, 추진장치 문제 15.2%, 인적오류 11.8% 빈도로 DP선박 LOP사고에 영향을 주었음을 식별하였다. 이에 따라 DP선박 LOP사고에 가장 주된 원인으로 작용하는 요소는 PRS 오류임을 확인하였다. 또한, 사고보고서를 상세히 분석해 본 결과 61.2%(375건)의 LOP사고가 인적오류와 직/간접적으로 관련되어 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 DP선박에서는 PRS 및 인적오류가 LOP사고에 가장 주된 원인으로 작용하고 있음을 확인하였다.

둘째, DP선박 LOP사고에 주된 영향을 미치는 원인에 대해 FSA를 수행하고 이에 대한 RCOs를 제안하기 위해 3장의 분석결과를 바탕으로 베이지안 네트워크를 사용하여 PRS에 대한 FSA를 수행하였다. 그 결과 DP선박의 Drive off사고에 대한 종류별 PRS 오류의 조건부 가능성은 DGPS 57.0%, HPR 31.7%, Microwave reference 16.9%임을 확인하였다. 더불어 이러한 PRS 오류의 원인으로는 신호가 약하거나 막히는 문제, 하드웨어 문제 및 외부환경의 영향 등이 확인되었다. PRS 오류에 의한 DP선박 LOP사고에 대한 빈도분석 및 베이지안 네트워크 분석을 통해 F-N선도를 그려본 결과 Drive off 및 Time loss의 일부가 합리적 수용가능 경계를 넘어가고 있음을 확인하였으며, 이에 대한 RCOs는 다음과 같이 제시되었다.

- DGPS를 설치하고 있는 DP선박의 경우 HPR 또는 Taut-wire의 추가 설치

- DGPS와 Microwave reference를 설치하고 있는 DP선박의 경우 추가 PRS로 HPR 설치
- DGPS와 HPR을 설치하고 있는 DP선박의 경우 추가 PRS로 Taut-wire 설치
- DP선박에 설치된 PRS 장치 및 DP시스템에 대한 제조사 교육

모든 DP선박에 2종류 이상의 PRS 설치라는 RCO의 적용 효과를 검증하기 위해 이를 DP시뮬레이터에 적용해본 결과 17%의 LOP사고 위험감소를 확인하였다. 또한 브레인스토밍을 통해 PRS에 대한 제조사 교육으로 30% 정도의 LOP사고 위험이 감소될 수 있음을 확인하였다. 이를 F-N선도에 적용하여 확인해본 결과 PRS 오류에 의한 LOP사고의 위험이 합리적인 수용가능 범위 이내로 들어왔으며, 제시된 RCOs는 비용편익 측면에서도 합리적임을 확인하였다.

셋째, DP선박 LOP사고에 주된 영향을 미치는 인적오류에 대해 FSA를 수행하고 이에 대한 RCOs를 제안하기 위하여 3장의 분석결과를 바탕으로 HFACS와 베이지안 네트워크를 사용하여 FSA를 수행하였다. 그 결과 기술기반 오류에 의한 Drift off 및 Drive off의 조건부 가능성이 각각 74.3%로 가장 높게 나타났으며, 부적절한 감독에 의한 Drift off, Drive off, Operation abort 및 Time loss 등의 조건부 가능성도 50.5%로 높게 나타났다. 따라서 기술기반 오류 및 부적절한 감독이 높은 확률로 사고에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

인적오류에 의한 DP선박 LOP사고에 대한 빈도 및 베이지안 네트워크 분석을 바탕으로 F-N 선도를 그려본 결과 Drift off 및 Drive off의 일부가 설정된 수용가능 범위를 넘어서고 있음을 확인하였으며, 이에 대한 RCOs는 다음과 같이 제시되었다.

- STCW 협약에 의한 DPO 교육의 강제화
- DP 시뮬레이터 설치를 통한 작업, 비상대응, 의사결정, 상황인식 교육 등에 대한 선상교육 시행
- DP선박 안전운용절차의 숙지를 위한 대책 마련과 동 절차의 최신화

제시된 RCOs를 적용한 결과 F-N선도에서 Drift off 및 Drive off가 수용가능 범위 이내로 들어오는 것을 확인하였다. 아울러 제안된 RCOs 중에서 DPO 교

육의 강제화는 비용편익 측면에서 합리적임을 확인하였고, DP 시뮬레이터의 설치 위험감소량이 비교적 큰 편이지만 비용편익 측면에서는 선주가 합리적으로 판단하여 시행할 필요가 있다.

넷째, DP선박 LOP사고의 주된 원인으로 확인된 PRS 오류 및 인적오류에 대한 FSA를 수행함에 있어서 HFACS와 베이지안 네트워크는 관련된 위험을 식별하고 분석하는데 매우 유용한 도구임을 확인하였다.

본 논문에서 수행된 FSA와 관련된 한계는 다음과 같다. 첫째, 분석에 사용된 DP선박 LOP사고 보고서가 사망, 재산손실 및 환경피해와 관련된 자료를 내포하고 있지 않다. 둘째, DP선박의 운용에 대한 사회적 위험도와 개인 위험도에 대한 허용기준이 없어 LOP사고의 빈도에 따른 기준을 적용하였다. 셋째, 브레인스토밍에 DP선박 운용자뿐 아니라 시스템 설계자, 조선공학자 등 다양한 분야의 전문가가 필요하지만 국내에서 전문가 확보가 어려워 한정된 인원만이 참가하였다.

지금까지 다양한 선박에 FSA가 적용되어 왔지만 DP선박과 같은 특수선박에 대한 FSA 적용은 거의 없었다. 따라서 앞으로 특수선박에 대한 FSA 적용 연구가 더 필요하며 특히, DP선박의 경우에는 Drill-ship, OSV, DSV 등 종류 별로 분류하여 FSA를 적용한다면 각 선종에 적합한 RCOs를 제안할 수 있을 것이다.

나아가 최근 선박사고와 관련하여 인적요인의 중요성이 점점 더 크게 부각됨에 따라, 인적요인과 관련된 연구 및 인적요인을 고려한 FSA의 적용 연구가 필요하다. 아울러 특수선박의 사고와 관련된 사회적, 개인적 수용 가능한 ALARP 기준과 관련된 연구도 필요하다.

Acknowledgement

졸업 후 해기사로써 1급 항해사면허는 있어야겠다는 생각에 7년간 탱커에 승선하고 학계에 발을 들인지 10년이 되었습니다. 그동안 나름 열심히 일과 학업을 병행하며 석사를 두번 하고서 이제 학위논문을 마무리합니다. 논문을 쓰며 제자신의 부족함을 더욱 절실히 느꼈고 이러한 부족함을 채우기 위해 앞으로 무엇을 위해 더 노력해야할까라는 고민부터 하게 되었습니다. 박사학위는 끝이 아니라 시작이라는 말을 귀가 닳도록 들어 왔는데 이제야 그 진정한 의미를 이해하게 되었습니다. 직접 경험해봐야 그 진정한 의미를 깨닫는 진리를 미리 마음과 머리에 새겼더라면 더 빨리 경험하여 더 발전 할 수 있는 기회가 있었을 텐데 라는 아쉬움을 가져 봅니다.

학부시절부터 지금까지 저의 모든 삶과 어려움을 아시고 제자로서 뿐만 아니라 인생의 스승으로서 끝임없는 조언을 아끼지 않으셨으며 이제 학위논문을 마무리하기까지 부족한 제자를 이끌어주신 정연철 지도교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

석사학위에도 심사 위원으로 조언해주시고 박사 학위에서는 심사위원장으로 부족한 논문에 대해 다양한 시각으로 평가해주시고 조언해 주신 예병덕 교수님께 또한 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 어렵고 힘든 일에도 솔선 수범하셔서 늘 후배에 모범이 되시는 교수님께 마음으로 존경의 말씀을 전해 드립니다.

더불어 승선생활을 마치고 한국해양대학교 지도관으로 근무시절 많은 조언과 도움을 주시고 이번 학위논문에 심사위원으로 여러 조언을 해 주신 문성배 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한 논문을 잘 다듬어 주시기 위해 많은 조언을 아끼지 않으셨던 박준범 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

고등학교 3학년 시절 전투기 파일럿이 되고자하는 꿈을 접고, 진로를 고민하던 중 우연치 않게 한국해양대학교를 입학하였으나 졸업이후 지금까지 단 한 번의 실망과 후회가 없도록 해준 모교 한국해양대학교와 재학시절 저에게 많은

지식들을 전달해 주신 김세원 교수님, 정태권 교수님, 전승환 교수님, 김창제 교수님, 공길영 교수님, 박진수 교수님, 김시화 교수님 및 운항학과이었기 때문에 기관관련 지식을 전달해 주셨던 모든 기관계열 교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다.

또한 해사분야에서 제가 할 수 있는 역할을 찾을 수 있도록 다양한 기회를 주신 한국해양수산연수원 원장님과 김경석 교수님, 배석한 교수님, 장은규 교수님 및 많은 선후배 교수님들께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

아들의 성인으로써의 삶을 보지 못하시고 일찍 하늘로 가신 아버지와 대학입학이후부터 세 자식들을 키우시기 위해 말할 수 없는 고생을 하신 어머님께도 머리 숙여 감사의 큰절을 올려 드립니다. 어려운 여건 때문에 자식의 교육에 대해서는 많은 신경을 쓰시지 못했지만 학창시절 성장하며 보아온 부모님의 성실함과 강인함이 저에게는 가장 큰 교육이었습니다.

방학이라고 휴가한번 가지 못하고 결혼 이후 지금까지 많이 챙겨주지 못했음에도 남편을 믿고 집안일들을 챙겨가며 내조해준 사랑하는 아내 이지영 에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 매일 늦게 퇴근하는 아빠를 기다리다 잠들던 일이 흔해서 이제는 일찍 퇴근해서 가는 것을 이상하게 여기는 두 아들 민석, 민재에게도 미안한 마음과 함께 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

받은 것이 많기에 이제는 서서히 주면서 살아야겠다는 다짐과 함께 신뢰를 저버리지 않고 항상 제가 있는 자리에서 묵묵히 나라와 소속된 기관과 가족을 위해 최선을 다하는 사람이 되겠습니다.

References

- [1] 이종갑 외, 2011. 국적일반화물선 초기안전성평가(High-level FSA) 연구(1), 한국항해항만학회지 제34권 제3호, p. 219.
- [2] 이종갑 외, 2011. 국적일반화물선 초기안전성평가(High-level FSA) 연구(2), 한국항해항만학회지 제35권 제1호, pp. 23-30.
- [3] 채종주, 2014. Dynamic Positioning System 운용 개론, 해광출판사, pp. 38-39, p. 42, p. 55, pp. 58-59, pp. 81-82, pp. 86-138, p. 356.
- [4] 한국해양수산개발원, 2012. Measures to Encourage OSV Market Entrance for National Wealth Creation(국부창출을 위한 OSV 시장진출 활성화 방안 연구), p. 39.
- [5] 한국해양수산연수원, 2013. 해양플랜트 인력양성 중장기 발전전략 수립 연구, p. 63.
- [6] A. K. Adnanes et al, 1997. Marine Technology Society, Dynamic Positioning Conference. Essential Characteristics of Electrical Propulsion and Thruster Drives in DP Vessels, p. 9.
- [7] A. Rothblum et al, 2002. Improving Incident Investigation through Inclusion of Human Factors. University of Nebraska, U.S Department of Transportation, pp. 24-40, pp. 107-109.
- [8] ABS, 2012. Guide for Dynamic Positioning Systems, pp. 8-12, p. 21, p. 30.
- [9] BAYESFUSION, LLC, 2015. Data Analytics, Mathematical Modeling, Decision Support.
<http://www.bayesfusion.com/#!/downloads/rxu9q>.
- [10] C. J. Chae and Y. C. Jung, 2015. An Analysis on Incident cases of Dynamic Positioning Vessels, J. Navig. Port Res, Vol. 39, No. 3, pp. 150-153.
- [11] C. J. Chae, 2015. A study on dynamic positioning system IMO Class upgrade requirements, KINPR Press, Vol. 39, No. 3, pp. 166-168.

- [12] C. J. Chae, 2015. A study on Human Error of DP vessels LOP Incidents, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 21, No.5, pp. 516-522.
- [13] CLARKSON, 2012. Overview of the Offshore Supply Vessel Industry, p. 10.
- [14] DNV, 2011. Dynamic Positioning Systems operation guidance DNV RP E307 recommended practice, pp. 36-38, pp. 81-85.
- [15] DNV, 2011. Rules for Classification of ships, New-buildings Special Equipment and Systems – Additional Class, Dynamic Positioning Systems, part 6 chapter 7, pp. 8-10, pp. 20-24.
- [16] DNV, 2012. Dynamic Positioning Vessel Design Philosophy Guidelines, DNV-RP-E306, p. 16.
- [17] DNV, 2013. Competence of Dynamic Positioning Operators(DPO), Standard for certification No. 3.322, pp. 9-22.
- [18] DPC, 2012. DP operations guidance, prepared through the Dynamic Positioning Committee of the Marine Technology Society to aid in the safe and effective management of DP operations, pp. 36-43.
- [19] F. J. Griggs, 2012. A Human Factors Analysis and Classification System(HFACS) Examination of Commercial Vessel Accidents, Naval Postgraduate school, Monterey, California, p. 22, p. 81.
- [20] Global Maritime, 2009. FMEA DSV ADAMS CHALLENGE, Adams Offshore Services Limited, UK, pp. 65-66.
- [21] Global Maritime, 2013. FMEA of OSV "RELUME" for MENAS, 24025-0912-16117, Revision 9, Tabulated failure modes, pp. 38-39.
- [22] Health and Safety Executive, 2015. Guidance on ALARP Decisions in Control of Major Accident Hazards(COMAH).
http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/permissioning/spc_perm_37/
- [23] H.T. Kim et al, 2011. A Case Study of Marine Accident Investigation and

Analysis with Focus on Human Error), Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 137-150.

- [24] IEC, 2006. International standard, Analysis techniques for system reliability– Procedure for Failure Mode and Effects Analysis(FMEA), IEC 60812, p. 8, pp. 19-20, pp. 24-27.
- [25] IEC, 2009. Risk assessment techniques, risk management, international standard, IEC/FDIS 31010, pp. 21-27, p. 76, pp. 51-53. pp. 79-81.
- [26] IMCA, 2006. The Training and Experience of Key DP Personnel, M 117 Rev 1, pp. 9-12.
- [27] IMCA, 1994. Risk analysis of collision of Dynamically positioned support vessel with offshore installation, pp. 16-20.
- [28] IMCA, 1994. Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems, M 113, IMO MSC Circular 645, pp. 4-13.
- [29] IMCA, 2003. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2001, DPSI 12, IMCA M 169, p. 13, pp. 25-127.
- [30] IMCA, 2004. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2002, DPSI 13, IMCA M 173, p. 8, pp. 13-76.
- [31] IMCA, 2005. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2003, DPSI 14, IMCA M 177, p. 2, pp. 13-63.
- [32] IMCA, 2006. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2004, DPSI 15, IMCA M 183, p. 4, pp. 15-53.
- [33] IMCA, 2006. Introduction to Dynamic Positioning. p. 9, p 15.
- [34] IMCA, 2007. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2005, DPSI 16, IMCA M 186, p. 4, pp. 15-55.
- [35] IMCA, 2008. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2006, DPSI 17, IMCA M 192, p. 5, pp. 10-72.
- [36] IMCA, 2009. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2007, DPSI 18, IMCA M 198, p. 7, pp. 11-78.

- [37] IMCA, 2010. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2008, DPSI 19, IMCA M 207, p. 3, pp. 10-111.
- [38] IMCA, 2011. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2009, DPSI 20, IMCA M 211, p. 4, pp. 8-82.
- [39] IMCA, 2012. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents, Incidents reported for 2010, DPSI 21, IMCA M 218, pp. 4-5, pp. 9-64.
- [40] IMO, 2000. Formal Safety Assessment, Decision parameters including risk acceptance criteria, pp. 3-10, p. 20.
- [41] IMO, 2005. Passenger ship Safety, Effective Voyage Planning for Passenger ship's, FSA-Large Passenger Ships-Navigational Safety, Norway. Nav 51/10, pp. 36-37.
- [42] IMO, 2006. Formal Safety Assessment, Consideration of utilization of Bayesian network at step 3 of FSA, Evaluation of the effect of ECDIS, ENC and Track control by using Bayesian Network, Japan. MSC 81/18/1, pp. 2-4.
- [43] IMO, 2006. Formal Safety Assessment, Possible improvements on FSA guidelines, MSC 82/INF. 3, p. 5, pp. 14-15.
- [44] IMO, 2007. Formal Safety Assessment, FSA – container vessels, Denmark. MSC 83/21/2, pp. 16-17.
- [45] IMO, 2007. Formal Safety Assessment, FSA – Liquefied Natural Gas(LNG) carriers, Denmark. MSC 83/21/1, pp. 15-17.
- [46] IMO, 2007, Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment for use in the IMO rule-making process MSC 83/INF. 2, pp. 49-55, pp. 60-62.
- [47] IMO, 2008. Formal Safety Assessment(FSA)-Crude Oil Tankers, MEPC 58/17/2, p. 116.
- [48] IMO, 2008. Formal Safety Assessment, FSA – Crude Oil Tankers,

- Denmark. MEPC 58/INF. 2, p. 132, pp. 136-137.
- [49] IMO, 2008. Formal Safety Assessment, FSA – Cruise ships, Denmark. MSC 85/17/1, pp. 18-19.
- [50] IMO, 2011. STCW Convention and STCW code. Section B-V/f, Guidance on the training and experience for personnel operating dynamic positioning systems, pp. 341-342.
- [51] IMO, 2013. MSC-MEPC. 2/Circ.12. Revised guidelines for formal safety assessment(FSA) for use in the IMO Rule-making process, p. 3, p. 11, p.15, pp. 25-27, p. 45, p 50, p. 53.
- [52] IMO, 2015. MSC-MEPC. 2/Circ.12/Rev.1, Revised guidelines for formal safety assessment(FSA) for use in the IMO Rule-making process, pp 64-65.
- [53] Institute of Shipping Economics and Logistics(ISL), 2012. Shipping Statistics and Market Review, Vol 56, No 9/10, pp. 5-6.
- [54] J. B. Yim, 2009. Development of Quantitative Risk Assessment Methodology for the Maritime Transportation Accident of Merchant Ship, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 33, No. 1, p. 13.
- [55] John M, 2006, Dynamic Positioning Conference, DPO assessment and improvement, pp. 4-6.
- [56] K. S. Hauff, 2014. Analysis of Loss of Position Incidents for Dynamically Operated Vessels, Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, NTNU – Trondheim. pp. 12-13, p. 24, pp. 47-49.
- [57] M. Horny, 2014. Bayesian Networks, Boston university school of public health department of health policy & management, Technical report No. 5, pp. 3-5.
- [58] Marvin R, 2011, Risk assessment theory, methods and Applications, Wiley A John Wiley & Sons, INC., publication pp. 214- 263, pp.265-336, pp. 339-359.
- [59] Nautical Institute, 2014. Dynamic Positioning Operator Training Scheme

Accreditation Standard, p. 9, pp. 81-85.

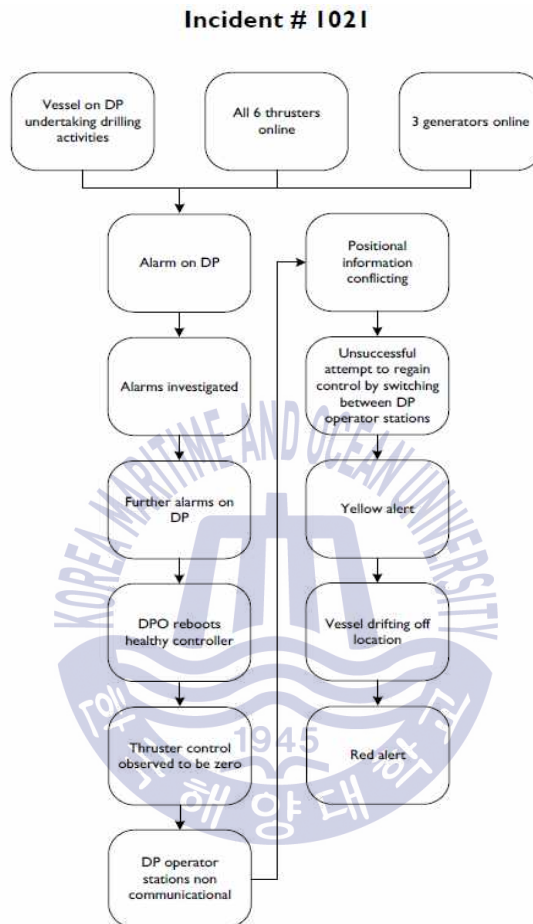
- [60] OECD, 2014. Offshore Vessel, Mobile Offshore Drilling Unit & Floating Production Unit Market Review. Council working party on shipbuilding, pp. 7-8.
- [61] Runar Nikolai Pedersen, 2015. QRA Techniques on Dynamic Positioning Systems During Drilling Operations in the Arctic: with Emphasis on the Dynamic Positioning Operator, pp. 1-3. p. 26.
- [62] S. A. Shappell and D. A. Wiegmann, 2000. The Human Factors Analysis and Classification System-HFACS, U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, pp. 3-12.
- [63] Shi Phillips and Martinez, 2005. Case Study of DP Vessels Performing SIMOPS, DYNAMIC POSITIONING CONFERENCE, p. 2.
- [64] Sorensen, L. J. et al, 2014. Understanding Human Decision Making During Critical Incidents in Dynamic Positioning, Department of Maritime Technology and Innovation Marine Human Factors Group, Vestfold University College, pp. 1-7.
- [65] USCG, 2011. Report of Investigation into the Circumstances Surrounding the Explosion, Fire, Sinking and Loss of Eleven Crew Members Aboard the Mobile Offshore Drilling Unit DEEPWATER HORIZON in GULF OF MEXICO Volume I, pp. 1-28.

Appendix 1 Brainstorming Group

DPO	Changsoo, KIM	Vantage Drilling Drillship DPO 1. 2nd MATE / DPO (Sep. 2008 ~ Sep. 2010) - DPO (Nov. 2011 ~ present) 2. DP Unlimited Certificate, 1st class deck officer (Master's) 3. 6 years of experience in offshore field 4. Valid BOSIET/HUET (OPITO) 5. Master's degree in Shipping Management, Korea Maritime and Ocean University.
DPO	Woehyen, PARK	Vantage Drilling Drillship DPO 1. 2nd MATE/DPO(Dec.2011~Jul.2012) 2. 3rd Mate/ADPO(Oct.2012~Nov.2013) 3. 2nd Mate/DPO(Nov.2016~Present) 4. Holder of DP Unlimited Certificate. (Kongsberg/Converteam system experienced) 5. Involved offshore field since 2011
Superintendent STX Marine Service	E Wan, KIM	STX Marine Service 1. Sep 2009 ~ Jan 2012(Officer) - In charge of Navigational watch, DPO, Ice navigator - Controlled Deck Part, Passenger safety Feb 2012 ~ 2. July 2015(Marine Superintendent) - In charge of assisting vessel safe operation - Monitoring Cargo Operation - Assisting Major Inspection (OVID)
DPO Instructor	Joseph Vinod	C-MAR Group - DPO Instructor and Training Manager - Vice-Chairman of DPTEG - Master of OSVs(1990) - Chairman of World DP instructor conference
Person In charge of DP Training in KIMFT	Chongju, CHAE	Associate Professor of KIMFT - Master's Licence - DP Induction course(UK) - DP Advanced course(Singapore) - DP Sea time reduction course(USA) - NEBOSH IGC - Team Manager of Offshore Training Team - Master degree of Ship Navigation(KMU) - Master degree of Maritime Safety and Environment Administration (WMU)

Appendix 2 DP LOP incidents reports sample(PRS, Human error)

(1) LOP incidents reports sample(human error)

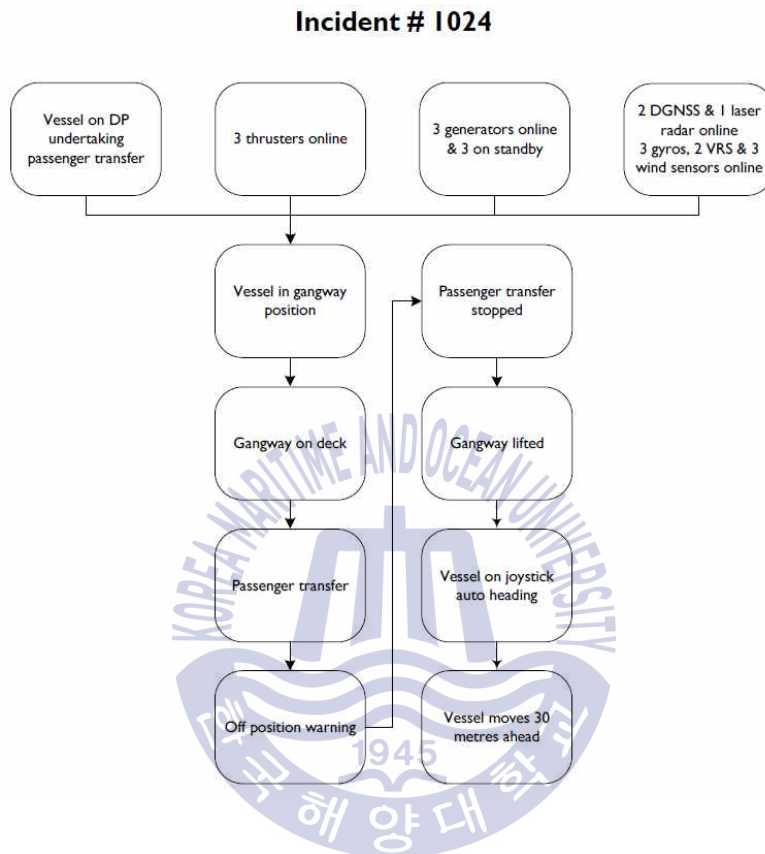


Comments : DPO mistakenly connected the operator station that was in command to back up DP and failed reconnect main DP controllers. While troubleshooting an alarm both main DP controllers were rebooted

Initiating Event : Human error – Both controllers were rebooted leaving nothing in command

Main Cause : Computer – Only two controllers installed on main DP system

(2) LOP incidents reports sample(PRS)



- Comments : Laser radar system detected false reflective target of group of 40 to 50 persons in life vests and coveralls quipped with reflective tape
- Initiating Event : Off position warning
- Main Cause : Reference-Reflector wrongly placed close to foot traffic
- Secondary Cause : Reference-Intensity of reflector from undesired target causing target swap

Appendix 3 RCOs

(1) Suggested RCOs for PRS errors

PRS Types	No.	RCOs
DGPS	A1	DP Class 2 이상의 선박에 보완 가능한 PRS 설치
	A2	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	A3	DGPS 제조사 교육 의무화
	A4	독립된 DGPS에 2개 이상의 Spot beam 위성 Service 사용
	A5	소프트웨어의 주기적 원격 점검 시스템 의무화
Artemis	B1	DP Class 2 이상의 선박에 보완 가능한 PRS 설치
	B2	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	B3	Artemis 제조사 교육 의무화
	B4	FMEA에 안테나의 설치 위치에 대한 안전성 부분 삽입
	B5	신호 문제요소를 미리 식별하고 Checklist를 통해 점검
HPR	C1	DP Class 2 이상의 선박에 보완 가능한 PRS 설치
	C2	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	C3	HPR 제조사 교육 의무화
	C4	HPR 음파 수/발신 강화를 위한 출력 증대
Taut-wire	D1	DP Class 2 이상의 선박에 보완 가능한 PRS 설치
	D2	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS 설치
	D3	Taut-wire 제조사 교육 의무화
Laser reference	E1	DP Class 2 이상의 선박에 보완 가능한 PRS 설치
	E2	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	E3	Laser reference 제조사 교육 의무화
	E4	소프트웨어의 주기적 원격 점검 시스템 의무화
DARPS	F1	DP Class 2 이상의 선박에 보완 가능한 PRS 설치
	F2	DP Class 1 선박에 2종류 이상의 PRS설치
	F3	DARPS 제조사 교육 의무화

Remarks : 선급 기준에 의하면 DP Class 2이상의 선박에는 PRS를 3종류 이상 설치하도록 요구하고 있음. 그러나 3종류의 다른 PRS에 대한 요건만 언급을 하고 있고 이들의 보완적인 관계에 대한 요건은 없음.

(2) Suggested RCOs for human errors

Classification		Code	RCOs
Organizational influences	Resource Management	A1	DPO 교육과정의 강제화(STCW 협약)
		A2	DP 운용자를 선발 및 능력을 평가하는 절차 수립
		A3	인적오류를 최소화 할 수 있는 설계지침 개발 및 적용
		A4	Leadership & Teamwork 기법 적용 절차 수립
	Process	A5	DP 운용 관련 절차를 산업계의 기준을 바탕으로 최신화하고 실제 적용여부를 확인하는 절차 수립
		A6	DP선박 운용감독의 효과를 확인할 수 있는 절차 수립
Unsafe supervision	Inadequate Supervision	B1	DP 운용관련지침 숙지 여부 확인 절차 수립
		B2	공식적인 DPO 운용 감독절차 수립 및 필요시 감독 추가배치
		B3	DPO 평가 및 능력 향상 절차 수립
		B4	상세한 DPO 선상 및 육상 교육 훈련 절차 수립
	Planned Inappropriate Operations	B5	DP 운용절차 개발 프로그램 이용(TAM, SMOP etc.)
		B6	DP 운용 전 계획된 작업에 대한 시뮬레이션을 통한 절차의 적합성 검증
	Failed to Correct a known Problem	B7	DP 운용 비상대응 시뮬레이션 훈련 시행
Precondition for unsafe acts	Adverse Mental States	C1	주기적인 DP 운용 직무교대 절차 수립 및 시행
		C2	Leadership & Teamwork 교육을 통한 상황인식 훈련
		C3	DP선박 안전운용을 위한 최적 선교 인력배치 절차 수립
		C4	적절한 휴식시간 부여 및 휴식 시설 제공
	Physical/ Mental Limitations	C5	Leadership & Teamwork 교육을 통한 상황인식 훈련 시행
	Crew Resource Mgt.	C6	DPO 채용 시 언어 능력 검증 절차 수립 및 평가
		C7	DPO 교육 및 훈련 절차 수립
Unsafe acts	Skill-based	D1	DP 운용 시뮬레이터 본선 설치 및 사전 훈련 시행 (예 : DP 운용 시 발생 가능한 고장에 대한 훈련 시나리오 개발 및 교육시행)
		D2	작업 수행 절차 Checklist 작성 및 운용 중 확인
	Decision	D3	다양한 DP 운용 시나리오 개발 및 시뮬레이션 교육
		D4	DP 운용 비상시 대응 훈련 시나리오 개발 및 교육 시행

Appendix 4 Degree of agreement between experts concordance matrix

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^I \left[\sum_{j=1}^J X_{ij} - \frac{1}{2} J(I+1) \right]^2}{J^2 (I^3 - I)}$$

W = 전문가 일치도

J = 참여한 전문가 수

I = 제시된 RCOs의 수

(1) Degree of agreement for PRS RCOs

Expert \ RCOs	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	D1	D2	E1	E2	E3
1	1	2	11	14	3	4	15	16	5	6	12	7	8	9	10	13
2	2	1	14	11	4	3	16	15	6	5	12	8	7	9	10	13
3	2	1	14	11	4	3	16	15	5	6	12	7	8	9	10	13
4	1	2	11	14	3	4	15	16	5	6	13	7	8	9	10	12
5	1	2	14	11	3	12	16	15	5	6	4	7	8	9	10	13
$\sum X_{ij}$	7	8	64	61	17	26	78	77	26	29	53	36	39	45	50	64

W = 0.91

(2) Degree of agreement for RCOs A (human errors)

Experts \ RCOs	A1	A2	A3	A4	A5
1	1	2	4	3	5
2	1	2	4	5	3
3	1	2	4	3	5
4	2	1	3	4	5
5	1	2	4	3	5
$\sum X_{ij}$	6	9	19	18	23

W = 0.78

(3) Degree of agreement for RCOs B (human errors)

Experts \ RCOs	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	2	3	4	5	6	1
2	3	2	4	5	6	1
3	2	3	4	5	6	1
4	3	2	5	4	6	1
5	2	3	5	4	6	1
$\sum X_{ij}$	12	13	22	23	30	5
W = 0.91						

(4) Degree of agreement for RCOs C (human errors)

Experts \ RCOs	C1	C2	C3	C4	C5
1	3	2	5	4	1
2	2	3	4	5	1
3	2	3	5	4	1
4	2	3	4	5	1
5	2	3	4	5	1
$\sum X_{ij}$	11	14	22	23	5
W = 0.88					

(5) Degree of agreement for RCOs D (human errors)

Experts \ RCOs	D1	D2	D3	D4
1	1	4	2	3
2	1	4	3	2
3	1	4	3	2
4	1	4	2	3
5	1	4	2	3
$\sum X_{ij}$	5	20	12	13
W = 0.83				

Appendix 5 Bayesian networks data sheets

(1) PRS errors excel data sheets

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	Drive off	operati	timeloss	Postitor	DGPS	Antenisl	HPR	Taut wire	Laser R	DARP	Ref. SW	signal blo	Electrical comp	antenna	external	environer	relative	signal	Unknown	failure
2	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
3	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
4	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
5	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
6	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
8	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
9	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
10	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
11	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
12	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
13	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
17	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
18	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
20	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
23	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
24	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
25	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
26	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
28	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
29	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
30	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
31	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
32	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
34	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

(2) Human errors excel data sheets

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
	Unsafe Acts	Skill-based	perceptual	decision	violation	Precond	Crew res	Personal	Adverse	Adverse	Physical	Unsafe	Traded	Planned	failure	superficial	Organized	resour	orga	organizational process
0104	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0113	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0114	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0115	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0122	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0125	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0126	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0132	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0143	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
0144	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
0145	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
0149	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0173	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0202	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
0203	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
0210	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
0211	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0214	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0216	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
0218	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0221	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
0222	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
0223	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0229	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
0230	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0236	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
0243	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
0244	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
0263	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
0301	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0302	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
0305	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
0316	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
0319	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
0401	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
0404	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0

Appendix 6 FMEA Reports

(1) OSV Relume FMEA(Global Maritime, 2013)

DP Control System Failure Modes				
Failure	Cause(s)	Probability	Local Effect	Final Effect
DGPS 1 Failure	Power failure	Medium	No/failed input to DP, DGPS rejected	Other systems available
	Correction signal failure			
	Masking			
	Configuration			
DGPS 1 Failure	Power failure	Medium	No/failed input to DP, DGPS rejected	Other systems available
	Correction signal failure			
	Masking			
	Configuration			
Fan beam Failure (laser reference)	Loss of vertical reference	Medium	Sensor out of range	Sensor deselected
	Loss of target/false target			
	Loss of serial link to DP			
	Loss of 24V			
Taut-wire Failure	Potentiometer meter fault	Low	No data or wrong data in one axis	Rejection by control
Loss of HPR	Input failure	Medium	Prediction error, HPR	Other functioning HPR
	Power failure	Low		
Inadequate satellite coverage	Poor geometry and shielding from platform	Medium	DGPS rejected if other position references are in use	Loss of degradation of position if on DGPS on line

(2) DSV Adams Challenge FMEA(GM, 2009)

DP Sensor failure Modes					
Failure	Cause(s)	Probability	Local Effect	Final Effect	Criticality
DGPS Failure 1	Weak signal due to shielding or out of range	Low	Alarm on DP	System switches to healthy MRU	Minor
DGPS Failure 2	Weak signal due to shielding or out of range	Low	Alarm on DP	System switches to healthy MRU	Minor
HPR Failure 1	Gyro 1 failure, MRU 1 failure, DGPS 1 failure, Transceiver or responder faults, Noise from propeller wash	Low	Alarm on DP	Vessel continue to operate on other reference systems	Minor
HPR Failure 2	Gyro 1 failure, MRU 1 failure, DGPS 1 failure, Transceiver or responder faults, Noise from propeller wash	Low	Alarm on DP	Vessel continue to operate on other reference systems	Minor
Taut-wire Failure 1	Main power supply or compressed air failure	Low	Alarm on DP.	Vessel continue to operate on other reference systems	Minor
Taut-wire Failure 2	Main power supply or compressed air failure	Low	Alarm on DP.	Vessel continue to operate on other reference systems	Minor
Fanbeam Failure	Power failure, Scanner failure, Poor Visibility, Encoder or serial link	Low	Alarm on DP.	Vessel continue to operate on other reference systems	Minor