



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](#)

공학석사 학위논문

해양플랜트 사고와 영향요인 간
상관관계에 관한 연구

A Study on Correlation of Offshore Plant Accidents
and Impact Factors

지도교수 조 권 회

2019年 8月

한국해양대학교 해사산업대학원
해양플랜트운영학과
권 은 옥

본 논문을 권은옥의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장

이 상 태



위 원

조 권 회



위 원

노 범 석



2019년 6월 11일

한국해양대학교 해사산업대학원

목 차

List of Tables	v
List of Figures	vi
List of Abbreviations	vii
Abstract	viii

1. 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	3
1.3 연구방법 및 구성	4
1.3.1 연구의 방법	4
1.3.2 논문의 구성	4

2. 연구의 이론적 배경

2.1 해양플랜트	5
2.1.1 해양플랜트 개념	5
2.1.2 해양플랜트 종류와 특징	6
2.1.3 해양플랜트 현황	10
2.2 해양플랜트 사고	16
2.2.1 Piper Alpha 사고현황	16
2.2.2 Deep Water Horizon 사고현황	17
2.2.3 기타 해양플랜트 사고현황	21
2.2.4 해양플랜트 사고의 주요 원인	22

2.3 해양플랜트 안전관리 방안	26
2.3.1 영국의 해양플랜트 안전관련 법규	26
2.3.2 노르웨이의 해양플랜트 안전관련 법규	27
2.3.3 영국과 노르웨이 당국의 공통 요소 통합	29
3. 해양플랜트 사고 영향요소의 상관관계에 대한 실증분석	
3.1 연구자료	31
3.1.1 연구자료 수집	31
3.1.2 변수의 조작적 정의	32
3.1.3 변수의 통계학적 특성	33
3.1.4 연구방법	35
3.2 실증분석	38
3.2.1 실증분석 결과	38
3.2.2 실증분석 결과 요약	48
4. 결론	49
참고문헌	51
감사의 글	54

List of Tables

Table 2.1 Consideration of decommissioning	13
Table 2.2 Direct and underlying causes	24
Table 3.1 Definition of variables	32
Table 3.2 Statistical characteristics of accident type	33
Table 3.3 Statistical characteristics of causes	34
Table 3.4 Statistical characteristics of environment	34
Table 3.5 Statistical characteristics of number of injury	35
Table 3.6 OLS result of number of accident and accident type	38
Table 3.7 OLS result of number of accident and causes	39
Table 3.8 OLS result of number of accident and environment	40
Table 3.9 OLS result of number of injury and accident type	41
Table 3.10 OLS result of number of injury and causes	42

List of Figures

Fig. 2.1 Deepwater water system type	5
Fig. 2.2 Global offshore investment	10
Fig. 2.3 Number of project commitments by commitment year	11
Fig. 2.4 Decommissioning total expenditure	14
Fig. 2.5 Hydrocarbon zones and potential flow paths	18
Fig. 2.6 Factors that appeared in conjunction with equipment failure ..	21
Fig. 2.7 Factors that appeared in conjunction with human error	22
Fig. 3.2 Corelation of accident and accident type	40
Fig. 3.2 Corelation of accident and accident causes	42
Fig. 3.3 Corelation of accident and environment	43
Fig. 3.4 Corelation of injury and accident type	45
Fig. 3.5 Corelation of injury and causes	47

List of Abbreviations

BSEE	Bureau of Safety and Environmental Enforcement
HSE	Health and Safety Executive
BOEMRE	Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement
OLS	Ordinary Least Squares
URF	Umbilicals, Risers & Flow lines
OSV	Offshore Support Vessel
FPSO	Floating Production Storage Off-loading
FPU	Floating Production Unit
DPS	Dynamic Positioning System
FLBT	Floating LNG Bunkering Terminal
EPC	Engineering, Procurement, Construction
EPCI	Engineering, Procurement, Construction, Installation
FEED	Front End Engineering and Design
MGS	Mud Gas Separator
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
BOP	Blow Off Preventer
TCP	Tool pusher's Control Panel
BSR	Blind Shear Ram
EDS	Emergency Disconnect Sequence
AMF	Automatic Mode of Function
RIDDOR	Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations
OSD	Offshore Safety Division
HSL	Health and Safety Laboratory
OIM	Offshore Installation Manager
OHS	Occupational Health and Safety
EPOL	Emergency Preparedness Offshore Liaison
UKCS	United Kingdom Continental Shelf
PSA	Petroleum Safety Authority
NPD	Norwegian Petroleum Directorate

해양플랜트사고와 영향요소들의 상관관계에 관한 연구

권 은 옥

해양플랜트 운영학과

한국해양대학교 해사산업대학원

초록

2000년대 중반 이후 고유가가 지속되고 해양 유전개발이 가속화 되면서 해양플랜트의 가동이 꾸준히 늘어 왔다. 해양탐사 및 시추장비가 증가함에 따라서 관련된 해양플랜트 사고도 급증하였고 이에 따라 장비에 대한 신뢰성 향상이나 해양플랜트 관련 작업자에 대한 교육 및 훈련에도 관심이 증가하고 있다.

해양플랜트는 설계 목적 상 원유의 생산, 분리, 저장, 하역과 그에 수반되는 다양한 작업은 대부분이 상부구조물에서 이루어진다. 오일 및 가스 누출에 의한 화재, 폭발 사고의 발생 확률은 다른 사고들에 비해 발생하는 빈도는 적으나 결과적으로 구조 및 인명, 재산에 큰 영향을 미친다.

본 논문에서는 미국 안전 환경국에 보고된 2012년 10월부터 2016년 9월까지 4년간 2194 건의 사고보고를 분석하여 해양플랜트 사고의 건수와 유형,

원인 그리고 설치환경의 상관관계를 분석하였고, 또한 부상자 수와 유형, 원인의 상관관계를 분석하였다.

분석에 사용된 사고사례는 E-Views 프로그램으로 OLS 모델을 사용하여 각각의 상관관계를 분석하였다.

분석 결과 해양플랜트 사고건수에 영향을 주는 사고의 유형으로는 화재, 충돌, 권상장비에 의한 사고가 유의미한 것으로 분석되었고 또한 사고건수에 영향을 주는 사고의 원인으로는 장비결함, 슬립 또는 트립이 유의미하게 영향을 주었음을 확인할 수 있었다. 반면에 부상자 수에 영향을 주는 사고의 유형으로는 유정제어 실패가 유의미 하였고 부상자 수에 영향을 미치는 사고의 원인으로는 인적요인이 주요함을 확인하였다.

본 연구를 통하여 해양플랜트 사고에 있어서 인명피해를 줄이기 위해서는 유정제어를 위한 대책 수립이 더 비중 있게 고려되어야 하고, 빈번한 사고의 감소를 위해서는 장비의 결함이나 슬립, 트립으로 인한 사고를 방지할 수 있는 대책 수립이 좀 더 비중 있게 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.

KEY WORDS: 해양플랜트, 미국 안전 환경국, 사고유형, 사고원인, 상관관계, 최소자승법

A Study on Correlation of Offshore plant Accidents and Impact Factors

Kwon, Eunok

Department of Offshore Plant Management
Graduate School of Maritime Industrial Study
Korea Maritime and Ocean University
(Supervisor : Prof. Kwon-Hae Cho)

Abstract

Since the mid-2000s, high oil prices have continued and ocean oil field development has accelerated and the operation of offshore platforms has been steadily increasing. As the number of marine exploration and drilling equipment increases, the number of related offshore plant accidents has increased rapidly. Therefore, there is an increasing interest in improving the reliability of equipment and education and training for offshore plant workers.

For the purpose of the offshore plant, the production, separation, storage, loading and unloading of crude oil and various work accompanying it are mostly done in superstructure. The probability of occurrence of fire and explosion accident due to oil and gas leakage is less than that of other accidents, but it has a great effect on structure, people and property.

In this paper, 2194 incident reports from October 2012 to September

2016, reported to the Bureau of Safety and Environmental Enforcement(BSEE), have been analyzed the correlation between the number and type, cause , installation environment of offshore plant accidents and the correlation between the number of injuries and type, cause of offshore plant accidents.

In the case of the accidents has been analyzed the each correlation by OLS model using E-Views program.

As a result of the analysis, the types of accidents affecting the number of off-shore plant accidents are analyzed as meaning that accidents caused by fire, collision, hoisting equipment are significant. Also, equipment failure, slip or trip were possible to confirm that it has influenced as causes. On the other hand, well control failure was significant for the types of accidents affecting the number of injuries, and human factors were the main cause of accidents that affected the number of injuries.

Based on the results, it is necessary to find ways to better control the oil wells in order to reduce the injuries in offshore accidents and in order to reduce frequent accidents, more precautions should be taken to prevent accidents caused by equipment defects or slips and trips.

KEY WORDS: Offshore plant, BSEE, Accident type, Accident causes, Correlation, OLS

제 1 장 서론

1.1 연구배경

2000년대 중반 이후 신흥국의 석유 수요로 인해 고유가가 지속되고 해양 석유·가스 개발이 가속화 되면서 해양플랜트의 가동이 꾸준히 늘어 왔다. 해양 탐사 및 시추장비가 증가함에 따라 관련된 해양 사고도 2000년대 중반 이후 급증하였고 이에 따라 기기의 신뢰성 향상 및 해양플랜트 관련 작업자에 대한 교육과 훈련에도 관심이 증가하고 있다(전병민 2014).

해양플랜트는 해저의 파이프라인과 수많은 장비들의 복잡한 연결로 이루어져 있고 업무 환경은 복잡한 탈출 경로와 제한적인 환기시스템으로 업무에 대한 위험도가 높다. 이러한 환경은 사소한 사건이 큰 사고로 이어져 큰 재앙의 초래를 가속화 할 수 있다.

과거 환경적, 사회적으로 광범위하게 영향을 미친 사고를 살펴보면 1988년 북해의 Piper Alpha호는 폭발사고로 176명의 사망자가 발생하였다. 2010년 Macondo의 Deep Deepwater Horizon 사고에서는 11명의 사망자가 발생하였고, 490만 배럴(약 77.8만 톤)의 원유가 멕시코 만에 유출되어 심각한 환경오염을 초래하였다.

해양플랜트는 설계 목적 상 원유의 생산, 분리, 저장, 하역과 그에 수반되는 다양한 작업은 대부분이 상부구조물에서 이루어진다. 오일(oil) 및 가스(gas) 누출에 의한 화재, 폭발 사고의 발생 확률은 다른 사고들에 비해 발생하는 빈도수는 적으나 결과적으로 구조 및 인명, 재산에 큰 영향을 미친다. 이러한 피해를 줄이기 위해 해양 플랜트나 해양 설치물의 화재 및 폭발에 대한 위험도 평가와 인명사고와 관련된 안전규정 준수가 중요하게 부각되고 있다(Cjuko, 2001; ISO 1990, 2003; HSE, 2003; Paik 등, 2007).

2000년대 중반이후 유가상승으로 인해 육상 플랜트보다 작업환경이 열악한 해양플랜트 도입이 전 세계적으로 증가하면서 해양플랜트와 관련된 사고도 빈번하게 일어나고 있다. 1995년대 중반 이후 석유나 가스 생산과 관련된 해양플랜트에서의 사고는 한해에 수백 건에 이르고 있으며, 수백 명이 다치거나 몇몇은 목숨을 잃는 경우도 있다(Health and Safety Executive, 2011). 해저의 수천 미터 아래에 있는 원유나 가스를 시추 또는 회수하여 정제의 작업을 수행하는 해양플랜트는 복잡한 시스템의 구성으로 인해 작업공간이 협소하고 해상의 기후에 따른 다양한 위험요소들이 존재하기 때문에 사고로 이어 지는 경우가 많다.

이렇게 발생하는 수많은 사고와 위험을 방지하고자 세계적인 주요 선급들이나 해양플랜트 관련 회사 및 기관들은 안전 관련 규칙을 제정하거나 위험분석을 위한 툴을 개발하는 등 다양한 방법으로 사고 발생 위험을 감소시키려는 시도를 계속하고 있다. 영국의 HSE(Health and Safety Executive)는 해양플랜트 안전부서(Offshore Safety Division)를 구축하여 해양플랜트와 관련된 법률에 대한 검토나 개정업무를 담당하고 있고 미국은 BOEMRE(Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement)를 통해 미국 대륙붕지역에서의 석유 및 가스와 관련된 사업에 대한 사고를 분석하고 관련된 법규를 제정하여 해양플랜트에 있어서 안전을 확보하기 위해 노력하고 있다(BOEMRE, 2012).

해양플랜트 사고의 사고 유형에는 화재 및 폭발, 충돌, 구조적 결함, 하이드로 카본 및 가스의 누출 등이 있고 사고 근절을 위해서는 이러한 사고들이 발생하는 원인을 이해하는 것이 중요하다. 이를 통해서 적절한 시기에 조치를 취할 수 있다.

사고를 예상하는 여러 이론 중 하인리히 법칙은 큰 사고가 발생하기 전에 그와 관련된 수많은 가벼운 사고와 징후들이 반드시 존재한다는 것을 밝힌 법칙이다. 하인리히는 대형 사고는 우연히 갑작스럽게 발생하는 것이 아니라 그 이전에 여러 번의 경고성 징후와 전조들이 반복되므로, 앞선 단계에서 적절히 대

처하면 재앙을 막을 수 있다고 강조했다. 사고의 근절을 위해서는 중대 사고에 대한 연구만이 아니라 준사고¹⁾와 같은 경미한 사고까지도 고려할 필요가 있음을 강조하고 있다.

1.2 연구 목적

본 연구에서는 미국 안전 환경국(Bureau of Safety and Environmental Enforcement, BSEE)에 보고된 사고 데이터를 바탕으로 해양플랜트 사고 발생의 방지를 위해 어떤 방향으로 접근해야 할 것인지를 고찰하고 사고의 발생률을 감소시키는데 기여할 수 있는 기초 연구 자료를 제공하고자 한다.

본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

첫째, 어떠한 사고의 유형이 해양플랜트 사고 발생 및 부상자 수에 영향을 미치는지 규명하려 한다. BSEE의 사고 보고서에는 사고의 유형(폭발, 화재, 유정제어실패, 충돌, 권상에 의한 사고 등)이 제시되어 있고 본 연구에서는 BSEE 보고서의 사고 유형을 바탕으로 사고 발생 건수 및 부상자의 수와 상관관계를 연구하고자 한다.

둘째, 해양플랜트 사고원인과 해양플랜트 사고 발생 및 부상자 수의 상관관계를 규명하려 한다. 화학 공정 산업과 관련된 사고의 분석으로는 Kidnap (2013)의 연구가 있다. Kidnap은 1964년 - 2003년에 발생한 364개의 화학 공정 산업과 관련된 사고에 대해 분석하였다. 이 분석에서 사고의 원인이 되는 여러 가지 요인과 빈도를 확인하기 위해 광범위한 데이터베이스를 사용하였고 인적 과실과 조직적 과실이 주요 원인임을 발견하였다. 본 연구에서는 BSEE 보고서에 보고된 사고 데이터를 바탕으로 해양플랜트 사고의 유형, 사고 원인과 사고 발생 건수 및 부상자 수와의 상관관계를 연구하고자 한다.

셋째, 해양플랜트의 지리적 환경 즉, 해양플랜트의 설치 수심 및 해양플랜트 설치 위치의 육상으로부터의 거리가 해양플랜트 사고 발생 건수 및 부상자 수에 영향을 미치는지 확인하여 해양플랜트 사고의 원인을 분석하고자 한다.

1) 현장에서는 주로 아차사고 라고 한다.

1.3 연구방법 및 구성

1.3.1 연구의 방법

연구 방법은 문헌 연구와 실증 연구를 병행하였다.

첫째, 문헌 연구는 선박 해양 사고에서 사고의 유형과 요인에 관한 국내외의 연구 문헌과 저서를 바탕으로 해양플랜트 사고가 발생하는 요인에 대해서 고찰하였다.

둘째, 실증 연구로는 2012년 10월부터 2016년 9월까지 4년간 2194 건의 BSEE 사고 보고서를 기초로 사고를 유발하는 요인을 분석하고 최소자승법(Ordinary Least Squares, OLS)을 바탕으로 사고유형 및 원인에 대한 모델을 분석하였다.

1.3.2 논문의 구성

본 논문은 총 4개의 장으로 구성되어 있으며, 각 장별 연구의 구성 내용은 다음과 같다.

제 1장은 논문의 서론으로 연구의 배경 및 목적을 기술하고 연구의 방법과 구성에 대한 내용을 기술하였다.

제 2장에서는 해양플랜트의 개념과 현황을 파악하고 해양플랜트 사고의 현황과 해양플랜트 안전관리 방안으로서의 관련 정책 및 법규에 대해 기술하였다.

제 3장은 해양플랜트 사고에 대한 실증 분석으로 통계 변수의 조작을 통하여 해양플랜트 사고 발생 건수와 유형 및 원인의 상관관계를 분석하였다. 또한 부상자 수와 사고의 유형 및 원인을 분석하고 사고발생을 줄이기 위한 대책을 제시하였다.

제 4장은 본 논문의 결론으로서 연구결과를 요약하고 연구의 시사점 및 한계점에 대해 기술하였다.

제 2 장 연구의 이론적 배경

2.1 해양플랜트

2.1.1 해양플랜트 개념

해양플랜트는 해저의 기름이나 가스 혹은 광물을 탐사, 시추, 생산, 수집하는데 사용되는 설비뿐 아니라 조력이나 풍력 등 신 재생에너지를 이용하여 에너지를 생산 하는 설비 등과 같이 해상에 설치되는 다양한 목적의 구조물을 통칭한다. 해양 플랜트는 해상플랫폼 및 해저의 생산 처리 시스템, URF(Umbilicals, Risers & Flow Lines), 상부(Topside)플랜트, 해양플랜트 서비스선박 등으로 구성된다(전병민 2014).

정인철(2016)은 해양플랜트는 바다에서 운용하는 대규모 기계류의 시설 및 공장이라고 주장하였다. 즉 해양플랜트란 정유공장과 같이 기계와 장치를 기술적으로 설치하여 제품을 제조할 수 있는 생산설비로 해상에서의 운영을 위한 구조물이다.

해상플랫폼은 해저 유정 시추, 석유 및 가스 생산을 하는 설비로 설치지역의 환경조건 및 운용, 관리 계획에 따라 다양한 기하학적 형상과 관련 장비들이 설치되는데, 일반적으로 플로우라인(Flow Line)과 엄빌리컬을 통하여 해저 유정으로 연결되고, 환경조건과 설계변수에 따라 해저 면에 고정시킨 구조물과 수면 상에 떠있는 구조물의 형태가 있다.

해저 생산 처리 시스템은 해저 유정에서 석유 및 가스를 처리, 생산하는 시스템으로 해저 유정에서 생산된 원유 및 가스 등을 해상의 생산 설비에 안정적으로 공급하거나 위급 시 차단하기 위한 해저 생산 시스템과 유정의 생산량 및 회수율 향상을 위해 적용되는 해저 프로세싱 시스템으로 구분된다.

URF는 해저에서 생산된 원유와 가스를 해상플랫폼에 이송하는 장치들이고,

톱사이드 플랜트는 해상플랫폼에 탑재되어 생산된 원유 및 가스를 분리, 정제, 압축 등을 하는 시설을 말한다.

엄빌리컬은 통신, 전력 및 화학 처리제를 이송하기 위한 케이블 다발이고, 라이저는 강관 혹은 유연관으로 해저면에서 해상 설비로 직접 연결되는 관로이다. 플로우라인은 처리되지 않은 유정의 추출 액체 및 기체가 흐르는 해저 관로로써 해양플랜트 비용의 약 20% 가량을 차지한다.

일반적인 톱사이드 플랜트는 가스 및 원유 생산, 정제 및 저장 등을 위한 해상 플랫폼에 탑재되는 장비와 플랜트, 시스템 등을 총칭하며, 전력생산을 위한 발전기, 가스의 처리 공정을 위한 가스플랜트 등을 포함 한다.

해양플랜트 서비스 선박(Offshore Support Vessel, OSV)은 해양플랜트의 설치, 운영, 보급 등을 위해 투입되는 선박으로 해상에서의 각종 작업 및 운송에 투입되는 특수선으로 PSV(해양작업지원선), AHTS(해양시추지원선)가 주종을 이루고 있으며, 이밖에 SRV(심해지질탐사선), OSCV (해양건설지원선), SV(잠수지원선), Cable Layer(케이블 부설선), PLSV(파이프설치 작업선), ROV(외에 해저지질조사선, 실습선 등의 해양조사선이 있다(전병민 2014).

2.1.2. 해양플랜트 종류와 특징

해저의 자원개발을 위해서는 육상의 경우와는 다른 특수한 환경이 고려되어야 하고 그에 따른 문제점들을 극복하여야 한다. 해저 자원개발을 위해서는 첫째, 강한 풍랑에 대한 안전한 작업성이 확보되어야 한다. 둘째, 강한 수압을 견디어야 하고 깊은 수심에도 안전하게 작업이 가능하여야 한다. 셋째, 시추나 생산 중에 유출로 인한 해양오염을 초래하지 않아야 한다. 넷째, 고립된 환경에서 작업해야하기 때문에 화재 및 폭발에 대하여 안전하여야 한다.

해양플랜트는 용도 또는 작업 단계에 따라 시추 시설과 생산 시설로 구분할 수 있으며 설치되는 해양의 깊이에 따라 심해에 설치되는 것과 연안에 설치된 것으로 구분할 수 있다. 시추 시설에는 Fig. 2.1에 나타난 바와 같이 해저에 고정되어 설치되는 잭업리그(Jack-up Rig), 드릴십(Drillship) 그리고 반잠수식 시추

선(Semi-submersible Rig)이 있다. 잭업리그는 해저에 고정되어 설치되므로 연안에 설치되며 드릴십과 반잠수식 시추선은 주로 심해에서 시추작업을 한다.

생산 시설에는 연안에서 주로 사용되는 고정식 플랫폼(fixed platform)이 설치되며 심해에는 주로 FPSO(Floating Production Storage Off-loading)와 FPU(Floating Production Unit)가 주로 오일을 생산하는 작업을 한다.

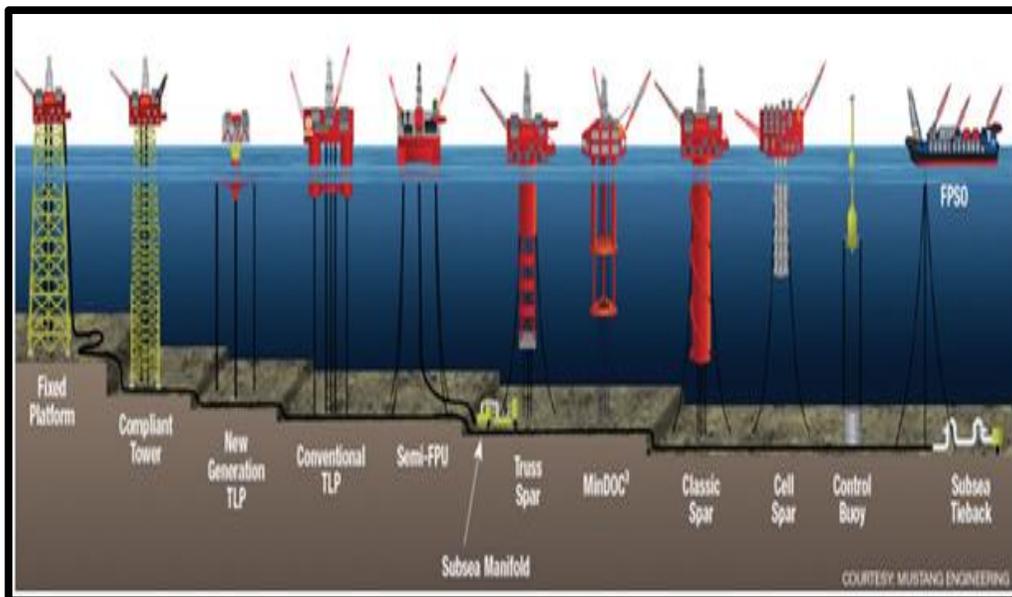


Fig. 2.2 Deepwater water system type (Source: Mustang engineering)

연안에서는 주로 구조물의 하부가 해저 면에 고정되어 있는 고정식 구조물을 사용하므로 중량과 하중을 이겨내도록 설계되어 안전성이 높다. 중력기반구조물(Gravity based Structure)의 형태는 칼럼(column)형과 박스(box)형이 있고 주로 하부 구조를 콘크리트 구조로 하여 자체 하중으로 고정시키고 콘크리트의 빈 공간은 저장 탱크로 활용하는 구조이다.

잭업(Jack-up) 구조물은 이동 시에는 부유하는 형태이고 작업 시에는 잭업레그를 해저지반에 고정시켜 설치되어 안정적인 작업을 할 수 있는 구조이다. 따라서 플랫폼이 수면위에 거리를 두고 위치하고 비교적 얕은 수심에서 안정된 작업이 가능하다. 또한 잭업레그의 길이에 따라 작업 가능한 깊이가 결정되며

고정식이 아니기 때문에 작업완료 후 다른 장소로 이동이 가능한 특징이 있다.

타워형구조물(Guy Tower)은 외력에 의한 약간의 움직임을 허용 할 수 있는 특징이 있고 동적위치제어장치(DPS, Dynamic Positioning System)로 위치를 유지하도록 설계된다.

반잠수식 시추선은 선체, 기둥, 상부구조물로 구성되고 유선형의 선체 부분이 이동시에 해수면에 떠올라 저항을 줄여주고 작업 시에는 물속에 잠겨 부력을 얻는 역할을 한다. 작업 시 기둥부분은 단면적이 작아 파랑 중 상하운동을 줄여 줄 수 있도록 설계되어 있다. 또한 시추작업 중 발라스팅이 가능하여 해수면의 유동적인 변화에도 불구하고 안정된 작업이 가능하고 동적위치제어장치를 사용하여 정확한 위치를 확보 할 수 있도록 제어한다.

드릴십은 선박의 모양을 한 시추선으로 파랑 중 상하운동에 대해서는 불리하나 이동이 편리하고 상대적으로 많은 양의 적재가 가능하다. 높은 유동성으로 유전의 탐사를 위해 가장 많이 사용되는 유형이고 보통 6기의 쓰러스터(Thruster)가 동적위치제어시스템에 의하여 위치를 유지하는 역할을 한다. 드릴십에 탑재되는 시추 시스템은 장비를 들어 올릴 수 있는 권상시스템(Lifting System)과 드릴링 파이프(Drilling Pipe)로 연결된 드릴비트(Drill Bit)를 이용하여 시추를 하기 위한 회전시스템, 머드(Mud)를 순환시키는 순환시스템으로 구성되어 있다.

FPSO는 생산 시설로 선박의 모양을 하고 있고 실제로 계류된 선박과 같아서 조류나 풍향에 따라 방향 전환이 가능하고 주로 소규모의 유전 생산에 활용되고 있다. 데크(Deck) 상에 오일을 생산할 수 있는 플랜트가 설치되고 선체 내부에 탱크가 설치되어 생산한 기름을 저장할 수 있도록 설계된다. 심해유전개발에 적합한 형태이고 한 지역에서 작업이 완료되면 다른 유전으로 이동이 가능하다. 최근 LNG 시장이 활성화 되면서 LNG FPSO 및 FLBT(Floating LNG Bunkering Terminal)에 대한 관심이 높아지고 있다. FLBT는 LNG 병커링 설비에 LNG 인수 기지를 합한 개념으로 LNG를 공급받아서 저장할 수 있고, LNG 추진선박에 병커링을 하거나 육상으로 보낼 수 있는 설비이다.

해양설비에서 고려할 요소에는 첫째, 환경 하중에서 비롯되는 동적하중으로 인한 피로문제, 둘째, 틱사이드 적재에 따른 적정하중, 셋째, 부식문제, 넷째, 서비스 선박과의 충돌, 다섯째, 해양생물 부착에 따른 항력과 정적하중의 증가 등이 있다.

해양플랜트산업은 석유나 천연가스와 같은 에너지 자원을 육지가 아닌 해양에서 채굴, 생산, 저장 후 수송에 사용되는 여러 형태의 해양설비들을 생산, 관리 및 유지하기 위해 이용되는 산업을 의미한다. 해양 에너지개발 과정에서 유전의 탐사, 시추 및 생산에 이르는 과정을 상류(Up-stream)이라 하고 생산된 원유를 정제해 판매, 운송하는 과정을 하류(Down-stream)라 하는데 해양플랜트가 필요한 부분은 Up-stream 으로서 탐사, 시추, 생산단계로 분류된다. 유정의 탐사가 마무리 되면 시추작업에서 운용될 플랜트를 설계하기 시작하나, 이 업무는 오일 메이저(Oil Major)의 영역으로 자체 엔지니어링 혹은 전문 엔지니어링 업체에서 수행한다.

이 과정에서 설계 작업의 전체 일정이나 비용 및 기기나 장비의 기본 사양이 결정된다. 이후 조선소에 EPC(Engineering, Procurement, Construction) 혹은 EPCI (EPC & Installation) 방식으로 발주한다. EPC 방식이란 해양플랜트의 설계 및 조달, 건조까지 전 과정을 수주하는 것을 의미한다. 해양플랜트를 수주한 조선소는 기본설계를 바탕으로 FEED(Front End Engineering & Design) 설계를 검증하고 상세 설계를 자체 혹은 전문엔지니어링 회사와 함께 수행한다. 설계 업무의 일부를 전문 엔지니어링 업체에 용역 의뢰하며 조선소 자체에서 처리하는 물량의 범위는 회사마다 조금씩 차이가 나며 발주처의 요구에 따라 범위가 결정된다.

이 과정에서 자재의 사양과 기자재 사양이 확정되고 주요 장비에 대한 업체가 선정된다. 해양플랜트 기자재의 경우 모든 장비 사양은 발주처 사양에 준하여 설계 및 제작되어야 하며, 자재 관련 사양도 까다롭고, API, ASME 등의 국제 표준 및 규정이 적용되며, 다양한 문서와 설계도면, 해석자료 등을 요구하고 있다.

2.1.3 해양플랜트 현황

해양플랜트는 기존의 상선 건조와는 달리 매 건조마다 하나의 프로젝트로 규격 및 표준화가 어렵다. 해양플랜트라 함은 바다에 있는 석유나 가스를 탐사하여 굴착 및 생산하는데 필요한 일련의 시설을 지칭하는 것으로, 오프쇼어(Offshore)를 중심으로 그린 에너지로 일컫는 해상에서의 풍력, 조류, 파도 등을 이용한 에너지 자원개발 및 발전설비를 포함한다. 최근에는 보다 넓은 의미로 담수화 장치, 폐기물 처리장치, 항만 및 해상 구조물에 설치하는 모든 기반시설까지를 포함하는 개념의 변화가 일어나고 있다.

최근에는 조선 경기의 하락과 해양플랜트의 국산화율 부진으로 일감 확보가 어려워진 중소 조선 및 기자재업체, 국제 물류시장 침체로 경영난을 겪고 있는 해운 업체 등을 중심으로 해양플랜트를 이용한 탐사와 시추, 설치와 운영과 같은 제반 서비스 산업에 대한 관심이 급증하고 있다. 국내 조선소들이 집중해 온 해양플랜트 수주 물량 확대에도 불구하고, 해양플랜트 기자재 공급에 있어서는 국제적 경쟁력을 갖추고 있지 못한 상황이다. 우선, 높은 수준의 품질을 요구하는 오일 메이저들은 자체 거래중인 조선기자재업체 즉, 벤더리스트를 선정하여 해당 리스트에 있는 조선기자재 업체만 해양플랜트를 발주한 조선소에 기자재를 공급하도록 제한하고 있다. 이는 동남권의 최대 주력 제조업인 조선업계 전반의 확실한 위기이다(윤효영, 2016).

해양자원 개발사업 자체가 오랜 시간 관계를 유지해 온 네트워크 내에 속한 전문기업들끼리 보수적인 커뮤니티를 형성해오고 있으며, 따라서 신생기업 보다는 사업을 안전하게 완료한 경험이 있는 기업을 선호한다. 개발주체인 오일 메이저는 안정성을 최우선시하기 때문에 기술과 품질, 그리고 경험이 검증된 기업들을 벤더리스트에 선정하여 관리하고 있다. 이들 개발주체는 주로 자원개발과 연계되어 발전한 북해, 멕시코 만 등 광구와 인접한 노르웨이, 영국, 미국 등에서 발전하였으며, 오일 메이저로 불리는 석유회사 등을 중심으로 해양플랜트를 발주하면서 제작은 우리 조선소들에 맡기는 대신, 개념 및 기본설계에 해당하는 FEED단계에서 사양과 기자재 등을 포함한 건조 전 단계에 걸쳐 영향력

을 행사하고 있다.

해양플랜트 산업에 국내 조선 3사가 뛰어든 것은 1976년 현대중공업이 사우디아라비아 주베일 항만의 대형 유조선 접안시설공사를 수주한 것을 시작으로 한다. 일반적으로 해양플랜트는 종류와 규모에 따라 차이가 있으나 반 잠수 식 드릴리그는 5억불, 드릴십은 10억불, FPSO는 20억불, LNG FPSO는 약 50억불에 달하며, 설비에 5%-10% 내외, 선체에 30%-50% 내외, 탑재 기자재에 40%-55%가 소요되는 것으로 알려져 있다(Jung In, 2012).

세계 인구는 현재 약 70억 명에서 2,030년에는 약 80억 명으로 증가 될 것으로 예상되고 있다. 인구 증가는 필연적으로 에너지 소비를 증가 시킨다. 개발도상국들의 산업화로 인한 에너지 소모량 증가 역시 기술 개발로 인한 에너지의 효율성 증대 폭보다 월등히 클 전망이다. 결론적으로 유전 개발이 지속적으로 이루어질 수밖에 없는 상황이다. 그러나 육상 및 천해 지역은 이미 충분한 유전 개발이 이루어져 신규 개발이 감소되고 있는 실정이다. 반면에 심해에서의 개발은 빠른 속도로 증가되고 있다. 해양의 면적이 지구 표면의 70.7%를 차지하니, 해양이야말로 무궁한 개발과 발전이 이루어질 미지의 영토임은 틀림없는 사실이다.

최근 해양플랜트 시장은 설계, 제작, 설치 및 시운전까지를 아우르는 턴키 발주가 증가하고 있다. 시장의 추이를 감안하면 설계에서 제작, 설치, 시운전을 한꺼번에 해결해주는 토탈 솔루션 제공자(total solution provider)로서의 사업 모델을 도입하여 발주처 패턴 변화 등 시장의 패러다임 변화에 선제적으로 대응함으로써 경쟁 우위를 확보해야 한다. 그러나 2015년 하반기부터 시작된 유가 급락 상황이 이어지고 있다. 2016년 1월 22일에는 배럴당 두바이유는 44.65달러, 서부 텍사스 유는 46.31달러, 브렌트유는 48.52달러를 기록했다. 미국과 캐나다를 중심으로 셰일 오일·가스 공급이 증가한 반면, 선진국의 석유·가스 수감소와 중국, 인도 등 신흥국의 수요 증가세 둔화가 주된 요인으로 분석되고 있다(정인철, 2016).

2014년 이래로 유가가 지속적으로 하락함에 따라 석유 가스 산업은 하락세

를 보이고 있으며, 이러한 유가 하락으로 인해 전 세계적으로 관련업계의 투자 및 이익 또한 줄어들고 있다. 그러나 Fig. 2.2에 나타난 것처럼 이러한 하락세는 2018년을 기준으로 다시 상향세로 반등하고 있으며, 2019년부터는 활발한 투자가 예상되어 2025년에는 2014년과 유사한 투자규모가 형성될 것으로 기대된다(Offshore Magazine, 2018).

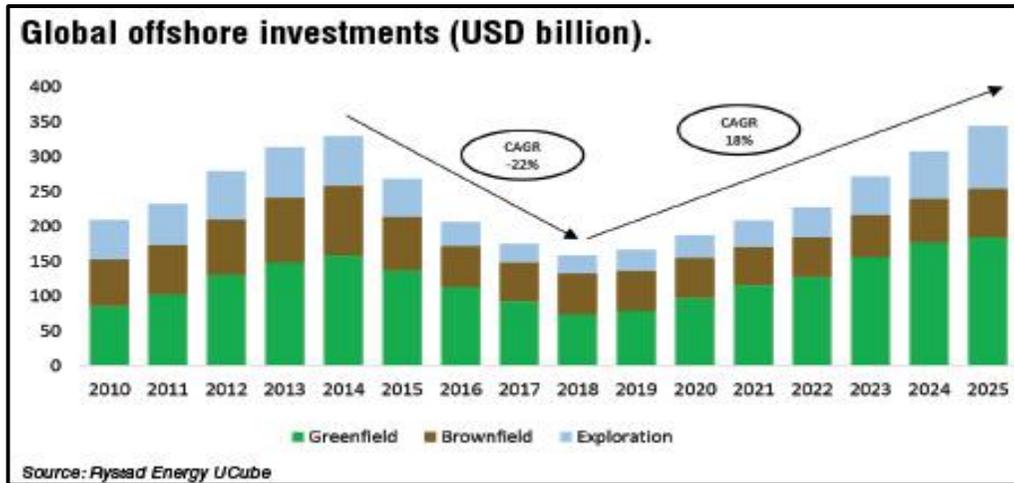


Fig. 2.3 Global offshore investment

해상플랜트(Offshore plant)는 육상플랜트(Onshore plant)와 비교하였을 때, 상대적으로 복잡한 설비와 프로세스로 인하여 투자기간이 길다. 특히, 활발한 Offshore 개발을 위해서는 사전에 지질 조사 및 성분 조사와 같은 Exploration 활동이 선행되어야 하는데, 침체기 동안 이러한 활동에 대한 투자가 활발히 진행되지 않아 시장회복에 걸리는 시간이 비교적 많이 필요할 것으로 예상된다.

Fig. 2.3에서와 같이 2018년 1/4분기에는 2017년의 동일기간 대비 floating rig에 대한 투자가 증가하였으며, 주로 Shell, BP, Eni, Statoil, ExxonMobil, BP, Petrobras와 같은 Major 정유사로 부터 활발한 투자가 진행되었으며, ENSCO, Aban Offshore와 같은 Drilling contractor들 또한 2018년 이 후 중동지역에서의 시추작업이 진행될 것으로 전망하고 있어, 향후 오프쇼어 산업 상황이 크게 개선될 것으로 예상된다.

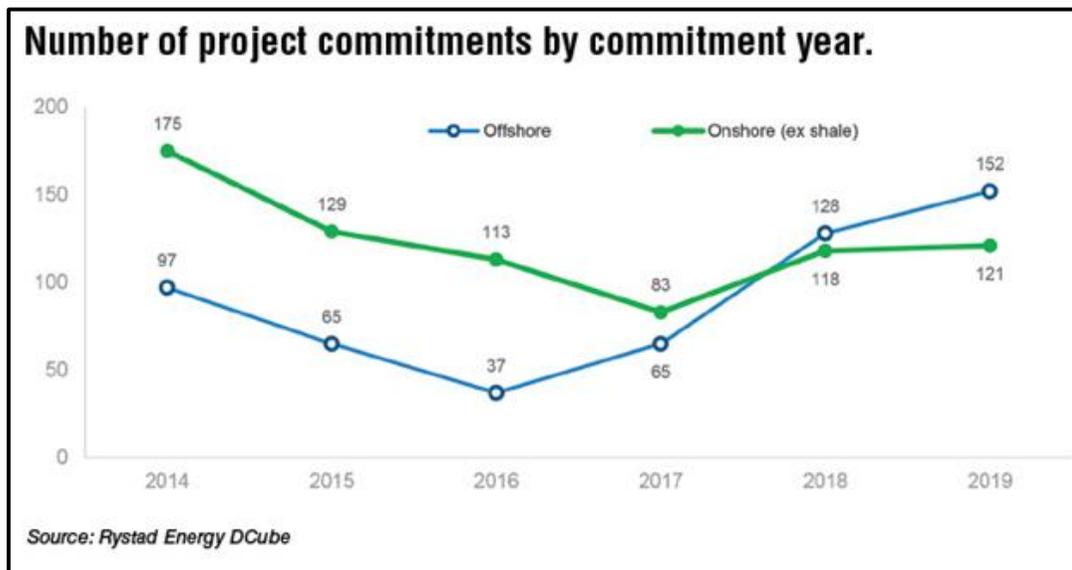


Fig. 2.4 Number of project commitments by commitment year

2018년부터 2025까지의 개발비용은 온쇼어 프로젝트 대비 3배 가까이 투자될 것으로 전망되며, 주로 북해, 멕시코 만 그리고 브라질에서 이루어질 예정이다.

이렇듯, 2014년부터 하락세를 보인 오프쇼어 산업 개발은 2018년을 기점으로 다시 활발한 투자가 전망되고 있으며, 오프쇼어 구매가 2018년에서 2021년까지 매년 평균 8%씩 증가 할 것으로 예상됨에 따라 이러한 성장세를 유지하기 위해서는 다른 산업대비 경쟁력 확보를 위해 채산가 절감을 위한 원가절감 및 신 기술 개발이 필요할 것이다(Offshore Magazine ,2018).

해양플랜트의 노후화로 인한 해양플랜트 산업의 한 축인 해체산업도 수요가 증가하고 있다. 1947년 멕시코만 ship Shoal 지역에 설치된 세계최초 해양 굴착장비인 Kermac Rig No.16을 시작으로 전 세계 53개국에 7,000개 이상의 해양 석유 및 가스 시설이 설치되어 있으며, 이 중 많은 수의 해양 구조물들이 15~20년 이상 운행되었다. 이에 따라, 일부는 이미 해체되었거나 해체 대기 상태이다. Offshore Technology Conference에서 발표한 보고서에 따르면, 향후 5년간 노후된 해양 구조물 및 관련 subsea 장비 및 파이프라인에 대한 해체가 급격히 증가 할 것

으로 예상된다. 2017년부터 5년 동안 해양 석유 및 가스 채산용 해양 구조물 중 약 600개가 해체 될 것으로 예상되며 해체 프로젝트의 예상 비용은 2015년 24억 달러에서 2040년 130억 달러로 약 541.6%가 증가될 것으로 전망된다 (International Offshore & Gulf of Mexico Report, 2007).

특히, 수 년 내에 해체 될 해양 구조물은 기 해체된 해양 구조물보다 상대적으로 중량이 많이 나가고 복잡하며, 심해 굴착 및 채산을 위해 가혹한 해양조건에 설치되어 있어서 더욱더 복잡한 해체 과정을 거쳐야 한다. 특히, 해양 구조물의 해체 비용은 그 깊이와 주변 환경에 매우 밀접한 관련이 있기 때문에 조건에 따라 그 비용이 크게 증가할 수 있다. 예를 들어, 깊이가 15 m 미만인 경우 총 해체비용은 약 2백만 달러이나, 약 100 m 깊이의 해양 구조물은 구조물 자체를 제거하는 데에만 약 4백만 달러가 소요된다. 또한 깊이가 100 m 이상인 경우 심해의 혹독한 환경 조건으로 인해 해체의 복잡성과 위험이 크게 증가함에 따라 비용과 위험성을 예측하기가 상대적으로 어렵다(International Offshore & Gulf of Mexico Report, 2007).

또한, 장비의 다양화와 복잡성으로 인해, 해체과정 중 중금속 및 방사성 물질과 같은 유해 물질이 누설 될 확률이 높기 때문에 구조, 기계 장치, 파이프라인 및 전기 및 계측기 시스템과 같은 각 분야에 대한 체계적이고 효율적인 해체 절차가 점차 중요해지고 있다. 해체 위험을 최소화하기 위해서는 **Table 2.1**과 같은 다양한 요인을 고려해야 한다.

Table 2.1 Consideration of decommissioning

1	Environment	. Marine impacts . Energy/resource consumption
2	Safety	. Risk to personnel . Risk to other users of the sea . Risk to those on land
3	Societal	. Fisheries . Amenities . Communities
4	Technical Feasibility & Cost	. Risk of major project failure . Economics

Fig. 2.4와 같이 해양 구조물 해체작업은 기존 노후화된 해양구조물의 증가로 인해 지속적으로 성장할 것으로 전망되고 있으며, 안전하고 효율적인 해체작업을 위하여 고도화된 해체기술, 절차 및 안전관리가 추가적으로 개발되고 적용되어야 할 것으로 전망된다(Ferris J, 2014).

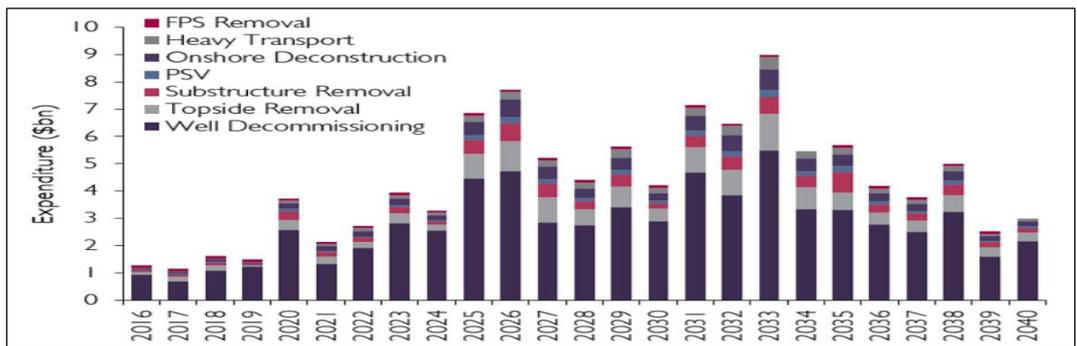


Fig 2.5 Decommissioning total expenditure

2.2 해양플랜트 사고

2.2.1 Piper Alpha 사고 현황

역사상 최악의 해양플랜트 사고 중 하나로 기록된 영국의 파이프 알파 사고는 2013년 7월 6일 북해의 영국 해역에 설치된 석유 플랫폼인 파이프 알파에서 폭발사고가 발생하여 167명이 사망하고 플랫폼이 파괴된 사고이다. 61명이 플랫폼에서 바다로 뛰어 내려 구조되고 생존하였다. 파이프 알파는 1988년 7월 6일 22시부터 7월 7일 01시에 걸쳐 3시간동안 완전히 붕괴되었다.

Cullen Lord에 의해 파이프 알파 폭발사고에 대한 광범위한 조사가 진행되었고 사고의 경과는 다음과 같다. 화재와 폭발의 연속으로 이어진 사고는 작업허가(Work Permit) 시스템의 고장으로 시작되었다. 응축수 펌프(Condensate Pump)가 정기 유지보수를 위해 중지되었다. 작업을 위해 작업허가서가 발급되었으나 실제로 작업은 시작되지 않았다. 동시에 응축수 펌프 배출관의 압력 해소 밸브에 대한 유지보수 작업허가가 발급되어 릴리프 밸브(Relief Valve)를 제거하고 개방 배관을 블라인드 플랜지로 막았다. 교대가 끝날 때 블라인드 플랜지가 제거되지 않고 작업이 완료되지 않았으나 다음 임무를 수행하는 근무 감독관에게 작업 상태를 제대로 알리지 않아 작업 허가도 말소되었다.

그날 밤 운용 중이던 응축수 펌프가 멈추었고 다시 작업을 할 수 없었다. 플랫폼 압력용기에 액체 레벨이 상승했고 응축수를 순환 시킬 수 없을 경우 생산을 중단해야 하는 상황이 발생했다. 저녁 교대 근무자는 예비 펌프가 유지보수를 위해서 준비되어 있었고 작업은 아직 시작되지 않은 것을 알고 있었으나 감압밸브가 제거되고 블라인드 플랜지가 설치되었던 사실은 알지 못했다. 작업자는 대기 중이던 펌프를 작동시켰고 이로 인해 배관의 블라인드 플랜지가 밀려나가면서 폭발 가능한 인화성 가스를 방출했다. 이로 인해 급속한 폭발 화재 사고가 발생하였고 결국 플랫폼은 파괴되었고 167명의 사망자가 발생하였다.

Dennis C. Hendershor(2013)의 보고서에 따르면 초기 폭발의 주요 원인은 다음과 같다.

첫째, 부적절한 작업 허가 및 잠금 태그 부착 절차가 부적절 하였고, 둘째, 근무 교대 시, 운영 중인 모든 장비 및 기계의 작업 상태 특히 유지 보수를 위해 제거된 모든 장비의 상태를 완전하게 전달하지 못하였으며 셋째, 미 작동 중인 장비의 시작 버튼을 누르는 것이 안전한가에 대한 확인이 누락되었다.

넷째, 시설 및 설계적인 측면에서 보면 라이저(Riser)는 주요 위험 요소이지만 이를 보호하기 위한 조치가 없었고 감사 시에 라이저에 델루지(Deluge) 시스템을 설치하거나 해저로부터의 흐름을 막을 수 있는 자동 밸브 설치가 권장되었으나 두 가지 모두 설치되지 않았다. 또한 화재의 확산을 막을 수 있는 방화벽은 설치되어 있었으나 폭발은 견딜 수 없도록 설계되어 있었다.

다섯째로는 안전시스템이 비활성화 되어 있었다. 파이어 델루지 시스템은 자동으로 작동되도록 설정되어 있었어야 했으나 사고 당시 수동으로 설정되어 있었고 여섯 번째로는 “비정상의 정상화”로 부식에 대한 심각한 문제가 있었으나 안전성에 대한 감사 자체가 제대로 수행되지 않았다.

마지막으로 사고 직후 비상사태에 대한 대응의 문제로 작업자의 훈련이 제대로 이루어지지 않았고 현장의 관리자는 응급상황에 효과적인 지도력을 제공할 수 있는 훈련을 받지 못하였다. 실제로 3년 넘게 본격적인 비상훈련이 없었고 긴급 대응 장비는 재난의 규모에 부적합 하였다.

2.2.2 Deep Water Horizon 사고 현황

Deep Water Horizon호는 2010년 4월 20일 21시 40분경, Macondo well(Mississippi Canyon Block 22)에서 유정제어 실패로 인한 탄화수소 유입으로 폭발 및 화재 사고가 발생하였으며, 그 결과 Deepwater Horizon이 침몰하였다. 승조원 126명 중 11명이 사망하고 17명이 심각한 부상을 당했으며, 87일(4월20일 ~ 7월15일) 동안 약 4,900,000 배럴의 탄화수소가 누출되는 대형 참사였다. 누출유정은 약 5개월 후인 2010년 9월 19일 공식적으로 봉인되었다(British petroleum, 2011).

사고로 인해 약 180,000 km²의 해역에 해양오염이 발생하였고, 멕시코 만(Gulf

of Mexico)의 16,000종 해양생물의 약 50%에 직, 간접적 피해가 발생하였으며, 용선주인 BP는 Clean water act 위반으로 620억 불의 배상금을 지불하였다.

BP 최종 사고 보고서(2011)는 사고 원인을 8가지로 규정하였다.

1. The annulus cement barrier did not isolate the hydrocarbons.
2. The shoe track barriers did not isolate the hydrocarbons.
3. The negative-pressure test was accepted although well integrity had not been established.
4. Influx was not recognized until hydrocarbons were in the riser.
5. Well control response actions failed to regain control of the well.
6. Diversion to the mud gas separator resulted in gas venting onto the rig.
7. The fire and gas system did not prevent hydrocarbon ignition.
8. The BOP emergency mode did not seal the well.

첫째, 가장 근본적인 원인으로는 유정의 시멘트 베리어(Cement barrier) 파괴로 인한 탄화수소의 유입이다. 마지막 시추공을 시추할 때는 유정의 마찰을 최소화하기 위해서 작은 사이즈의 시추관을 이용하기 때문에 시추가 어렵고 유정의 형태를 유지하기 위해 정확한 머드의 중량이 요구되는데 BP의 보고서에 따르면 이 시멘트 장벽이 파손된 원인이 시멘트 현탁액의 질소 비율이 잘못 되었기 때문이라고 주장하였다.

즉, 초기 시멘팅 설계에서는 시멘트 현탁액의 질소 비율이 18%~19%로 설계되어 있었지만 실제 사용된 시멘트의 현탁액의 질소 비율은 12.98%로 확인되었기 때문에 이 질소비율의 차이에 의해 시멘트 장벽이 파손되었다고 주장하였다. 하지만 사고 후 BP는 재 실험을 통해 동일 조건 하에서 15%일 때 가장 이

상적인 비율이라는 실험 결과를 도출하였으나 Halliburton은 센트럴라이저(Centralizer)의 부족한 사용이 원인이라고 주장하면서 시멘트 파손의 직접적인 원인은 아직 정확히 파악되지 않았다. 그러나 결함의 상태를 추정하여 시멘팅 작업에 필요한 Halliburton의 적절한 작업표준이 없었기 때문에 사고가 발생하였다는 잠정적인 결론을 얻었다.

둘째, Fig. 2.5에서와 같이 슈 트랙 배리어(Shoe track barrier)는 플로트 칼라(Float collar)와 역류방지밸브 두 개로 구성되어 있고, 시멘트가 파손되거나 기타 이유로 인하여 탄화수소가 케이싱내부로 침입하는 것을 방지하는 역할을 하는데 케이싱 행어 씰 어셈블리(Casing Hanger Seal Assembly)도 동일하게 케이싱 외부의 탄화수소가 내부로 침입하는 것을 막아주는 역할을 한다. 보고서에 따르면 행어 씰(Hanger Seal) 내부에서 침식이 발생하여 탄화수소의 유입을 막지 못했다는 결론을 내렸다.

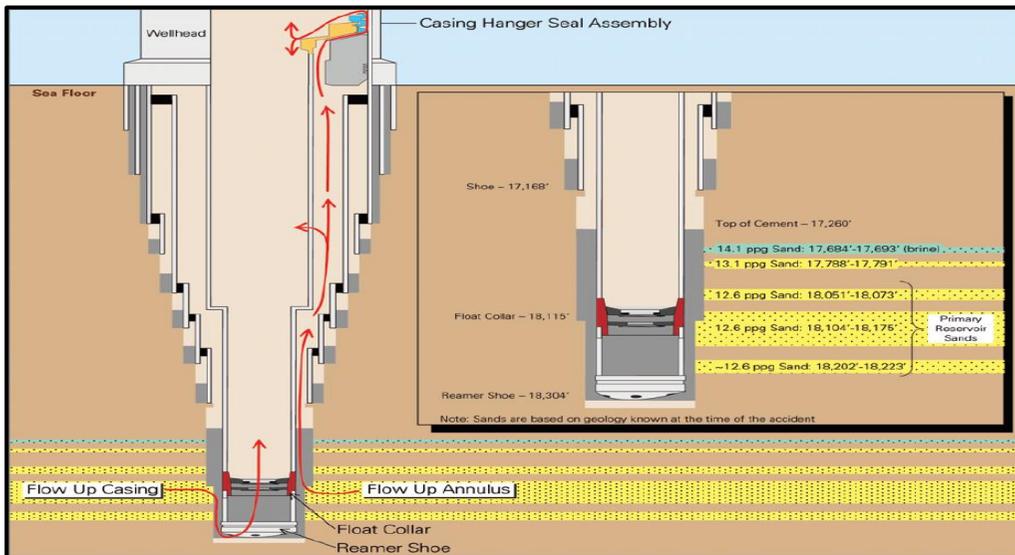


Fig. 2.5 Hydrocarbon zones and potential flow paths

셋째, 시추작업의 마지막 작업 단계에서는 케이싱과 리저버에 시멘트를 사용하여 방벽을 설치하고 이 시멘트의 건전성을 확인하기 위해서 양압 및 음압 테

스트를 실시한다. 양압 검사는 유정 내를 고압으로 유지하여 시멘트의 건전성을 확인하는 검사이다.

양압 검사에 이상이 없으면 음압검사를 실시하게 되는데, 리저버에서 유정으로 탄화수소가 누설되는지는 확인하는 테스트이다. 이 음압 테스트 시에 펌프를 정지했음에서 불구하고 유정내의 압력이 비정상적으로 상승하였으나 테스트가 통과 되었다.

넷째, 압력테스트 후 Sheen Test를 위하여 머드펌프를 정지하였으나 시추관내 압력은 지속적으로 상승하였으나 이상 징후를 감지하지 못하였다.

다섯째, Sheen Test 후 머드펌프를 작동시켜 Spacer를 배출하는 작업을 계속 실시하였고 이후 머드펌프를 다시 정지하였으나 시추관 압력은 지속적으로 상승하였고 유정 제어에 실패하였다.

여섯째, 시추 작업 중 발생하는 소량의 가스는 Mud Gas Separator(MGS)로 분리되어 안전 구역으로 방출되도록 되어있으나 작업자들은 이상을 감지하고 디버터를 MGS로 전환하였고 MGS의 용량 초과로 인해 가연성가스 및 탄화수소가 본선의 광범위한 구역으로 확산되었다. 이 확산된 가스가 기관실로 흡입되어 발전기는 가스의 흡기로 정지되고 기관실의 특정 발화원에 의해 화재가 발생하였다.

일곱째, 확산된 가스와 탄화수소가 기관실에 유입되고 발전기의 흡기로 공급되기까지 기관실 흡기통로 중에 가스탐지기가 설치되어 있었으나 이 가스탐지기와 선내 공기순환시스템(HVAC System)이 연동되어 있지 않아 가연성 가스의 기관실내 유입을 막지 못했다. 즉, 기관실로 확산된 가연성 가스는 화재가스경보 시스템에 의해 알람은 발생하였지만 기관실 흡기 시스템상의 Fire Damper를 폐쇄하지 못하여 결국 가스는 기관실내로 유입되었다.

여덟째, BOP의 비상 작동 모드가 제대로 작동하지 않았다. BOP를 작동시키는 방법에는 컨트롤 판넬에서 스위치를 누르거나 자동으로 작동이 되는 두 가지 방법이 있다. BP의 보고서에 따르면 폭발에 발생하기 전에 TCP(Tool pusher's Control Panel)에서 BSR(Blind Shear Ram)을 작동시키지 않았다. 폭발

후에 TCP에서 EDS(Emergency Disconnect Sequence)가 작동되었으나 이전 폭발 및 화재로 인해 유압시스템이 손상되어 EDS가 제대로 작동되지 않은 것으로 추정하였다.

자동으로 작동되는 AMF(Automatic Mode of Function)도 작동되지 않았다. 사고 후, BOP를 조사한 결과 subsea control system의 Yellow Pod는 BSR 작동 슬레노이드가 손상되어 있었고, Blue Pod는 충전지 전압이 낮았던 것으로 확인되었다.

2.2.3 기타 해양플랜트사고 현황

Alexander Kielland는 1980년 3월에 에코피스크(Ekofisk) 유전에서 작업 중 전복된 노르웨이 반 잠수식 시추 설비로 123명이 사망했다. 사고 조사 보고에 따르면 칼럼에 연결된 보강재인 6개의 브레이스 중 하나에 피로균열이 발생하였고 이로 인해 나머지 5개의 브레이스에 과도한 하중이 인가되면서 칼럼이 붕괴되었고 결과적으로 데크가 침수되고 전복되었다.

Ocean Ranger는 1982년 2월 14일 히버니아(Hibernia) 유전에서 작업을 하던 중 전복되어 승무원 84명 전원이 사망하였다. 미국 해안 경비대 마린 보드 조사 보고서에 따르면 깨진 포트홀(porthole)로 인해 발라스트 제어실이 침수되고 이로 인해 발라스트 컨트롤 장비에 단락이 발생하였고 발라스트 탱크의 작동 불능으로 발라스트 작업이 오작동 하였다. 이 발라스트 오작동으로 인해 체인 로커가 침수 되었고 결과적으로 플랫폼이 침수되었다.

Petrobras 36(P-36)은 2001년 3월 20일 침몰하기 전 세계에서 가장 큰 반 잠수식 시추선 있었고 브라질 해안에서 130 킬로미터 떨어진 Roncador Oil Field에서 원유를 생산하고 있었다. aft Starboard column의 비상드레인 탱크에 과압으로 인한 폭발이 있었고 이어 탄화수소증기의 점화에 의한 두 번째 폭발이 있었다. 폭발로 인해 침수가 시작되었고 침수된 물을 배출하는 작업을 했음에도 불구하고 기상악화로 플랫폼을 포기하고 플랫폼 내 잔류 원유에 의해 세 번째 폭발을 하고 침몰하였다.

2.2.4 해양플랜트사고의 주요 원인

Hare 등은 Offshore 사고의 근본 원인에 관한 세부사항을 제공하는 보고서를 작성하였고, 그 보고서는 영국 HSE의 해양안전부(Offshore Safety Division)와 RIDDOR(Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations)의 조사 보고서를 통해 얻은 67건의 해외 사고에 대한 분석을 기반으로 하며 2004년에서 2008년 사이 발생한 사고들 중 사망자나 중상자가 발생한 사고들에 대해서만 고려하였다. 그러나 해양사고의 원인을 더 잘 이해하려면 중요한 사건뿐만 아니라 사소한 사건도 고려해야 할 뿐만 아니라 가능하다면 아차사고(Near-Miss)도 고려되어야 한다고 주장하였다(S.Zohra et al, 2018).

S.Zohra 등은 미국대륙붕에 설치된 석유 및 가스 시설에 대한 BSEE에 보고된 137건의 화재 사건에 대해 조사하고 분석하였다. 기술적, 운영적, 인적 및 조직적 요인에 대해 통계를 통해 분석하여 사고를 발생시키고 지연시키는 원인을 파악하고 예방을 위한 주요 조치사항에 대해 확인하였다. 연구에 따르면 화재 사고는 크게 장비문제(Equipment Failure)와 인적오류(Human Error)의 두 가지 원인이다. 상세 연구에 따라 각각의 원인에 영향을 미친 요소를 파악 하였는데, 장비 문제에 영향을 준 주요 요소는 Fig. 2.6과 같다.

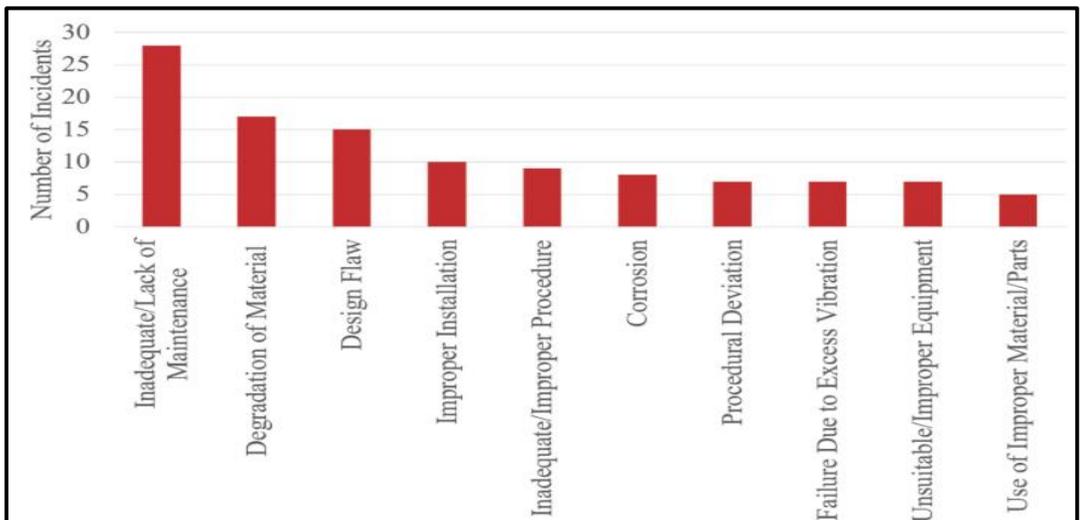


Fig. 2.7 Factors that appeared in conjunction with equipment failure

Fig. 2.6에 보이는 것과 같이 장비문제에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요소는 장비에 대한 부적절하거나 미비한 유지보수이다. 다음으로는 자재 성능의 저하, 설계상의 문제, 부적절한 설치 등이 장비 문제로 인한 사고에 많은 영향을 준 것으로 파악하였다.

인적오류에 영향을 준 요소는 Fig. 2.7과 같다. 가장 큰 영향을 미치는 요소는 불완전하거나 부적절한 작업 안전 분석 및 프로세스 위험 분석이었으며, 두 번째로 작업절차 미 준수, 작업절차 자체의 미비, 부적절한 관리감독 등이 주요 영향요소로 작용하였다고 주장하였다.

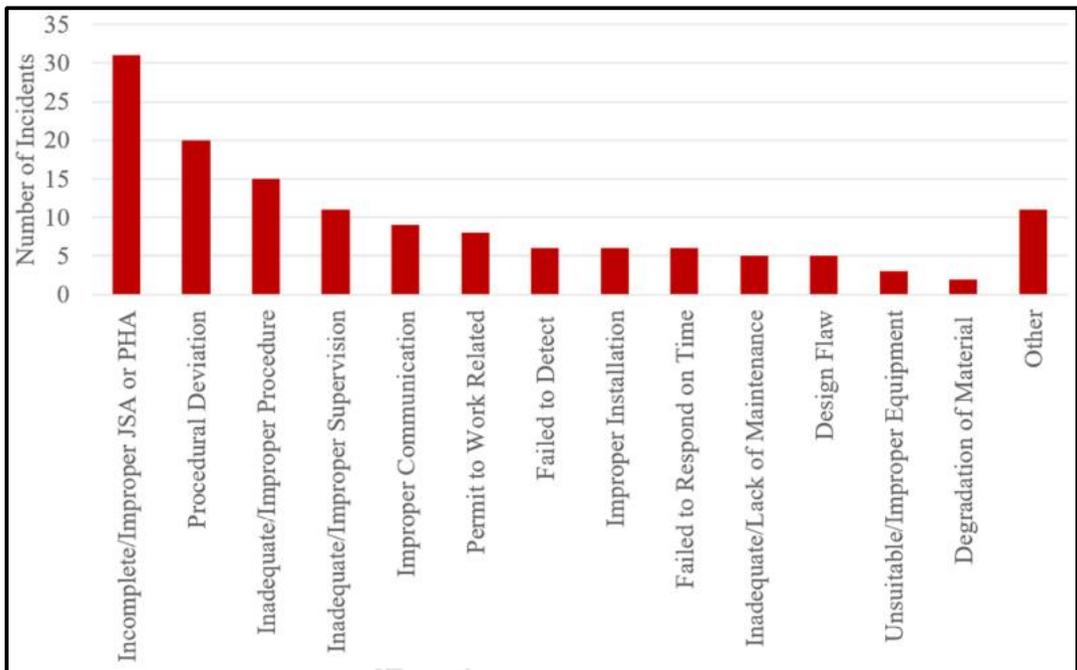


Fig. 2.8 Factors that appeared in conjunction with human error

S.Zohra 등은 다양한 영향요소를 제시하면서 표면적인 원인보다는 각 사고의 개별적 연구에 따른 심층 연구를 바탕으로 잠재되어 있는 근본원인을 파악하는 것이 중요하다고 강조하였다.

영국의 OSD(Offshore Safety Division)에서 Offshore 사고의 원인을 파악하기 위해서 HSL(Health and Safety Laboratory)에 분석을 의뢰하였다. 67건의 해양 사고를 표본을 바탕으로 분석되었고 사고의 직접적인 원인과 그 근본 원인에 대해서 분석하였다(John Hare et al, 2009).

보고서에 따르면 가장 흔한 사고의 종류로는 움직이는 물체에 의한 충돌, 권상이나 이동 중에 발생하는 부상, 높은 곳에서의 추락 그리고 미끄러지거나 넘어지는 사고로 조사되었다.

또한 사고의 직접적인 원인과 근본원인은 Table 2.2와 같다.

Table 2.2 Direct and underlying causes

Direct causes	Underlying causes
<ul style="list-style-type: none"> . Corrosion . Degradation of material properties . Human error . Impact/dropped object . Inadequate control . Inadequate equipment . Inadequate isolation . Inadequate procedures . Inadequate installation . Procedural violation . Slip/fall . Unsuitable equipment . Unsuitable PPE 	<ul style="list-style-type: none"> . Operating Procedure . Securing assessing competence . Hazard analysis/risk assessment . Permit to work . Supervision . Communication . Selection and management of contractors . High workload . Planned inspection

그밖에 사고 원인 관련 연구로는 실제 업무 중인 선원들을 대상으로 설문
을 실시하여 원인을 파악하려 하였던 Oyinkepreye L. Bebetoidoh의 연구이
다. Oyinkepreye는 선장, 엔지니어, 데크핸즈, 오일러 및 퀴터마스터를 포
함하여 나이지리아의 해양 석유 및 가스 산업과 관련된 선원에게 구조화
된 설문지를 통해 데이터를 수집하여 나이지리아의 해양사고 원인 및 대책
에 대하여 연구하였다. 사고의 주요 원인으로 인류, 환경, 자연, 설계 및 기
술적 요소임을 확인하고 정부의 강력한 규제가 해양사고의 예방을 위한 요
소인지를 파악하였다.

특이한 사항으로는 결과적으로 인적 요소와 환경 요소는 해양사고의 원인
으로 유의미 하였으나 기술적 요소는 무의미하다는 결론을 도출하였다. 또
한 정부의 강력한 규제는 해양사고를 줄이는 데에 긍정적인 역할을 한다는
결과를 바탕으로 정부에 의한 강력한 규제가 이행되고 해양사업자가 이를
준수하면 해양사고를 감소시킬 수 있음을 권고 하였다.

2.3 해양플랜트 안전관리 방안

2.3.1 영국의 해양플랜트 안전관련 법규

Piper Alpha 사고가 일어나기 전에 영국 해양 석유 및 가스 산업의 규제 초점은 보고의 구조적인 면에서 복잡하고 위험 부담이 최소화된 규범기반 규제에 기반을 두었다(Miller, 1991). 1970년대 까지 작업장에서 사람들의 안전과 복지를 관리하는 것은 업계표준 및 지식과 경험을 바탕으로 한 규정에 의해 통제되었다(Inge, 2007; Miller, 1991; Paterson, 2000). 1960년대 북해의 석유 및 가스 생산 설비 운영의 초기에 개발된 이러한 규범적 규제는 1930년대부터 육상의 석유 및 가스의 탐사 및 생산을 위해 사용된 규제 체제를 바탕으로 만들어진 규제의 조항들을 기반으로 하였다(Paterson, 2011).

1965년 영국의 첫 번째 시추 굴착 장치인 Sea Gem이 새로운 사이트를 찾아 이동 중에 붕괴되어 침몰하여 13 명의 사망자를 냈다. 이로 인해 해양 플랜트에 실질적인 법적 규정이나 상세한 규제 감독이 없었던 영국의 해상 안전 관련 경험 부족과 준비 부족이 드러났다(Kemp, 2011). 이후에 조사를 통해 기술적으로 급속도로 확대되는 산업에 적응하지 못했던 규제를 개발 하였다(Paterson, 2011).

이러한 발전을 배경으로 1971년 해양설비법(Offshore Installation (1971))이라는 해양설비 상에서의 건강과 안전을 다루는 주요 법령이 제정되었다. 오프쇼어 환경에 설치되는 시설을 설치하고 소유하는 소유자는 운영 및 설치의 안전에 대한 일반적인 책임이 있는 Offshore Installation Manager (OIM)를 지정하여 보건 및 복지를 보장하고 장비에 대한 질서와 규율을 유지하도록 규정하였다(Miller, 1991). 또한 국무부 장관은 규정 준수 검사를 감시하고 실시 할 수 있는 권한과 특권을 가진 해상 시찰관을 임명 할 수 있는 권한을 부여 받았다.

건강과 안전에 대한 이 최소한의 조치는 Roben 's Committee (1970-72)

보고서에서 새로운 규제기관인 Health and Safety Executive (Simpson, 1973)의 설치가 강조되었고, 이 법안은 건강과 안전을 위한 기본 법안이 된 1974년의 건강과 안전법(HSWA)의 제정을 그대 포함되었다. HSWA 법은 작업 환경과 관련된 다른 법령과 함께 영국의 산업 보건 및 안전을 다루는 주요 내용으로 구성되어 있다.

안전 사례 체제 (Safety Case Regime)의 채택은 운영자가 위험 및 위험에 대한 이해를 증명하는 유효한 문서를 제시하고 위험을 최소화하거나 완화하기 위한 적절한 위험 관리 조치를 보장 하는 제도 이다. 규제 당국이 일반적인 목표를 정립하고, 세부적인 사항은 독립적인 검증이 뒷받침되는 공식적인 안전 및 양적위험평가(QRAs)를 개별사업자가 실행하도록 규정 하였다(Paterson, 2000; Hunter and Paterson, 2011).

안전 사례를 통해 제정된 목표 설정 체계가 예상되고 잠재된 위험을 체계적으로 식별함으로써 운영자가 충분히 낮은 수준으로 위험을 줄일 수 있음을 보장하여야 한다(보건 및 안전 임원, 2006a, b, Paterson, 2007). 또한 운영자가 해양 설치물 상의 건강 및 안전에 관한 위험 관리에 대한 자세한 내용을 제공하도록 권고한다. 또한 “심각한 재해 및 질병 발생보고 규정 (RIDDOR) 1995” 에는 고용주, 사업자 및 근로현장의 책임자(근로현장을 통제하는 사람)에게 사고, 사건 및 위험한 사건의 보고를 하도록 하는 법적위임이 명시되어 있다(보건 및 안전 임원, 2013). 영국에서는 Step Change in Safety 및 EPOL(Emergency Preparedness Offshore Liaison) 그룹과 같은 업계 포럼이 영국 대륙붕(UKCS)에서의 해양플랜트 사고에 의한 부상 수준 감소 및 비상 대응 관련 해외 문제 개선에 중추적인 역할을 수행해 오고 있다.

2.3.2 노르웨이의 해양플랜트 안전관련 법규

노르웨이에 있는 면허 및 양여제도에 따라 운영 석유 회사는 특정 조건에 따라 주(State)에서 면허 또는 양수권을 취득해야 하며, 대부분은 법률에 의해 확정된다(Hunter, 2010). 경우에 따라 이러한 법률은 주와 관련 석유 회사 간에 사례별로 협상된다. 노르웨이의 해양 위험 규제에 대한 접근법에 대한 재고는 1977 년 Ekofisk Bravo 플랫폼의 파손으로 인해 10,000 피트의 생산 튜브가 풀리는 사고와 1980 년 Alexander Kielland 플랫폼의 전복으로 인해 123 명이 사망한 사고가 계기가 되었다(Linde and Engen, 2012).

수년 동안 노르웨이의 고도로 조정된 규제 체제는 성과 중심 (목표 지향적) 의 다양한 법령을 적용해 왔고 단일규제당국의 추진으로 많은 규제를 통합 했으며, 이 단일규제당국인 석유 안전국 (PSA)은 다른 규제 당국과도 활발한 협력을 한다(Dagg et al., 2011; Linde, 2011). Cullen Inquiry의 권고에 따라 영국의 보건 안전청 (Health and Safety Executive)과 마찬가지로 노르웨이는 다양한 법적 위임과 감시 하에 모든 보건, 안전 및 환경 제어 기능을 PSA로 이전했다. PSA는 기술 및 운영 안전 및 작업 환경에 대한 규제 당국의 역할을 수행하며 규제 역할은 계획 및 설계에서부터 건설 및 운영에 이르기까지 업계의 모든 단계를 망라하여 궁극적으로 해체에까지 이른다(노르웨이 석유 안전청, 2015).

2004년 규제 시스템의 포괄적인 구조조정으로 권한이 PSA에 이전되기 전까 Norwegian Petroleum Directorate (NPD)가 해상안전규제 기관이었다(노르웨이 석유 안전청, 2015). 해양 보건, 안전 및 환경 활동에 대한 권한을 가졌던 다른 당국으로는 기후 및 오염기구, 노르웨이 건강위원회, 노르웨이 방사선 방호 당국, 해안 지부 및 노르웨이 산업안전기구가 있다. 또한 이들 독립적인 기관은 석유 운영에 직접적인 영향을 받는 지방 당국과 카운티 협의회와 적절한 협력 관계를 수립하도록 되어있었다.

노르웨이 노동조합은 1977 년 작업 환경법 (Labor Environment Act of 1977) 의 통과 이후 노르웨이 근해 산업에 필수 항목이 되었다. 이는 안전

준수를 감시하고 보장하기 위한 노동조합을 중심으로 한 안전 대표자 네트워크를 기반으로 단체 교섭권을 보장한다(Karlsen and Linde, 2006; Hart, 2002; Hovden et al., 2008). 이 내부 통제 체제 하에서, 사용자는 조직의 라인 관리의 일부인 안전 대표자를 선정하고 일반 노동자 및 기타 직원의 산업 보건 및 안전 품질을 향상시키고 보호 할 의무가 있다(Hovden et al., 2008). 영국의 상황과 마찬가지로 건강, 안전 또는 안전에 관한 고용주와의 논의에서 직원을 대표 할 법적 권리를 가짐으로써 이중적 역할을 수행 한다. 복지 및 보건 안전 당국과의 협의 및 위험 및 위험한 사건의 조사, 불만 사항 조사, 작업장 검사 및 관련 문서 검사를 하여야 한다(Walters and Frick, 2010 ;Hovden et al., 2008).

또한 영국에서와 마찬가지로 업계 관계자와 이해 관계자가 정기적으로 만나서 상호 관심사에 대해 심의하고 “안전을 위해 함께 일하는 것“과 같은 과거 프로그램에 대한 주도권을 행사 한 다양한 규제 및 안전 포럼 및 해양 근로자에게 노르웨이 대륙붕의 규칙, 표준 및 법적 관행을 소개하는 목적의 훈련 프로그램이 존재한다(Linde, 2012).

2.3.3 영국과 노르웨이 당국의 공통 요소 통합

영국과 노르웨이의 해양 보건 안전 법을 통해서 신흥 석유 지역의 해외 보건 및 안전 위험규제의 실효성을 거두기 위하여 다음 두 가지 문제를 해결해야 한다.

첫째, 효과적인 규제 시스템은 현지의 지질학적 및 환경 적 조건의 위험성 프로파일을 인식하여 산업체가 내면화하거나 실용화 할 수 있는 법률 및 규정의 설계를 보장하는 구조를 갖추어야한다(Linde et al., 2012). 따라서 이것은 '모범 사례'의 구성 요소가 확인되고 다양한 작업 구조에 통합되어야 함을 의미한다. 규제 당국, 운영자 및 노동자를 대표하는 노동조합의 삼자 협상 과정은 이 점에서 중요한 요소이다.

둘째, 보건, 안전 및 환경 규제 시스템의 중요한 특성은 명확한 행정 및

제도적 장치뿐만 아니라 환경, 안전, 고용 기준 및 작업 환경, 건강 보호, 비상 계획, 기름 유출 대응 및 사고에 대한 책임이 명확하게 명시되어야 한다(Dagg et al., 2011).

영국은 특정한 측면을 규제하는 다양한 일반적인 규정을 하나로 통합하는 주요 법령을 가지고 있다. 노르웨이에서 석유 안전국은 주요 규제 당국이며 규제 시스템을 조정 한다.

이 두 지역 모두 석유 및 가스 활동에 대한 법률의 범위는 행정 및 제도적 조치뿐만 아니라 내부 모범사례를 발췌하여 활용하는 추세이다.

제 3 장 해양사고 영향요소의 상관관계에 대한 실증분석

3.1 연구자료

3.1.1 연구자료 수집

본 논문은 해양사고와 해양사고에 영향을 미치는 다양한 요소들에 대한 상관관계에 대한 실증적인 분석을 위하여 2012년 10월 2016년 9월까지 4년간 US Outer Continental Shelf에서 발생하여 보고된 4년간의 사고 사례를 월별로 수집하였다.

US Outer Continental Shelf에서 운영하는 사업자는 특정한 사고가 발생하면 미국 연방 규정집 (30CRF 250.188)에 따라 BSEE 지구 관리자에게 보고해야 한다. BSEE 웹 사이트에 따르면 사고의 유형은 폭발, 화재, 유정제어실패, 충돌 리프팅 등 다양하다. 2009년에서 2016년 까지 매해 400~800건의 사고가 발생하고 있으며, 이 자료는 사고가 지속적으로 발생하고 있다는 것을 나타낸다. BSEE에서는 이러한 사고에 대한 조사를 실시하고 사고에 대한 보고서를 지속적으로 시스템에 추가하여 해양플랜트 사고의 원인을 분석하기 좋은 데이터베이스를 제공하고 있다.

본 연구에서는 이 BSEE에서 제공하는 최신 4년간의 사고 보고서를 바탕으로 사고의 유형, 원인, 부상자수, 사고 건수의 상관관계에 대한 연구를 수행하였다. 사고의 유형은 폭발, 화재, 유정제어실패, 충돌(25,000달러 이상의 손해, 25,000달러 이하의 손해), 리프팅사고(크레인, 기타 리프팅 장비)로 구분하였다. 사고의 원인은 장비고장, 휴먼에러, 날씨, 트립, 누설, 수처리 장비로 인한 누설, 외부손상으로 구분하였다.

3.1.2 변수의 조작적 정의

본 연구의 변수는 Table 3.1과 같이 정의되었다. accident는 준사고를 포함하는 모든 사고로 정의하고 BSEE 보고서에 보고된 모든 사고를 적용하여 연구하

였다. 사고의 유형은 7가지로 정의 하였다. explosion_acc는 폭발과 관련된 사고 유형이고, explosion_fire는 화재와 관련된 사고, wellfail_acc는 Underground, Surface, Diverter 및 장비에서 발생하는 것으로, 제어되지 못하는 흐름의 발생으로 정의한다. 충돌사고는 손해의 정도에 따라 25,000 달러 이상의 손해를 발생시킨 충돌 사고는 bigcolliston_acc로 25,000 달러 이하의 손해를 입힌 충돌사고의 경우는 smallcollision_acc로 정의한다. 권상 장비 사고는 크게 크레인 관련사고 crane_acc 와 크레인 외의 권상 장비 lifting_acc로 정의한다.

사고의 원인에 대한 변수로는 장비고장의 원인은 equipmentfail_cau로 정의 하고 인적요인은 human_cau로 정의하였다. trip이나 slip 또는 낙하의 원인은 trip_cau로 정의하고 날씨로 인한 원인은 weather_cau로 정의한다. 유출이 원인인 경우 leak_cau로 정의 하였다. 수처리 장비 문제로 인해 플루이드 유출이 발생한 경우 h2o_cau로 정의 하였다. 또한 사고의 원인이 드릴링 플루이드의 선외 배출인 경우는 overboard_cau로 정의 하였다.

해양플랜트의 지리적 환경은 육상으로 부터의 거리와 해양플랜트가 설치된 지점의 수심을 고려하였다. 해양플랜트가 설치된 지점의 평균 수심은 depth_en으로 정의하고 육상으로 부터의 평균 거리는 distance_en으로 정의 한다.

Table 3.1 Definition of variables

	정의	출처
accident	near-miss를 포함한 보고된 사고	BSEE
explosion_acc	사고_폭발관련사고	BSEE
fire_acc	사고_화재관련사고	BSEE
wellfail_acc	사고_유정제어 실패관련 사고	BSEE
bigcollision_acc	사고_25,000 달러 이상손해의 충돌사고	BSEE
smallcollision_acc	사고_25,000 달러 이하손해의 충돌사고	BSEE
crane_acc	사고_크레인과 관련된 사고	BSEE
lifting_acc	사고_크레인 외의 권상장비와 관련된 사고	BSEE
equipmentfail_cau	원인_장비고장	BSEE
human_cau	원인_휴먼에러	BSEE
trip_cau	원인_트립,슬립,낙하	BSEE
weather_cau	원인_날씨	BSEE
damage_cau	원인_외부손상	BSEE
leak_cau	원인_누설	BSEE
h2o_cau	원인_수처리장비의 고장	BSEE
overboard_cau	원인_드릴링 플루이드의 선외 배출	BSEE
exploration_ph	업무단계_탐사 관련	BSEE
development_ph	업무단계_유정 개발 관련	BSEE
production_ph	업무단계_생산 관련	BSEE
drilling_ph	업무단계_시추 관련	BSEE
workover_ph	업무단계_Workover 관련	BSEE
completion_ph	업무단계_Completion	BSEE
depth_en	환경_평균수심	BSEE
distance_en	환경_육상으로부터의 평균 거리	BSEE

3.1.3 변수의 통계학적 특성

본 연구에 사용된 변수의 사고유형 별 통계학적 특성은 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Statistical characteristics of accident type

	ACCIDENT	EXPLOSION ACC	FIRE ACC	WELLFAIL_A CC	BIGCOLLISI ON ACC	SMALLCOLL ISION ACC	CRANE_AC C	LIFTING_AC C
Mean	45.70833	0.250000	9.020833	0.375000	0.812500	0.333333	12.14583	3.125000
Median	47.00000	0.000000	9.000000	0.000000	1.000000	0.000000	12.00000	3.000000
Maximum	68.00000	2.000000	16.00000	3.000000	3.000000	3.000000	19.00000	8.000000
Minimum	22.00000	0.000000	2.000000	0.000000	0.000000	0.000000	5.000000	0.000000
Std. Dev.	11.21731	0.564933	3.070031	0.703336	0.866793	0.630209	3.713057	2.027733
Skewness	0.059166	2.146625	0.278894	1.935102	0.765307	2.195360	-0.237165	0.694863
Kurtosis	2.384379	6.440000	3.085653	6.257024	2.728273	8.387755	2.231473	3.014209
Jarque-Bera	0.785984	60.53120	0.636929	51.17338	4.833225	96.61266	1.631247	3.863084
Probability	0.675034	0.000000	0.727265	0.000000	0.089223	0.000000	0.442364	0.144925
Sum	2194.000	12.00000	433.0000	18.00000	39.00000	16.00000	583.0000	150.0000
Sum Sq. Dev.	5913.917	15.00000	442.9792	23.25000	35.31250	18.66667	647.9792	193.2500
Observations	48	48	48	48	48	48	48	48

본 연구에 사용된 변수의 사고원인 별 통계학적 특성은 Table 3.3 와 같다.

Table 3.3 Statistical characteristics of causes

	EQUIPMENTF AIL CAU	HUMAN_CA U	WEATHER_CA U	DAMAGE_CA U	LEAK CAU	H2O CAU	OVERBOARD_ CAU
Mean	2.729167	5.291667	0.250000	0.041667	0.125000	0.000000	0.020833
Median	2.000000	5.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Maximum	8.000000	13.00000	2.000000	1.000000	1.000000	0.000000	1.000000
Minimum	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Std. Dev.	2.090908	2.967615	0.483779	0.201941	0.334219	0.000000	0.144338
Skewness	0.787755	0.324671	1.709126	4.587317	2.267787	NA	6.709790
Kurtosis	3.029863	2.638597	5.033058	22.04348	6.142857	NA	46.02128
Jarque-Bera	4.966244	1.104514	31.63554	893.6560	60.89796	NA	4061.831
Probability	0.083482	0.575649	0.000000	0.000000	0.000000	NA	0.000000
Sum	131.0000	254.0000	12.00000	2.000000	6.000000	0.000000	1.000000
Sum Sq. Dev.	205.4792	413.9167	11.00000	1.916667	5.250000	0.000000	0.979167
Observations	48	48	48	48	48	48	48

본 연구에 사용된 변수의 설치환경별 통계학적 특성은 Table 3.4와 같다.

Table 3.4 Statistical characteristics of environment

	DEPTH_EN	DISTANCE_EN
Mean	2381.247	78.96566
Median	2376.886	68.59732
Maximum	3811.563	230.8056
Minimum	1288.745	45.02439
Std. Dev.	582.7761	37.66461
Skewness	0.436525	2.757615
Kurtosis	3.084893	10.31675
Jarque-Bera	1.538848	167.9051
Probability	0.463280	0.000000
Sum	114299.9	3790.352
Sum Sq. Dev.	15962518	66675.27
Observations	48	48

본 연구에 사용된 변수의 부상자수 통계학적 특성은 Table 3.5와 같다.

Table 3.5 Statistical characteristics of number of injury

	INJURY
Mean	5.000000
Median	5.000000
Maximum	11.00000
Minimum	1.000000
Std. Dev.	2.458349
Skewness	0.452588
Kurtosis	2.467859
Jarque-Bera	2.159098
Probability	0.339749
Sum	235.0000
Sum Sq. Dev.	278.0000
Observations	48

3.1.4 연구방법

본 연구의 실증분석 방법은 최소자승법(Ordinary Least Squares Method: OLS)을 사용하였다. OLS에 의한 회귀모형의 추정치는 모집단 회귀모형을 추정하거나, 또는 모집단회귀선의 특성치인 모수 α 와 β 에 대한 가장 좋은 추정치를 구하는 것은 결국 어떻게 표본회귀선을 도출하는 것이 최선인가 하는 문제로 귀착된다. 적합도가 가장 큰 표본회귀선이란 오차항($e_i = Y_i - \hat{Y}_i$)의 합이 가장 작은 회귀선이다. 이러한 최적의 표본회귀선을 구하는 방법 중 가장 많이 사용되는 추정법이 OLS 이다.

오차항을 자승한 값들의 합이 최소가 되도록 하는 회귀선을 구하는 방법은 식 (1)과 같다.

$$\text{Min} \sum_{i=1, n} e_i^2 = \text{Min} \sum_{i=1, n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \text{Min} \sum_{i=1, n} (Y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta}X_i)^2 \quad (1)$$

최소자승 추정량의 도출은 다음 순서를 따른다.

$$\text{Min } L = \text{Min} \sum_{i=1, n} e_i^2 = \text{Min} \sum_{i=1, n} (Y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta}X_i)^2 \quad (2)$$

식 (2) 에 나타난 오차의 최소자승값을 구하려면 이식을 α^{\wedge} 와 β^{\wedge} 에 대해 1 차미분한 값이 식 (3) 및 식 (4)와 같이 0 이 되어야한다:

$$(\partial L / \partial \alpha^{\wedge}) = -2 \sum (Y_i - \alpha^{\wedge} - \beta^{\wedge} X_i) = 0 \quad (3)$$

$$(\partial L / \partial \beta^{\wedge}) = -2 \sum X_i (Y_i - \alpha^{\wedge} - \beta^{\wedge} X_i) = 0 \quad (4)$$

이를 다시 α^{\wedge} 와 β^{\wedge} 에 대하여 정리를 하면 식(5), 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \beta^{\wedge} &= (n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i) / [n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2] = \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) / \sum (X_i - \bar{X})^2 \\ &= (\sum X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}) / (\sum X_i^2 - n \bar{X}^2) = (\sum x_i y_i) / \sum x_i^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rightarrow \bar{X} (\text{표본평균}) = (1/n) \sum X_i, \bar{Y} (\text{표본평균}) = (1/n) \sum Y_i,$$

$$\rightarrow x_i (\text{편차}) = X_i - \bar{X}, y_i (\text{편차}) = Y_i - \bar{Y}$$

$$\alpha^{\wedge} = \bar{Y} - \beta^{\wedge} \bar{X} \quad (6)$$

α^{\wedge} 과 β^{\wedge} 은 알려지지 않은 모집단의 상수 α 과 β 의 최소자승추정량 (least squares estimator: LSE)이며, 이들은 확률함수형태의 확률변수이다.

최소자승추정량의 통계적 특성은 다음과 같다. 최소자승법에 의해 산출된 최소자승추정량 (α^{\wedge} 과 β^{\wedge})이 확률변수이라면, 이들의 통계적 특성 (분포, 평균, 분산)을 파악할 필요가 있다. 최소자승추정량은 기본 가정들이 충족되면 통계적으로 바람직한 특성, 불편성(unbiasedness), 효율성(eficiency), 선형성(linearity) 및 일관성(consistency)을 갖게 된다.

1) 불편성(unbiasedness)

최소승차법에 의해 도출된 추정량 (least squares estimator: LSE)은 불편성 (unbiasedness)를 갖게 된다.: $E[\hat{\alpha}] = \alpha$, $E[\hat{\beta}] = \beta$

추정량 $\hat{\alpha}$ 와 $\hat{\beta}$ 의 평균값은 모수인 특성치 α , β 의 실제값과 일치하게 되는 특성을 갖는다. 하나의 표본으로부터 구한 추정량은 평균적으로 모집단의 회귀계수와 같다.

2) 효율성

LSE 는 효율성을 갖는다: 모든 가능한 불편추정량(unbiased estimators)중에서 최소의 분산을 갖는다. LSE는 식 (7), 식 (8), 식(9)의 분산과 공분산을 갖는다.

$$E \text{ Var}(\hat{\alpha}) = \sigma^2 [\sum_{i=1,n} X_i^2 / n \sum_{i=1,n} (X_i - \bar{X})^2] \quad (7)$$

$$E \text{ Var}(\hat{\beta}) = [\sigma^2 / n \sum_{i=1,n} (X_i - \bar{X})^2] \quad (8)$$

$$E \text{ Cov}(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \sigma^2 [-\bar{X} / n \sum_{i=1,n} (X_i - \bar{X})^2] \quad (9)$$

첫째, 오차항의 분산값(σ^2)이 커질수록 LSE 의 분산은 커지고 LSE 는 덜 정확한 추정치를 낳게 된다.

둘째, 독립변수 X 의 값이 넓게 퍼져있을수록($\sum_{i=1,n} (X_i - \bar{X})^2$ 이 클수록) LSE 의 분산은 작아지고 독립변수의 변화에 의한 종속변수의 변화를 상대적으로 잘 설명할 수 있게 된다.

셋째, 표본의 수(n)가 증가할수록 $\sum_{i=1,n} (X_i - \bar{X})^2$ 의 값이 증가하게 되어 LSE 의 분산과 공분산이 작아진다. 이는 표본의수가 증가할수록 전체 모집단의 수에 근접하게 되어 모집단의 모수에 대한 정보를 더 정확하게 구할 수 있기 때문이다.

넷째, 공분산은 독립변수(X)의 평균(X)과 반대의 부호를 가진다.

3) 선형성(linearity)

LSE를 정의하면 식 (10), 식 (11) 과 같다.

$$\hat{\beta} = (\sum x_i y_i) / \sum x_i^2 = \sum C_i y_i, \quad [C_i = \sum x_i / \sum x_i^2] \quad (10)$$

$$\hat{\alpha} = Y - \hat{\beta} X = Y - X \sum C_i y_i \quad (11)$$

두개의 LSE 모두 y_i 의 1 차함수관계인 선형결합형태를 가진 선형추정량 (linear estimator)이라 한다.

3.2 실증분석

3.2.1 실증분석 결과

첫째, 사고건수를 종속변수로 하고 상수항을 포함한 독립변수로 사고 유형 즉 explosion_acc, fire_acc, wellfail_acc, bigcollision_acc, smallcollision_acc, crane_acc, lifting_acc 을 사용한 OLS 모형분석 결과는 아래 Table 3.6 및 Fig. 3.1 과 같다.

Table 3.6 OLS Result of accident and accident type

Dependent Variable: ACCIDENT
 Method: Least Squares
 Date: 04/12/18 Time: 09:00
 Sample: 2012M10 2016M09
 Included observations: 48

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	7.044222	3.515571	2.003721	0.0519
EXPLOSION_ACC	1.858216	1.517471	1.224548	0.2279
FIRE_ACC	1.477505	0.276827	5.337294	0.0000
WELLFAIL_ACC	1.062186	1.176344	0.902955	0.3720
BIGCOLLISIOIN_ACC	3.622624	0.991253	3.654590	0.0007
SMALLCOLLISION_ACC	1.073255	1.403391	0.764758	0.4489
CRANE_ACC	1.391193	0.246661	5.640109	0.0000
LIFTING_ACC	1.367863	0.410119	3.335284	0.0018
Adjusted R-squared	0.795826	Mean dependent var		45.70833
S.E. of regression	0.760096	S.D. dependent var		11.21731
Sum squared resid	5.494237	Akaike info criterion		6.396288
Log likelihood	1207.465	Schwarz criterion		6.708155
F-statistic	-145.5109	Hannan-Quinn criter.		6.514143
Prob(F-statistic)	22.27311			1.684463
	0.000000			

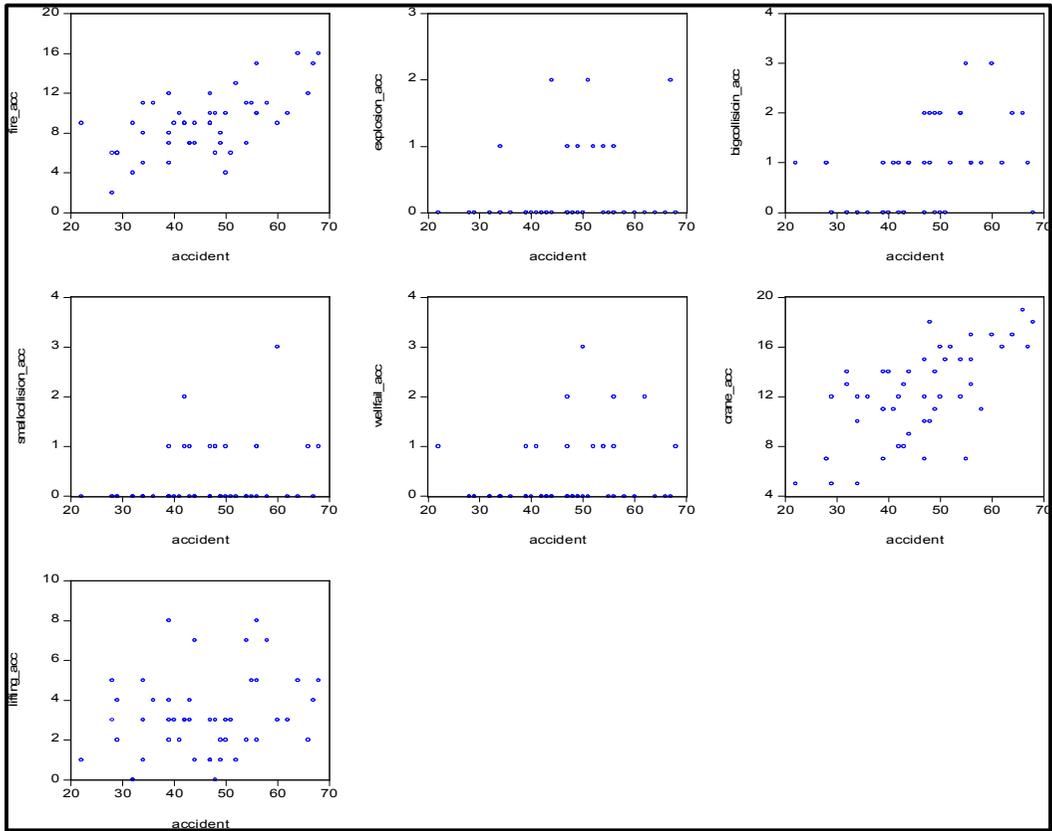


Fig. 3.1 Correlation of accident and accident type

분석결과 fire_acc, bigcollision_acc, crane_acc, lifting_acc 의 P-Value가 0.05 이하로 나타났다. P-Value는 귀무가설이 옳다는 가정 하에 검정 통계량이 계산될 확률을 나타내며, 이 P-Value는 작을수록 좋다. 본 연구에서는 0.05를 유의수준으로 채택하여 상기 분석 결과는 0.05 유의수준에서 유의미 하다고 할 수 있다. 이는 화재, 25,000 달러이상 손실을 초래한 충돌사고, crane 및 기타 권상장비의 사고가 사고 건수에 영향을 미친 것으로 이는 이미 알려진 해양플랜트 사고의 주요한 유형을 실증한 결과라 볼 수 있다.

모형의 적합도 결과를 살펴보면 결정계수(R-square) 값이 0.795826으로 사고 유형의 79.85%를 설명하고 있다. 결정계수는 회귀식이 얼마나 정확한 지를 나타내고 0에서 1까지의 값을 사용하며, 보통 결정계수가 1에 가까울수록 회귀식의 정확도는 매우 높다고 할 수 있다. 또한 Durbin-Watson 값이 2에 가까우면 잔차의 자기상관

이 없는 것으로 해당 모형은 잔차의 자기상관이 없다고 할 수 있다. Durbin-Watson 값은 회귀 모형의 오차에 자기 상관이 있는지를 검정하는 척도 있다. 자기 상관은 인접 관측치의 오차가 상관되어 있음을 의미한다. 오차가 상관되면 최소자승법이 계수의 표준 오류를 과소 추정할 수 있다. 표준 오차가 과소 추정되면 예측 변수가 유의하지 않은데 유의한 것으로 보여 질 수 있다. 이 Durbin-Watson 값이 2에 가까우면 자기상관을 무시할 수 있고, 0에 가까우면 정(positive)의 자기상관이 있고 Durbin-Watson 값이 4에 가까우면 부(negative)의 자기상관이 있다.

둘째, 사고건수를 종속변수로 하고 상수항을 포함한 독립변수로 사고 원인 즉 equipment_cau, human_cau, weather_cau, damage_cau, leak_cau, h2o_cau, overboard_cau 을 가진 OLS 모델을 분석한 결과는 아래 Table 3.7 및 Fig. 3.2 와 같다.

Table 3.7 OLS Result of accident and causes

Dependent Variable: ACCIDENT
 Method: Least Squares
 Date: 04/12/18 Time: 09:48
 Sample: 2012M10 2016M09
 Included observations: 48

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	34.40051	2.647599	12.99310	0.0000
EQUIPMENT_CAU	1.723723	0.839179	2.054058	0.0459
HUMAN_CAU	0.831661	0.567539	1.465383	0.1499
TRIP_CAU	3.303925	1.504549	2.195956	0.0334
R-squared	0.420516	Mean dependent var		45.70833
Adjusted R-squared	0.381006	S.D. dependent var		11.21731
S.E. of regression	8.825352	Akaike info criterion		7.272789
Sum squared resid	3427.021	Schwarz criterion		7.428723
Log likelihood	-170.5469	Hannan-Quinn criter.		7.331717
F-statistic	10.64320	Durbin-Watson stat		1.681678
Prob(F-statistic)	0.000022			

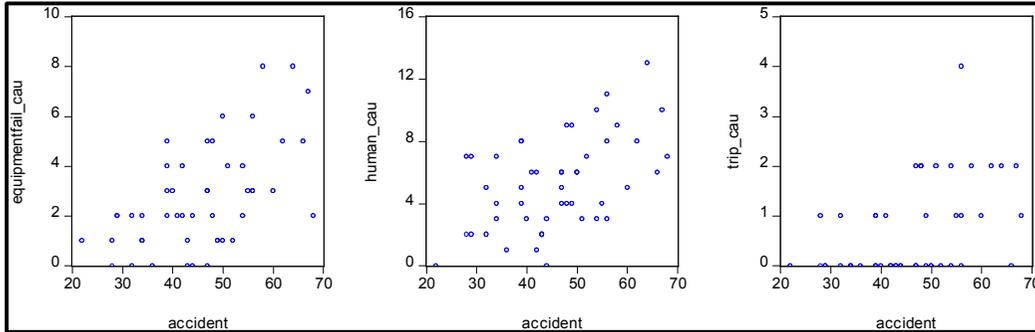


Fig. 3.2 Corelation of accident and accident causes

분석 중 weather_cau, damage_cau, h2o_cau, overaboard_cau 변수는 변별력이 없어 Near singular matrix error 발생으로 equipmentfail_cau, human_cau, trip_cau만으로 분석 하였다.

분석결과 equipment_cau 와 trip_cau 가 0.05 유의수준에서 사고건수에 유의하게 나타났다. 이는 고장 및 트립의 원인으로 인한 해양플랜트 사고의 주요한 원인을 실증한 결과라고 볼 수 있다.

셋째, 사고건수를 종속변수로 하고 상수항을 포함한 독립변수로 해양플랜트 설치 환경 즉 depth_en, distance_en을 가진 OSL 모델을 분석한 결과는 Table 3.8 및 Fig. 3.3 과 같다.

Table 3.8 OLS Result of accident and environment

Dependent Variable: ACCIDENT
 Method: Least Squares
 Date: 04/12/18 Time: 09:42
 Sample: 2012M10 2016M09
 Included observations: 48

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	58.30905	6.956523	8.381924	0.0000
DEPTH_EN	-0.005433	0.002859	-1.900240	0.0638
DISTANCE_EN	0.004268	0.044240	0.096467	0.9236

R-squared	0.077724	Mean dependent var	45.70833
Adjusted R-squared	0.036734	S.D. dependent var	11.21731
S.E. of regression	11.00935	Akaike info criterion	7.695829
Sum squared resid	5454.264	Schwarz criterion	7.812779
Log likelihood	-181.6999	Hannan-Quinn criter.	7.740025
F-statistic	1.896166	Durbin-Watson stat	0.944573
Prob(F-statistic)	0.161946		

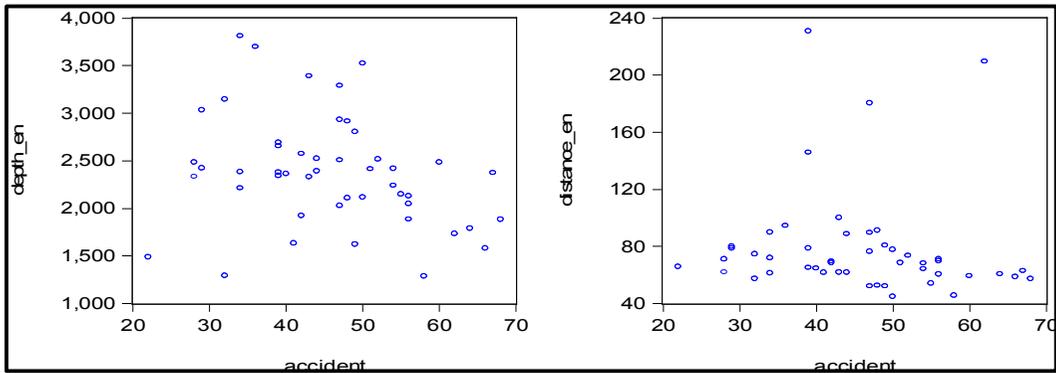


Fig. 3.3 Corelation of accident and environment

분석결과 depth_en, distance_en 가 사고건수에 유의하지 않게 나타났다. 이는 해양플랜트의 지리적 설치위치가 모두 사고건수에 유의한 영향을 미치지 못하였으므로 설치 환경은 해양플랜트 사고와 상관관계가 없음을 알 수 있다.

넷째, 부상자수를 종속변수로 하고 상수항을 포함한 독립변수로 해양플랜트 사고유형 즉 explosion_acc, fire_acc, wellfail_acc, bigcollision_acc, smallcollision_acc, crane_acc, lifting_acc 을 사용한 OLS 모형분석 결과는 Table 3.9 및 Fig. 3.4 와 같다.

Table 3.9 OLS Result of number of injury and accident type

Dependent Variable: INJURY
 Method: Least Squares
 Date: 06/11/18 Time: 10:55
 Sample: 2012M10 2016M09
 Included observations: 48

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	3.159244	1.471501	2.146953	0.0379
EXPLOSION_ACC	-0.656603	0.635163	-1.033755	0.3075
FIRE_ACC	0.085091	0.115870	0.734367	0.4670
WELLFAIL_ACC	1.314265	0.492379	2.669216	0.0109
BIGCOLLISION_ACC	0.633882	0.414906	1.527774	0.1344
SMALLCOLLISION_ACC	0.677440	0.587413	1.153261	0.2556
CRANE_ACC	-0.013730	0.103244	-0.132985	0.8949
LIFTING_ACC	0.021188	0.171662	0.123427	0.9024
R-squared	0.300627	Mean dependent var		4.895833
Adjusted R-squared	0.178237	S.D. dependent var		2.536873
S.E. of regression	2.299705	Akaike info criterion		4.654451
Sum squared resid	211.5458	Schwarz criterion		4.966318
Log likelihood	-103.7068	Hannan-Quinn criter.		4.772306
F-statistic	2.456297	Durbin-Watson stat		1.901200
Prob(F-statistic)	0.034071			

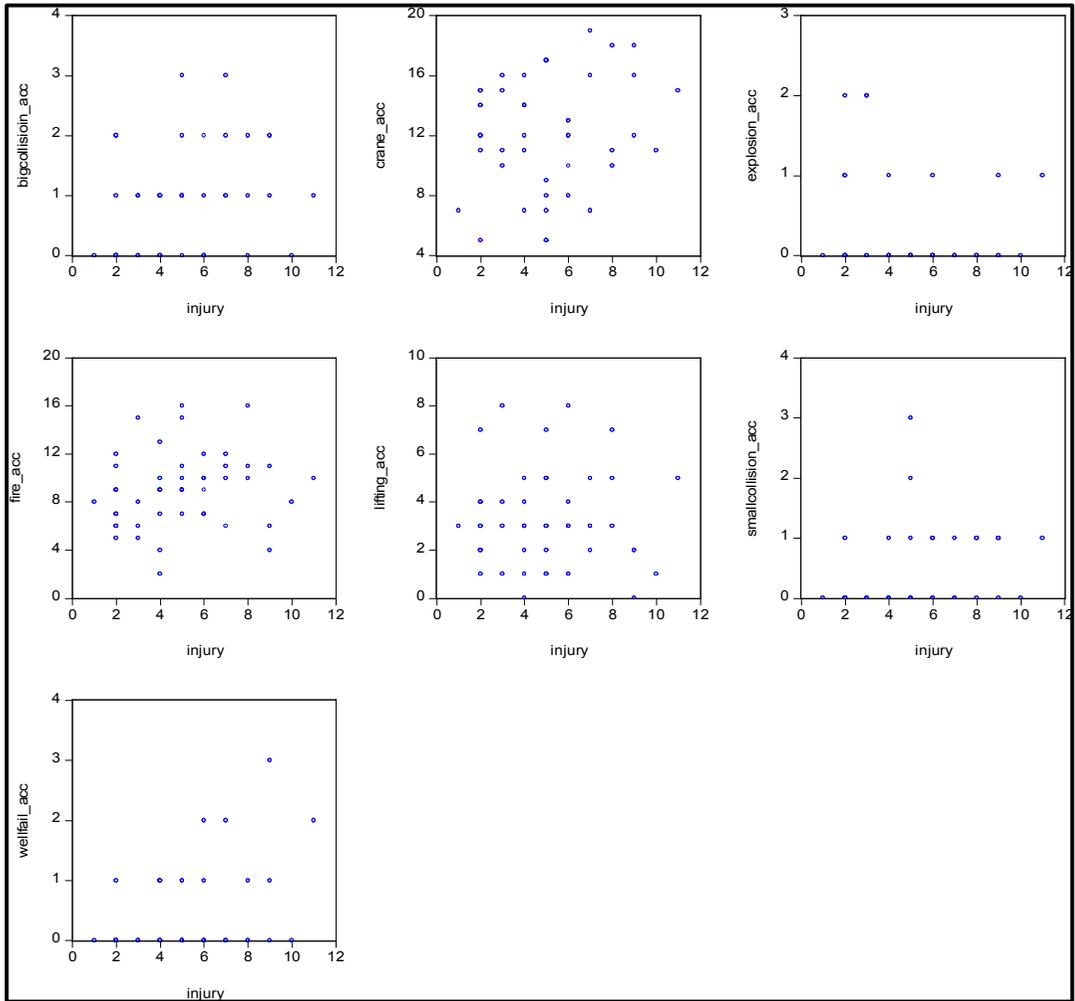


Fig. 3.4 Corelation of injury and accident type

분석결과 wellfail_acc가 0.05 유의수준에서 부상자수에 유의하게 나타났다. 이는 유정 제어 실패가 부상자수에 영향을 미치는 것을 나타낸다.

다섯째, 부상자수를 종속변수로 하고 상수항을 포함한 독립변수로 사고 원인 즉 equipment_cau, human_cau, weather_cau, damage_cau, leak_cau, h2o_cau, overboard_cau)을 가진 OSL 모델을 분석한 결과 Table 3.10 및 Fig. 3.5 와 같다.

Table 3.10 OLS Result of injury and causes

Dependent Variable: INJURY
 Method: Least Squares
 Date: 06/11/18 Time: 10:34
 Sample: 2012M10 2016M09
 Included observations: 48

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	3.094497	0.711531	4.349066	0.0001
EQUIPMENTFAIL_CAU	-0.212489	0.225526	-0.942195	0.3512
HUMAN_CAU	0.410116	0.152524	2.688869	0.0101
TRIP_CAU	0.316587	0.404341	0.782969	0.4378

R-squared	0.181714	Mean dependent var	4.895833
Adjusted R-squared	0.125922	S.D. dependent var	2.536873
S.E. of regression	2.371777	Akaike info criterion	4.644811
Sum squared resid	247.5143	Schwarz criterion	4.800745
Log likelihood	-107.4755	Hannan-Quinn criter.	4.703739
F-statistic	3.256987	Durbin-Watson stat	1.760546
Prob(F-statistic)	0.030352		

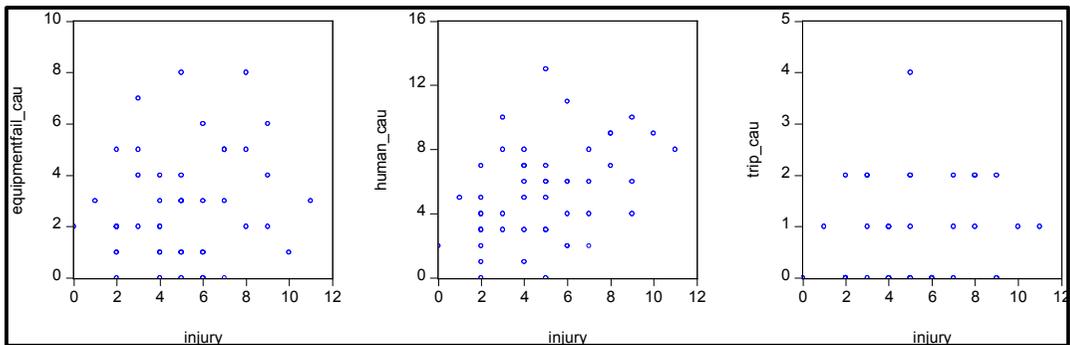


Fig. 3.5 Correlation of injury and causes

분석 중 weather_cau, damage_cau, h2o_cau, overboard_cau 변수는 변별력이 없어 Near singular matrix error 발생으로 equipmentfail_cau, human_cau, trip_cau만으로 분석 하였다.

분석 결과 human_cau 가 0.05 유의수준에서 부상자수에 유의하게 나타났다. 이는 인적요인이 부상자수에 영향을 미치는 것을 나타낸다.

3.2.2 실증분석 결과 요약

OSL 모델로 분석한 결과 각 영향요소별 결과는 다음과 같다.

첫째, 사고 건수와 사고유형별 분석에서는 화재사고, 25,000달러 이상의 충돌사고, 크레인사고, 크레인 이외의 권상장비관련 사고가 해양플랜트에서 주요 사고유형으로 분석되었다.

둘째, 사고 발생 원인과 사고건수와의 관계를 살펴보면 장비의 고장과 트립이나 슬립에 의한 사고가 가장 많은 사고건수를 발생시킴을 알 수 있다.

셋째, 사고 건수와 해양플랜트의 설치환경의 관계를 분석한 결과에서는 설치된 평균 수심 및 육상으로 부터의 평균 거리는 무의미 하다고 분석되었다.

넷째, 부상자수와 사고의 유형과의 관계를 분석한 결과 사고 건수와는 다르게 유정제어실패가 부상자 수에 영향을 미친다는 결과가 도출되었다.

다섯째, 부상자수와 사고의 원인과의 관계에서는 인적요인이 부상자수에 유의미하게 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

분석 결과 특이한 사항으로는 사고 건수에는 유정제어 실패가 유의미한 관계를 나타내지 않지만 부상자 수의 측면에서 볼 때에는 유정제어 실패가 유의미한 것으로 볼 때 유정제어실패로 발생하는 해양플랜트 사고에서는 사고의 빈도는 낮지만 발생 시 많은 부상자를 발생시키는 것을 알 수 있다.

위의 결과에 따라 해양플랜트사고는 장비의 고장이나 트립 혹은 슬립으로 인한 화재사고, 충돌사고, 크레인 및 권상장비의 사고가 가장 빈번하게 일

어나고 있고, 부상자 측면에서는 인적요인으로 인한 유정제어 실패가 많은 부상자를 발생시키는 주요 영향요소라고 판단된다.

따라서 해양플랜트 상의 빈번한 사고의 건수를 감소시키기 위해서는 화재 및 충돌사고의 세부 원인을 심도 있게 연구할 필요가 있다고 판단되며, 인적피해를 감소시키기 위해서는 유정제어 실패가 인적요소에 어떠한 영향을 미치는지 세부원인의 파악과 대책수립에 많은 노력이 필요하다고 판단된다.

제 4 장 결론

본 논문에서는 해양플랜트 사고와 관련된 영향 요소들의 관계를 연구하였다. 미국 안전 환경국(BSEE)에서 제공하는 실제 사고 데이터를 바탕으로 해양플랜트 사고의 건수와 유형, 원인 그리고 설치 환경의 상관관계를 분석하였고, 또한 부상자 수와 유형, 원인의 상관관계를 E-Views를 사용하여 분석하였다.

본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 사고 건수와 사고의 유형간의 상관관계를 분석한 결과 화재사고, 25,000달러 이상의 손상을 초래한 충돌사고, 크레인에 의한 사고, 크레인 이외의 기타 권상장비에 의한 사고가 0.05 유의 수준에서 유의미 하였다. 이는 빈번하게 발생하는 사고의 유형은 화재사고, 충돌사고, 크레인 및 권상장비 사고라는 것을 의미한다.

2. 사고건수에 영향을 미치는 사고의 원인으로는 장비의 고장과 트립 혹은 슬립이 0.05 유의 수준에서 유의미 하므로 사고 건수에 영향을 주는 주요한 원인으로 밝혀졌다.

3. 사고건수와 해양플랜트의 설치환경 즉, 설치된 수심 및 육상으로 부터의 거리간의 상관관계 에서는 유의미한 결과를 얻지 못 하였다. 이는 해양플랜트의 지리적 설치환경은 사고의 발생에 영향을 주지 못한다는 것을 의미한다.

4. 부상자수와 사고의 유형을 분석해 본 결과 사고건수와는 다르게 유정제어 실패가 0.05 유의수준에서 유의하여 부상자 수에 영향을 미치는 사고의 유형은 유정제어 실패라는 결과를 얻었다.

5. 부상자수와 사고의 원인간의 상관관계를 분석한 결과에서는 인적요인이 0.05 수준에서 유의미 하였다. 이는 부상자를 발생시키는 사고의 주요 원인이 인적요인이라는 것을 의미 한다.

본 논문에서는 해양플랜트 사고의 주요 유형 및 원인이 사고의 발생건수의 측면에서 접근할 때와 인명피해 정도의 측면에서 접근할 때 각각 주요 유형 및 원인이 다르다는 결론을 얻었다. 이는 각각의 접근 방법에 따라 사고 대책을 수립할 때 고려해야 할 요소들도 달라져야 한다는 것을 의미한다.

그러나 본 논문에서는 BSEE에 보고된 내용만을 바탕으로 분석되었기 때문에 보편적인 해양플랜트에 적용하기 위해서는 세계 각 구역의 해양플랜트 사고 자료를 바탕으로도 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 사고의 발생 건수 및 인명 피해 건수만을 바탕으로 분석 되었으므로 개별 사고의 심각성에 대해서는 고려되지 않았다. 따라서 표적적인 사고의 원인보다 좀 더 근본적인 사고의 원인을 발굴하여 대책을 마련하기 위해서는 각 개별 사고의 심각성을 고려한 심층적인 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 김동준, 2013. 한국동력기계공학회지 제 17권 제 3호 : 해양플랜트 산업 Offshore Industry.
- 나성, 2013. 한국선급 Offshore General Risk Assessment, Offshore 위험도 평가 교재.
- 배정훈, 노윤화, 신성철, 김수영, 2012. 불확실성을 고려한 해양플랜트 인명사고의 위험도 정량화 방법에 대한 연구. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 113-118.
- 오병근, 2010. 해양플랜트 Topsides 화재 위험도 평가에 관한 연구 - 화재 발생빈도 해석. 석사학위논문: 부산대학교.
- 윤효영, 2016. 해양플랜트 오염피해에 대한 책임과 보상제도의현황 및 개선 방안. 강원대학교 비교법학연구소.
- 전병민, 2014. 해양플랜트 시장동향 분석을 통한 국내 산업발전 방안연구 . 석사학위논문: 조선대학교.
- 정인철, 2016. 해양플랜트에서 MINLP를 이용한 탈출 시간 해석 및 최적배치. 석사학위논문:연세대학교.
- 한국석유공사, 2013. Petronet-국제석유산업동향.
- Dodd Susan, 2013. *Remembering the Ocean Ranger disaster: the weight of memory and injustice*. Our Times: Canada's Independent Labour Magazine p.35.
- Elsevier B.V, 2001. The aftermath of Petrobras's P-36 platform disasterDennis C.Hendershot, 2013. *Process safety: Remembering Piper Alpha*, Journal of Chemical Health and SafetyVolume 20, Issue 3, May - June 2013, Pages 58-59.
- continues to unfold. Oil and Gas Journal, 7 May 2001, Vol.99(19), p.8.
- Ferris,J 2014. *Environmental Considerations in Offshore Decommissioning and Removal* ,Antavaya Convex, 6th June 2014, Indonesia Abandonment and Site Restoration Conference.

International Offshore & Gulf of Mexico Report, 2017. *Decommissioning of Offshore Oil and Gas Facilities Rising Sharply*. Pipeline & Gas Journal, Vol.244 (4) pp.58-60.

Jackson, A., 2009. *New technology for innovative ship design: a case study of the warship*. Ph.D. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.

John Hare, Michael Johnson, 2009. *Underlying Causes of Offshore Incidents*, Hazard Reduction Group, Health and Safety Laboratory.

Lee, S.H. & Nam, Y.S., 2010. *Construction of preliminary ship design system*.

Lodi, E. Veseley, M. & Vigen, J., 2000. Link managers for grey literature. *Proceedings of the 4th International Conference on Grey Literature*, Washington, DC, October 4-5, 2000, GreyNet: Amsterdam, pp.116-134.

M.S. Mannan, R.A. Mentzer, J. Zhang, 2013. *Framework for creating a Best-in-Class safety culture*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp. 1423-1432.

M.S. Mannan, H.H. West, K. Krishna, A.A. Aldeeb, N. Keren, S.R. Saraf, Y.-S. Liu, M. Gentile, 2005. *The legacy of Bhopal: the impact over the last 20 years and future direction*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp. 218-224.

Nam, J.H., Sohn, S., & Singer, D.J., 2012. Estimation of geometry-based manufacturing cost of complex offshore structures in early design stage. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(3), pp.291-301.

Offshore, 2018. *Global offshore industry looks ready to turn the corner toward growth*, Available at:

<https://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-78/issue-5/global-outlook/global-offshore-industry-looks-ready-to-turn-the-corner-toward-growth.html> (Accessed: 19th Sep. 2018).

Okoh Peter, Haugen Stein, 2013. *Maintenance-related accidents : Classification of cause and case study*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries.

Oyinkepreye Bebetidoh, Robert Poku, 2016. *Marine Offshore Accidents in Nigeria, Causes and Necessary Preventive Measures*, American Journal of Engineering Research, Vol.5, pp.177-183.

Pal Skalle, Agnar Aamodt, Karin Laumann, 2013. *Integrating human related errors with technical errors to determine causes behind offshore accidents*. Safety Science.

R. Pula, F.I. Khan, B. Veitch, P.R. Amyotte, 2005. *Revised fire consequence models for offshore quantitative risk assessment*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp.443-454.

Strategy&, 2018. *Oil and Gas Trends 2018-19* Available at:
<https://www.strategyand.pwc.com/trend/2018-oil-gas> (Accessed: 19ThSep.2018).

S.Zohra Hlim, Sumder Janardanan, Tatiana Flechas, M.Sam Mannan, 2018, *In search of causes behind offshore incidents: Fire in offshore oil and gas facilities* . Journal of Loss Prevention in the Process Industries.

Theophilus Acheampong, Rainer Akumperigya, 2018. *Offshore risk regulation : A comparative analysis of regulatory framework in Ghana, the United Kingdom and Norway* . Energy Policy.

T.Deacon, P.R.Amyotte, F.I.Khan, SMach Kinnon, 2013. *A framework for human error analysis of offshore evacuations*. Safety Science.

Thomas G Sætren, 2004. *Offshore Blow-out Accidents - An Analysis of Causes of Vulnerability Exposing Technological Systems to Accidents*. University of Oslo.

감사의 글

이 논문이 나오기까지 많은 분들의 도움을 받았습니다. 준비 없이 시작한 석사과정으로 중간에 포기하고 싶기도 했지만 그때마다 도움을 주신 많은 분들 덕분에 늦었지만 무사히 학업을 마칠 수 있었습니다. 부족하지만 이 지면을 통해 감사를 전합니다.

우선, 연구에 대한 아낌없는 지도를 해주신 지도교수님이신 조권희교수님께 깊은 존경과 감사의 뜻을 전합니다. 논문작성을 포기하지 않도록 독려해 주시고 논문에 대해서 아무것도 모르는 저를 기꺼이 지도학생으로 받아주셔서 아낌없는 지도를 해주신 덕분에 무사히 졸업을 할 수 있었습니다.

석사과정 중 많은 가르침을 주신 이명호 교수님과 다양한 연구방법을 가르쳐주시고 조언해 주신 예병덕교수님, 석사 졸업 논문에 날카로운 지적과 조언을 해주신 이상태교수님, 노범석교수님께도 진심으로 감사드립니다.

또한, 본인의 학업으로 바쁜 와중에도 논문에 대한 아낌없는 조언과 변함없는 지지를 해준 남편에게도 감사의 뜻을 전하고 마지막으로 항상 믿어주시고 든든한 버팀목이 되어 주시는 부모님께 깊은 감사를 전합니다.