



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](#)

경영학석사 학위논문

해양 석유 생산 및 수송 최적화 문제에  
관한 연구

A Study on the Optimization Problem for  
Offshore Oil Production and Transportation



지도교수 김 시 화

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

해운경영학과

김 창 수

본 논문을 김창수의 경영학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

조 성 철

(인)

위 원

김 태 균

(인)

위 원

김 시 화

(인)

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

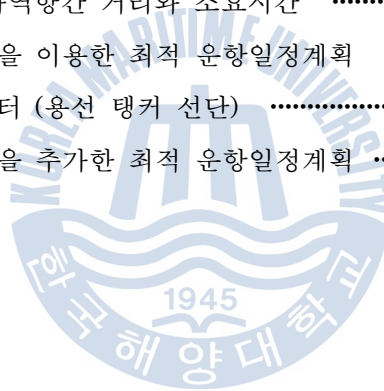
List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	v
<b>1. 서론</b>	
1.1 해양 석유생산(Offshore oil production) 개요 .....	1
1.2 해양 석유수송(Offshore oil transportation) 개요 .....	4
1.3 연구의 대상과 방법 .....	7
<b>2. 선행연구</b>	
2.1 해양 석유생산의 특성과 현황 .....	9
2.2 해양 석유생산의 최적화 .....	13
2.3 해양 석유수송의 최적화 .....	14
<b>3. 문제의 개요 및 정식화</b>	
3.1 문제의 개요 .....	17
3.2 문제의 정식화 .....	19
<b>4. 자료의 준비 및 계산실험</b>	
4.1 자료의 준비 .....	21
4.2 계산실험 - 해양 석유생산의 최적화 .....	23
4.3 계산실험 - 해양 석유수송의 최적화 .....	28

5. 결론	
5.1 결론 .....	42
5.2 향후 과제 .....	43
감사의 글 .....	44
참고문헌 .....	45



## List of Tables

<b>Table 1</b> Baltic Dirty Tanker Index 2012 .....	6
<b>Table 2</b> Route Description for Baltic Dirty Tanker Index .....	7
<b>Table 3</b> Costs for Producing Crude Oil and Natural Gas, 2007-2009 .....	10
<b>Table 4</b> 가상 해양 유전 개요 .....	19
<b>Table 5</b> 가상 수요지의 수요량 .....	23
<b>Table 6</b> 가상 해양 플랜트의 목표 생산량 .....	23
<b>Table 7</b> 선박 데이터 (자사 탱커 선단) .....	30
<b>Table 8</b> 화물 데이터 .....	31
<b>Table 9</b> 선적항과 하역항간 거리와 소요시간 .....	33
<b>Table 10</b> 자사 선단을 이용한 최적 운항일정계획 .....	35
<b>Table 11</b> 선박 데이터 (용선 탱커 선단) .....	37
<b>Table 12</b> 용선 선단을 추가한 최적 운항일정계획 .....	38



## List of Figures

Fig. 1	Type of offshore drilling rig .....	3
Fig. 2	Offshore product(Gas) transportation concept .....	4
Fig. 3	1 year term rates of tanker .....	5
Fig. 4	World Oil Production and Consumption .....	10
Fig. 5	Onshore vs. Offshore Oil Production .....	11
Fig. 6	Operational Platforms in 2013 .....	12
Fig. 7	Operational Platforms in 2018 .....	12
Fig. 8	해양 석유 생산-수송 네트워크 .....	17
Fig. 9	해양 석유 유전의 구성 .....	19
Fig. 10	MS Office Excel 해 찾기 프로그램의 가동, 해답보고서 .....	24
Fig. 11	해양 석유 생산 최적화 실험(시장 수요가 높을 경우) .....	25
Fig. 12	유정의 선택(시장 수요가 높을 경우) .....	26
Fig. 13	해양 석유 생산 최적화 실험(시장 수요가 낮을 경우) .....	26, 27
Fig. 14	유정의 선택(시장 수요가 낮을 경우) .....	27
Fig. 15	MoDiSS 프로그램에서의 LINDO optimizer 구동 .....	29
Fig. 16	자사선단을 이용한 최적 운항일정계획을 보여주는 MoDiSS 화면 .....	34
Fig. 17	용선 선단을 추가한 최적 운항일정계획을 보여주는 MoDiSS 화면 .....	38

# A Study on the Optimization Problem for Offshore Oil Production and Transportation

Changsoo Kim

Department of Shipping Management  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

As offshore oil & gas production has peculiar nature ‘on the sea’, it requires huge amount of time and cost with multiple variables. And every process are controlled by elaborate series of plans to reducing loss of lives, environment and property. This paper presents a methodology for optimal design of offshore production and transportation. Mixed integer linear programming which is performed by Microsoft Excel solver is applied to crude oil production optimization of hypothetical offshore oil fields. Optimal design of maritime transportation from offshore oil field have been derived from MoDiSS ship scheduling program which is utilizing Set Packing Program.

**KEY WORDS:** Offshore production; Offshore drilling; Offshore field; Offshore plant; Optimization; Well cost; Maritime transportation problem; Mixed integer programming; 해양플랜트; 최적화; 생산; 해사수송문제



## 제 1장 서론

### 1.1 해양 석유 생산(Offshore Oil production)의 개요

Offshore라는 단어는 여러 의미를 가지고 있는데, 지정학적인 표현일 경우에는 말 그대로 ‘onshore’의 반대 의미로써 ‘육상(shore)과 떨어진(off)’ 즉 ‘해양’이라는 의미를 담고 있다. 특히 offshore가 석유 및 가스 산업과 관련하여 쓰일 때는 해상에서 이루어지는 석유 및 가스 관련 산업을 통칭하는 의미로 쓰인다.

석유를 얻기 위한 최초의 육상 시추(drilling)는 AD 347년 중국에서 기원된 것으로 알려져 있는데, 대나무 장대를 이용하여 약 240m까지를 시추했다고 하며, 여러 기록들에 의하면 9세기부터 현재의 아제르바이잔의 바쿠(Baku)지역에 유전지대가 형성되었다고 한다.

1891년경에 미국 오하이오(Ohio)주의 그랜드 레이크 세인트 메리스(Grand Lake St. Marys)의 담수대(fresh water zone)에서 브리슨(Bryson), 라이리 오일(Riley Oil), 저먼-아메리칸(German-American) 그리고 뱅커스 오일(Banker's Oil)등의 소규모 지역 기업에 의하여 최초의 수중(水中) 석유 유정(oil well)이 시추되었다. 1896년에는 미국 캘리포니아(California)의 산타 바바라(Santa Barbara) 해협에서 석유를 얻기 위한 최초의 해양 시추(offshore drilling)가 시작되었다. 이는 목제(木製) 부두를 연장하여 해안에서 태평양을 향하여 시추 시설을 설치한 형태였는데, 1937년 까지만 해도 해양 시추는 육지로부터 1NM<sup>1)</sup>정도 떨어진 해상에서 약 14 feet 대의 수심 범위 안에서만 이루어졌었다. 그 후 1947년에 캐르-맥기 오일 인더스트리(Kerr-McGee Oil Industries)가 루이지애나(Louisiana) 해안에서 10.5 NM 떨어진 지점의 18 feet대 수심에서 시추 작업을 하였는데, 이는 최초로 육지가 보이지 않을 정도로 멀리 떨어진 지점에서의 시추라는 의미를 가진다. 그 후 해양 시추는 단순히 육상 시추기술을 해상에서 응용하던 수준에서 벗어나, 더욱 깊은 바다에서 작업하기 위한 새로운 기술들이 속속 개발

---

1) NM (Nautical mile, 1NM: 1.852 Km)

되고 도입되었다. 대부분 목제였던 고정식 플랫폼의 재질이 철제(鐵製)로 바뀌었으며, 멕시코만(gulf of Mexico)의 390 feet 수심대를 시추하기 위하여 잭-업 리그(jack-up rig)<sup>2)</sup>가 개발되었다. 1957년에는 최초의 시추선(drillship)<sup>3)</sup>인 ‘CUSS I’ 이 수심 400 feet대를 시추하였으며, 1963년에는 수심 600 feet 까지 작업이 가능한 반잠수식 시추설비(semi-submergible rig)<sup>4)</sup>가 시추작업에 도입되었다. 그리고 1970년에는 육상으로부터 10 Km 지점에서 석유 생산을 하게 되는 등 해양 시추 & 생산은 점점 더 심해로 그 범위를 넓혀 가게 되었다. 그 결과 1954년에 하루 133,000 배럴(전체 미국 석유 생산량 중 2%)이던 해양 석유 생산량이 1971년에는 하루 1,700,000 배럴 (전체 미국 석유 생산량의 약 20%)까지 증가하였으며, 1973~1974년 사이에 일어난 1차 석유판동<sup>5)</sup>으로 인해 각국은 해외 자원의 의존도를 줄이기 위한 노력을 기울였으며 해양 자원 개발도 그의 일환이 되었다. 비록 1980년대 중반의 유가 폭락으로 인하여 육상 석유 생산과 마찬가지로 해양 석유 생산도 침체기를 겪은 바 있었지만, 육상 자원의 고갈에 대한 우려와 OPEC 등 기존 산유국들의 ‘자원의 무기화’ 정책은 많은 국가들로 하여금 해양 기술개발에 대한 의욕을 더욱 불태우게 하였다. 특히 미국, 영국, 노르웨이, 프랑스 등 이전부터 자국 영해 또는 식민지에서의 경험을 바탕으로 한 해양 개발, 생산기술이 앞선 국가들은 ‘자원의 무기화’에 대비한 ‘자원 개발 기술의 무기화’를 꾀하여 원천기술을 계속 발전시켜나갔으며 이들에 의하여 비약적으로 발전한 탐사와 각종 선박, 설비의 건조, 운용기술은 브라질, 나이지리아, 앙골라 등 막대한 양의 자원을 영해에 보유한 신흥 산유국들의 등장을 도왔다.

- 
- 2) Jack-up rig: 부력이 있는 선체에 3개의 수직이동이 가능한 다리(leg)를 가지고 있어 자가부상(self-elevating)이 가능한 고정식 MODU(Mobile Offshore Drilling Unit)의 일종. 보통 390 feet의 저수심대용이다. Fig. 1 참조.
  - 3) Drillship: 선체의 중앙부에 시추작업용 데릭(derrick)을 설치하고 그 아래의 ‘moon pool’ 이라고 불리는 뚫린 공간을 통하여 시추 설비를 해저로 내리는 선박 형태의 MODU. 심해 시추(deep water drilling)에 적합하며 타 시추설비에 비해 비교적 이동이 용이하다. Fig. 1 참조.
  - 4) Semi-submergible rig: 부력을 담당하는 ‘pontoons’ 을 상부 플랫폼과 기둥으로 연결하고 데릭과 moon pool을 통해 시추 작업을 하는 형태의 MODU. 심해, 거친 환경에서의 작업에 유리하다. Fig. 1 참조.
  - 5) 1973년 10월 제4차 중동전쟁 발발 이 후 페르시아만의 6개 산유국들이 가격인상과 감산에 돌입, 유가가 2~3개월 만에 무려 4배나 폭등했다. 이 파동으로 1974년 주요 선진국들은 두 자릿수 물가상승과 마이너스 성장이 겹치는 전형적인 스태그플레이션을 겪어야 했다.

2014년 현재, 육상으로부터 가장 먼 거리에서 작업 중인 해양 시설은 캐나다 서부의 뉴펀들랜드(Newfoundland) 해안으로부터 320Km 지점에서 작업 중에 있는 허스키(Husky)사(社)의 SeaRose FPSO(Floating production storage and offloading)<sup>6)</sup>이다. 또한 최근 건조되고 있는 7세대<sup>7)</sup> 시추선은 수심 12,000ft대의 해역에서 총 40,000ft 깊이 까지를 시추할 수 있도록 설계되었다.

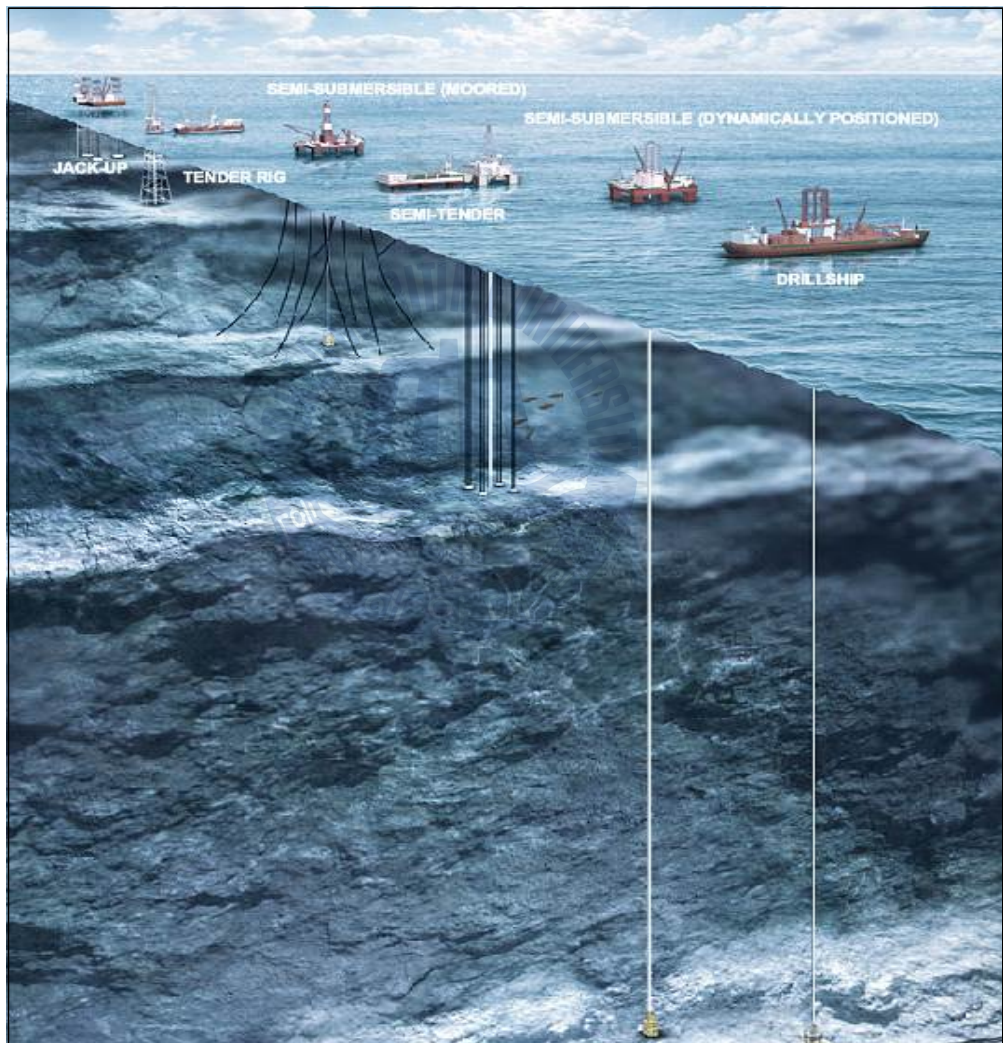


Fig. 1 Type of offshore drilling rig (출처: Seadrill)

- 6) FPSO: Floating production storage and offloading, 해상 석유 생산, 저장, 하역시설.  
 7) 7세대 시추설비(7<sup>th</sup> generation drilling rig) - 해양시추설비(offshore drilling rig)는 작업가능 수심에 따라 세대를 구분한다. 1960년대 도입된 1세대 시추설비는 200m 수심 대 까지 작업이 가능하였다.

## 1.2 해양 석유 수송(Offshore Oil Transportation) 개요

해양에서 생산된 석유를 수송하는 방법에는 해저 파이프라인(subsea pipeline)을 통하여 수요지까지 보내는 방법과 FPSO 또는 SPM(Single Point Mooring)<sup>8)</sup>을 통해 탱커(tanker)로 하역을 한 후 수요지까지 해상운송(maritime transportation)을 하는 방법이 있다.



Fig. 2 Offshore product(Gas) transportation concept (출처: INPEX)

현재, 가장 긴 해저 파이프라인은 2012년 러시아의 바이보르그(Vyborg)와 독일의 그레이프츠발드(Greifswald) 사이에 건설된 1,222 Km길이의 노르드 스트림(Nord Stream) 천연가스 파이프라인이다. 이 프로젝트에 88억 유로(Euro)가 들었음이 시사하듯이 해저 파이프라인 건설에는 큰 비용이 발생하며, 운송 목적지의 선택이 지극히 제한적이기 때문에 해양에서 생산된 석유와 가스는 대부분 해상운송을 통하여 수송하고 있다.

8) SPM: Single Point Mooring. 선박을 부표 계선하여, 화물의 적·양하 작업을 할 수 있도록 만든 설비. SBM(Single Buoy Mooring)이라고도 한다.

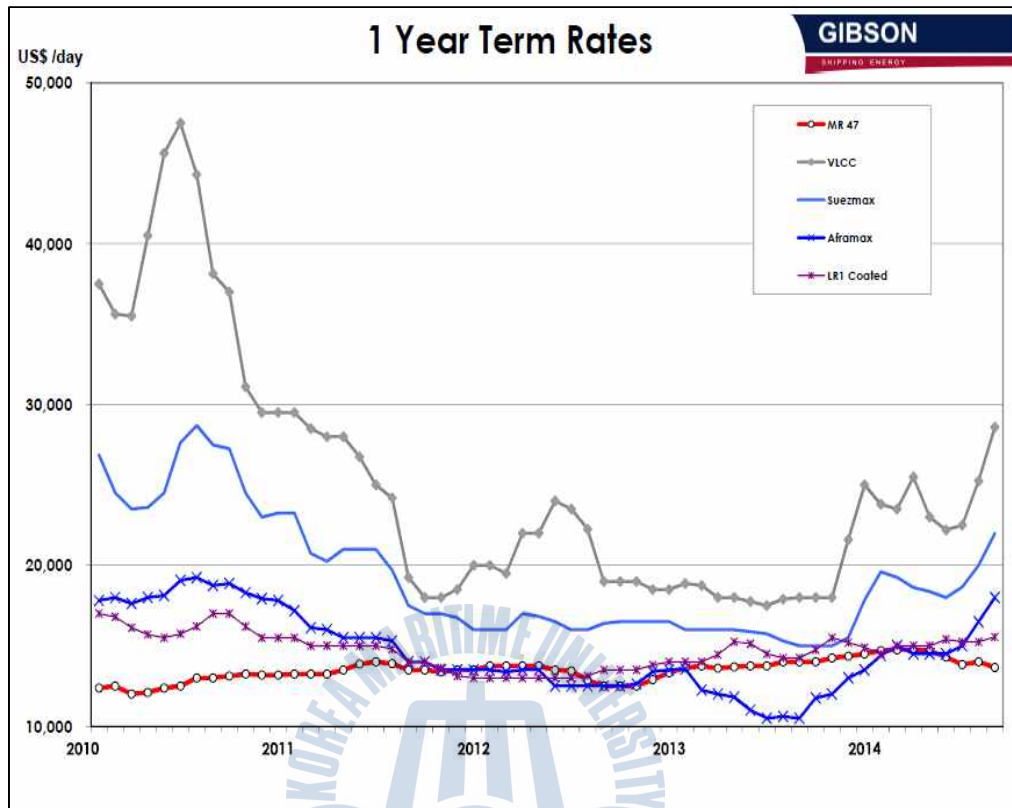


Fig. 3 1 year term rates of tanker (출처: GIBSON SHIPPING ENERGY' S weekly period report 19th Sept 2014)

부정기선의 일종인 탱커의 용선계약은 계약 형태에 따라 선주가 선원이 승무하고 항해장비를 갖춘 선박을 일정기간동안 용선주가 사용하도록 할 것을 약정하고 용선료를 받는 정기용선계약(Time charter), 선원 확보나 선용품 모두 용선주가 준비하고 자신이 고용한 선장을 통해서 선박을 인수하여 운항을 관리하는 나용선계약(Bareboat charter), 그리고 특정 항해구간을 정하여 선박을 대여 또는 차용하고 선주는 화주에게 톤당 운임을 계산하여 받는 항해용선계약(Voyage charter)으로 나뉜다.

Fig. 3은 탱커를 정기용선계약의 형태로 운항 할 경우에 1년 계약 시의 평균 하루당 용선료(day rate)를 정리한 자료이다. VLCC(Very Large Crude Oil Carrier - DWT 200,000+)의 경우 2014년 9월 현재 하루당 용선료가 28,000 US\$임을 알 수 있다.

Table 1 Baltic Dirty Tanker Index 2012

&lt;단위: World scale&gt;

Weekly	Date(Y.M.D)	Index	TD1	TD2	TD3	TD4	TD5	TD6	TD7	TD8	TD9	TD10D	TD12	TD14	TD15	TD16	TD17	TD18	TD19
1	2012. 01. 07	784	32.4	51.0	50.6	58.0	82.3	107.4	107.4	102.9	102.3	115.0	118.6	88.2	52.5	194.0	87.3	164.6	120.2
2	2012. 01. 14	783	33.6	52.4	51.9	60.9	91.3	99.5	101.1	105.7	95.7	104.8	113.7	89.4	57.5	201.7	86.6	184.8	101.9
3	2012. 01. 21	833	36.7	61.4	61.0	66.7	88.8	95.1	112.4	107.3	127.1	102.1	114.5	90.0	63.7	218.0	97.1	203.2	90.8
4	2012. 01. 28	835	36.5	63.7	63.3	67.0	80.7	85.1	108.3	110.1	127.7	107.7	117.7	90.1	63.8	224.1	92.0	218.9	84.1
5	2012. 02. 04	806	33.3	52.2	51.6	59.8	78.3	79.1	95.0	110.1	134.5	112.5	120.1	89.0	54.6	227.5	80.2	218.7	83.5
6	2012. 02. 11	788	32.6	49.3	48.9	57.5	78.1	76.8	89.3	110.0	127.0	127.1	123.9	89.5	52.7	202.9	79.6	217.5	81.0
7	2012. 02. 18	802	33.4	53.0	52.5	57.6	76.5	86.6	86.7	106.2	137.2	137.0	126.2	88.2	54.1	196.6	80.2	216.2	84.7
8	2012. 02. 25	809	33.7	54.8	54.2	59.2	78.8	84.6	85.8	101.8	135.3	142.2	125.6	86.8	57.4	203.0	78.8	219.3	85.2
9	2012. 03. 03	788	33.0	53.4	52.9	57.9	74.8	76.9	85.2	100.3	116.6	143.4	125.5	85.7	55.2	195.4	77.5	222.3	87.6
10	2012. 03. 10	806	34.2	54.8	54.2	59.0	79.0	80.4	90.1	99.7	106.9	142.9	124.9	85.4	54.6	202.0	85.1	220.9	106.4
11	2012. 03. 17	851	37.5	62.8	62.3	68.2	92.4	95.6	96.7	99.6	104.0	147.5	122.0	84.8	66.0	201.2	100.3	211.7	122.5
12	2012. 03. 24	833	37.8	63.7	63.0	69.0	89.6	96.2	94.6	99.7	116.4	145.5	120.6	84.9	65.1	198.0	97.0	195.1	101.7
13	2012. 03. 31	815	38.8	66.6	65.8	66.9	78.6	83.0	90.2	99.1	101.6	143.4	120.3	84.7	63.2	193.6	103.4	205.3	94.0
14	2012. 04. 07	821	42.1	71.9	70.8	69.6	74.1	79.5	96.8	98.3	97.3	134.4	123.7	84.4	67.9	188.4	112.4	209.4	90.1
15	2012. 04. 14	798	43.2	69.7	68.7	68.8	71.5	73.3	99.8	97.5	94.4	122.2	123.9	84.3	67.7	178.5	112.5	200.1	87.3
16	2012. 04. 21	755	40.2	60.5	59.6	62.7	65.7	67.3	95.5	97.4	95.0	122.3	126.3	84.1	60.4	168.0	90.4	186.1	92.4
17	2012. 04. 28	756	39.9	60.4	59.6	59.3	64.6	65.3	94.3	97.5	100.6	134.2	132.1	84.2	57.4	166.1	77.5	184.5	99.7
18	2012. 05. 05	772	40.4	62.5	61.9	62.1	68.0	77.9	95.5	97.3	107.4	141.4	137.1	84.2	61.3	159.8	78.6	177.8	95.4
19	2012. 05. 12	766	39.8	58.5	57.8	59.9	72.6	86.1	95.0	96.6	123.6	142.8	139.4	83.9	58.8	150.8	75.9	168.5	87.3
20	2012. 05. 19	767	39.3	58.2	57.5	64.1	91.0	91.0	94.8	94.9	125.3	151.4	138.2	82.9	59.6	138.6	74.9	152.6	83.7
21	2012. 05. 26	745	39.1	58.4	57.7	62.9	84.3	87.5	95.6	93.7	112.7	153.1	136.1	82.0	58.7	131.9	76.6	141.4	82.8
22	2012. 06. 02	715	37.3	52.5	51.9	57.9	74.2	78.3	96.8	93.2	105.9	153.5	136.1	81.0	55.1	126.1	76.3	132.5	82.3
23	2012. 06. 09	688	33.0	47.1	46.4	51.1	68.2	73.3	95.2	92.2	112.6	145.6	133.8	81.2	48.9	123.3	74.8	125.0	83.5
24	2012. 06. 16	688	30.7	41.7	41.0	46.9	69.4	73.8	95.0	91.6	116.5	141.9	131.3	82.2	43.3	121.4	75.1	124.1	108.0
25	2012. 06. 23	666	30.8	43.5	42.9	45.0	66.2	71.3	95.0	93.2	101.6	128.1	124.5	88.3	42.2	119.6	75.0	121.2	100.5
26	2012. 06. 30	670	29.3	41.8	41.2	45.0	63.9	70.1	95.0	95.0	96.3	122.5	122.6	88.9	42.5	136.2	75.0	127.8	104.1
27	2012. 07. 07	665	26.3	37.3	36.8	45.4	65.9	71.6	94.6	95.2	92.6	116.8	112.0	86.6	40.0	144.8	74.4	134.9	111.0
28	2012. 07. 14	636	24.6	35.3	34.6	42.9	67.9	70.7	90.3	92.9	95.8	105.5	108.6	83.2	37.4	133.6	68.7	141.1	92.4
29	2012. 07. 21	623	23.8	34.3	33.7	41.8	64.8	72.7	88.5	92.8	91.8	94.3	100.5	84.5	37.4	140.9	65.7	145.8	86.6
30	2012. 07. 28	635	23.4	34.7	34.1	41.5	61.3	69.8	86.6	93.2	95.2	98.9	101.6	87.3	36.6	158.2	62.7	157.2	81.7
31	2012. 08. 04	637	22.7	34.9	34.2	41.3	58.4	64.7	86.4	93.1	99.4	108.1	108.0	87.7	36.0	157.8	61.9	153.0	80.6
32	2012. 08. 11	616	23.2	37.1	36.3	41.4	56.6	60.1	85.0	93.1	94.9	102.4	110.5	87.1	36.9	140.8	62.1	138.2	80.1
33	2012. 08. 18	606	23.8	37.1	36.3	41.2	56.9	57.5	84.5	93.3	89.9	102.9	112.0	87.1	36.8	135.8	60.4	128.4	79.6
34	2012. 08. 25	615	23.5	36.9	36.2	41.1	57.5	57.6	84.8	95.0	90.5	107.9	112.3	88.0	36.8	151.1	60.4	123.6	79.1
35	2012. 09. 01	624	23.2	36.5	35.9	41.1	57.5	56.9	85.0	106.9	91.1	114.5	110.1	92.3	36.2	150.3	60.1	123.5	79.5
36	2012. 09. 08	629	24.7	38.6	38.1	41.5	56.6	56.4	84.9	117.5	92.3	118.6	107.9	97.9	37.4	138.5	60.0	123.4	78.1
37	2012. 09. 15	635	27.0	40.5	39.9	42.2	55.4	56.5	84.8	117.0	86.6	123.2	107.0	97.0	39.6	134.4	60.0	135.5	76.4
38	2012. 09. 22	640	27.0	40.4	39.8	42.3	58.2	57.4	85.0	118.0	87.0	111.5	109.7	99.2	40.1	135.2	60.1	147.5	75.7
39	2012. 09. 29	643	25.0	37.7	37.2	41.9	56.1	57.2	85.0	115.9	89.6	111.5	119.9	98.0	40.0	142.2	59.9	146.7	76.1
40	2012. 10. 06	659	23.5	36.5	35.8	41.3	56.7	60.4	85.0	114.0	89.3	114.4	126.3	96.5	39.1	172.1	58.4	149.2	76.3
41	2012. 10. 13	664	23.2	36.2	35.6	42.0	57.3	61.3	84.9	111.6	88.4	111.9	130.2	95.2	39.4	184.4	57.2	148.7	76.6
42	2012. 10. 20	671	23.1	36.7	36.0	42.7	60.7	61.6	85.0	104.1	91.5	109.6	128.7	92.4	40.2	205.7	57.6	147.3	75.6
43	2012. 10. 27	681	22.6	37.3	36.7	43.6	62.0	62.3	85.0	99.1	102.1	106.5	124.6	90.7	40.7	218.1	57.5	151.1	79.2
44	2012. 11. 03	672	22.6	36.9	36.2	42.8	62.4	63.8	85.2	97.0	104.9	102.7	118.1	90.2	39.7	203.4	60.4	150.3	84.8
45	2012. 11. 10	665	24.1	37.9	37.3	42.7	60.9	62.7	85.0	95.2	125.3	105.9	109.7	89.4	39.8	181.0	59.6	149.9	79.0
46	2012. 11. 17	706	30.6	47.7	46.9	47.3	57.9	61.0	85.0	94.6	135.6	128.8	128.1	89.6	46.7	179.5	57.5	159.2	76.5
47	2012. 11. 24	723	33.3	56.9	55.5	52.3	56.4	63.5	85.0	94.6	116.7	135.8	136.1	89.3	51.6	190.4	57.6	156.2	77.2
48	2012. 12. 01	712	30.6	51.2	50.2	50.9	55.8	62.8	85.0	94.9	95.8	130.9	133.0	89.2	49.1	218.2	57.5	153.0	76.1
49	2012. 12. 08	704	29.3	48.1	47.5	49.7	54.9	61.1	85.2	94.0	87.9	122.7	131.4	89.0	47.6	225.0	58.1	161.4	74.9
50	2012. 12. 15	730	27.6	46.9	46.3	49.8	60.8	67.1	90.7	94.3	87.5	116.9	130.8	89.2	46.9	221.5	78.5	187.8	80.0
51	2012. 12. 22	772	27.9	49.1	48.4	50.8	76.6	89.0	101.7	94.4	89.1	116.0	132.6	89.2	47.1	205.6	100.0	193.1	97.8
52	2012. 12. 29	764	27.9	48.9	48.3	50.8	76.3	82.8	100.0	94.3	95.0	115.0	131.7	89.8	47.5	201.7	99.7	188.5	95.6
	연평균	719	30.7	48.4	47.6	52.1	68.6	73.0	91.2	100.1	104.5	122.9	122.1	88.2	48.9	173.8	74.2	166.1	87.6

**Table 2** Route Description for Baltic Dirty Tanker Index

Route	Description	DWT
TD1	M.E. Gulf to US Gulf	280,000
TD2	M.E. Gulf to Singapore	270,000
TD3	M.E. Gulf to Japan	265,000
TD4	W. Africa to US Gulf	260,000
TD5	W. Africa to USAC	130,000
TD6	Black Sea / Med	135,000
TD7	North Sea to Continent	80,000
TD8	Kuwait to Singapore (Crude DPP Heat 135F)	80,000
TD9	Caribs to US Gulf	70,000
TD10D	Caribs to USAC - Double hull vessel	50,000
TD12	ARA(Antwerp, Rotterdam, Amsterdam) to US Gulf	55,000
TD14	SE Asia to EC Australia	80,000
TD15	W. Africa to China	260,000
TD16	Black Sea to Mediterranean	30,000
TD17	Baltic to UK-Cont	100,000
TD18	Baltic to UK-Cont	30,000
TD19	Cross MED	80,000

항해용선계약일 경우에는 화물의 톤당 운송가격으로 표시되며 발틱해운거래소(The Baltic exchange)에서 발표하는 BDTI(Baltic Dirty Tanker Index)에서 그 동향을 알 수 있다. Table 1과 Table 2는 한국해양수산개발원(<http://www.kmi.re.kr>)에서 제공하는 2012년도 BDTI이다.

2014년 9월을 기준으로 나이지리아의 보니 해상 터미널(Bonny offshore terminal)에서 중국 Ningbo(닝보)까지의 flat rate는 41.31이며, 월드스케일(world scale)은 44이다.<sup>9)</sup> 이를 바탕으로 DWT 260,000의 VLCC를 만재하여 보니 해상 터미널에서 Ningbo까지 수송한다고 하였을 때, 운임은  $260,000 \times 41.31 \times 0.44$ 로 계산하여, 4,725,864 US\$임을 알 수 있다.

### 1.3 연구의 대상 및 방법

전술한 바와 같이 해양에서의 석유 생산과 수송에는 막대한 비용이 발생하며, 각 공정마다 다수의 관련업체들이 관여하기 때문에, 비용을 최소화하

9) 2014년 9월자 Flat rate, World scale: Optima tankers 제공.

며, 비용 대비 수익을 최대화시키기 위한 최적화 설계(optimal design)가 필수이다.

본 논문은 가상의 해양 유전과 이에서 생산된 석유의 수요지들을 설정하여 석유기업(oil company)이 직면한 해양 석유 생산과 수송의 최적화 문제를 연구대상으로 한다. 본 서론에 이어 제 2장에서는 해양 석유 생산의 특성과 현황, 해양 석유 생산과 해양 석유 수송의 최적화에 관한 선행연구를 둘러본 후, 제 3장에서는 예제로 삼은 해양 유전과 수요지에 대한 개요와 이 문제의 정식화를, 제 4장에서는 자료의 준비와 계산실험을, 제 5장에서는 결론과 향후 연구 과제를 기술하였다.





## 제 2장 선행연구

### 2.1 해양 석유생산의 특성과 현황

해양 석유 생산은 ‘해상’이라는 장소적 특성으로 인한 기상, 물류 그리고 정치적 요인 등 여러 가지 변수에 의한 제약을 받으며 또한 장기적으로 거대한 자본이 소요되는 산업이기에 자본력이 막강한, 흔히 오일 메이저(oil major)라고 하는 다국적 석유기업(International Oil Company, IOC)이나 국영 석유회사(National Oil Company, NOC)의 주도하에 진행된다. 또한 모든 작업을 한 기업이 단독으로 수행하기에는 이에 적용되는 기술과 소요되는 장비의 범위가 너무나 넓어 보통 각 단계별로 전문적인 기술을 가진 관련 업체들(third parties)과 하청계약을 맺어 프로젝트를 진행하게 된다.

이는 크게 탐사(Exploration), 시추(Drilling), 그리고 생산(Production)이라는 3가지 절차를 거치는데, 추후 해양 유전의 석유가 고갈된 후에는 해체(Decommissioning) 절차를 밟게 된다.

각 단계마다 수심과 육상으로부터의 거리, 지역적 특성 등에 따라 많은 비용이 들어가는데, 탐사 단계에는 심해를 기준으로 약 13,650,000 US\$가 소요되며, 시추 단계에서는 수심 2,480 m의 초-심해(ultra-deep water)의 경우에 55일 동안 51,807,870 US\$가 들어간다.<sup>10)</sup> 수명 20년짜리 생산시설 설치에는 341,203,771 US\$가 소요된바 있다.<sup>11)</sup>

Table 3은 2007년에서 2009년 사이에 해양 석유와 가스를 생산하는 데에 소요된 평균 금액을 계산하여 나타낸 표이다.

10) 2011년 인디아 동부 해상에서의 해양 시추 계획서를 참고하였으며, 이때 시추선의 일일 용선료는 585,730 US\$이었다.

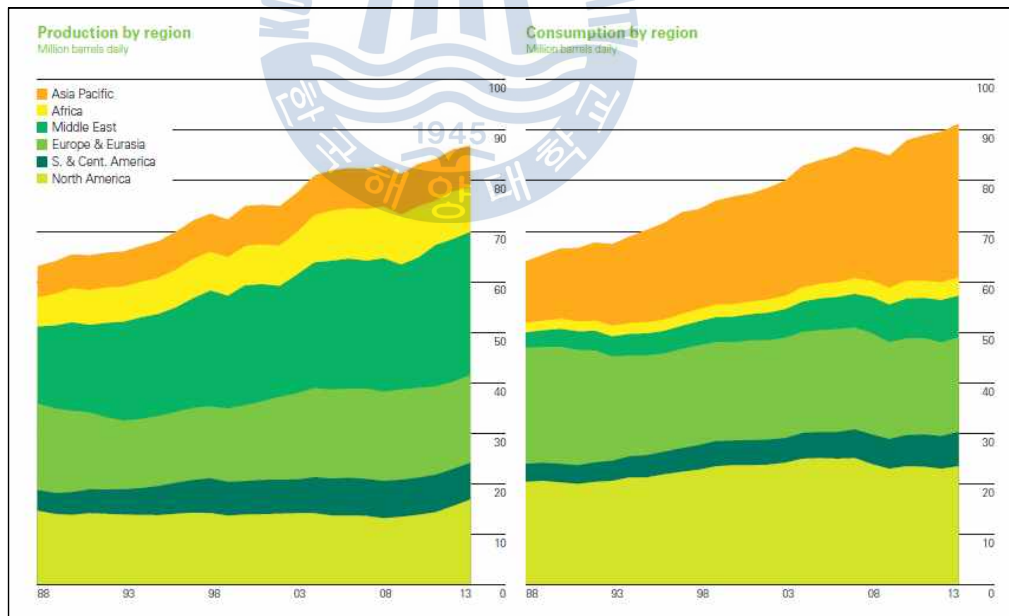
11) 덴마크령 북해의 수심 60m대에 설치된 ‘시리 플랫폼(Siri platform)과 하역시설계획’의 예를 인용하였으며, 유로화(Euro)로 정산된 비용을 \$US로 환율 변환하여 기재하였다.

**Table 3** Costs for Producing Crude Oil and Natural Gas, 2007-2009

	Lifting Costs	Finding Costs	Total Upstream Costs <sup>12)</sup>
<b>United States - Average</b>	\$12.18	\$21.58	\$33.76
<b>Onshore</b>	\$12.73	\$18.65	\$31.38
<b>Offshore</b>	\$10.09	\$41.51	\$51.60
<b>All Other Countries - Average</b>	\$9.95	\$15.13	\$25.08
<b>Canada</b>	\$12.69	\$12.07	\$24.76
<b>Africa</b>	\$10.31	\$35.01	\$45.32
<b>Middle East</b>	\$9.89	\$6.99	\$16.88
<b>Central &amp; South America</b>	\$6.21	\$20.43	\$26.64

\*Dollars per Barrel of Oil Equivalent

세계 석유의 수요는 Fig. 4의 오른쪽 그래프에서 알 수 있듯이 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 Asia Pacific 지역에서의 증가세가 확연하다.



**Fig. 4** World Oil Production and Consumption (출처: BP Statistical Review of World Energy, June 2014)

12) Upstream: 석유화학 분야에서 석유 탐사와 생산을 하는 단계까지를 말한다. 석유 정제와 수송·판매, 각종 석유화학 제품 생산을 하는 ‘downstream’의 반대 개념이다. (출처: 환경 경제용어사전)

해양 석유 생산은 Fig. 5에서 보듯이 1970년대 말 들어 육상 석유 생산 대비 그 비중이 증가하였다. 2000년대부터는 심해 생산(deep water production)<sup>13)</sup>의 비중이 꾸준히 증가하여 2013년에는 9%에 달하였으며, 이미 2009년 무렵에 심해 시추(deep water drilling)가 천해 시추(shallow water drilling)보다 늘어난 것<sup>14)</sup>으로 미루어 해양 석유 생산, 특히 심해 생산이 증가하는 추세는 앞으로도 지속될 것으로 전망된다. 이는 또한 Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 증가세에 있는 해양 플랫폼 중에서도 수심에 제한이 있는 고정식 플랫폼(fixed type platform)보다는 심해에 유리한 부유식 플랫폼(floating type platform)이 많음에서도 알 수 있는 사실이다.

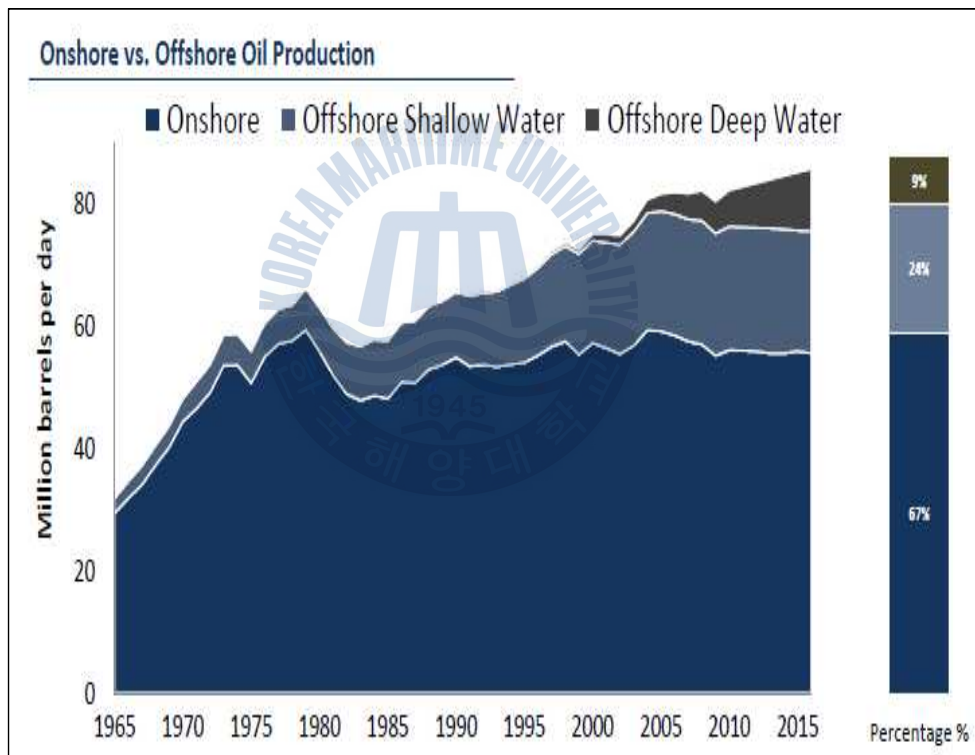


Fig. 5 Onshore vs. Offshore Oil Production (출처: Infield system, 2013)

13) 해양(offshore)에서의 수심에 대한 정의는 각 기관 또는 회사마다 다르지만, 일반적으로 천해 (shallow water)를 수심 0-999 feet대, 중간해(mid-water)는 1,000-3,999 feet대, 심해(deep water)는 4,000-6,999 feet대, 그리고 7,000 feet 이상을 초-심해(ultra-deep water)라고 한다. (출처: Oilpro.com)

14) Global Offshore Prospects 2013, Douglas Westwood

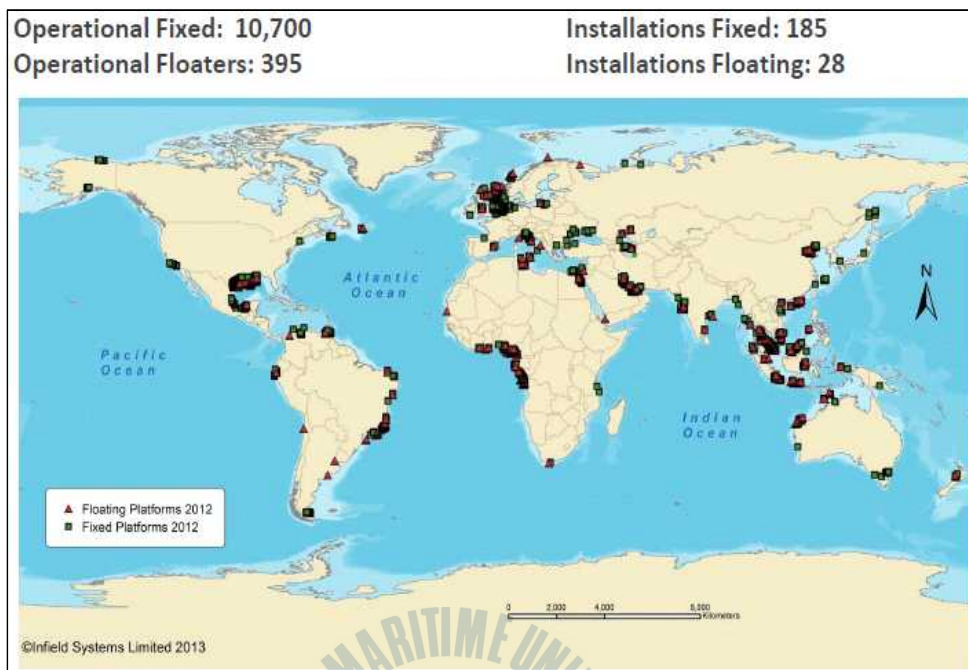


Fig. 6 Operational Platforms in 2012 (출처: Infield system, 2013)

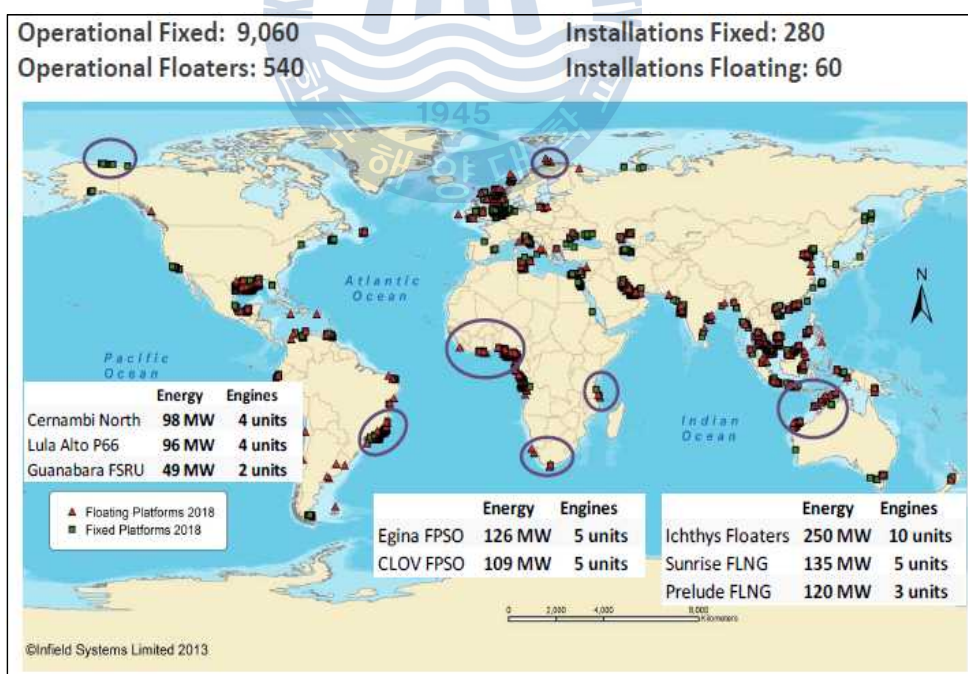


Fig. 7 Operational Platforms in 2018 (출처: Infield system, 2013)

## 2.2 해양 석유 생산의 최적화

해양 석유 생산의 최적화 문제는 해양 석유 생산 기술이 비교적 안정권에 들어선 1970년대의 유럽에서 처음 연구되기 시작하였다. 해양 석유 생산 시설의 규모는 그 유전의 생산성 예측에 따른 비용 대 수익을 고려하여 결정되며, 한번 설치가 되면 변경이 거의 불가능하거나 혹 가능하다고 해도 대단히 많은 비용이 발생하게 된다. 따라서 해양 유전의 탐사, 개발, 시추, 생산 등의 전반적인 과정에 경영과학적 접근이 도입되었고 이는 차츰 다른 지역의 신규 해양 유전을 개발하는 데에 유용하게 사용될 수 있는 지침으로 활용되기 시작하였다.

Bohannon(1970)은 석유 유전의 설계와 생산계획에 혼합정수선형계획의 사용을 제안하였고, Flare(1973)는 시간 배분에 따른 well(유정)의 배치와 생산 시설의 운영일정의 최적화 모형을 발표하였다.

이후 Iyer et al.(1998)이 해양 시설의 계획, 투자, 운영에 관한 다기간(multi-period) 혼합정수선형계획 모형을 발표하였다. Ortíz-Gómez, et al. (2002)은 시간대별 석유 생산의 지속과 중단에 대한 의사결정에 다기간 혼합정수선형계획을 도입한 모형을 발표하였으며, Lin & Floudas(2003)는 유정 플랫폼(well platform)계획 문제에 지속시간 모델링과 최적화 설계를 도입한 연구결과를 발표하였다.

Richard J. Barnes & Antonis Kokossis(2007)는 해양 유전이 개발되고 운용되는 전체 기간 동안에 최소한의 비용을 유지하기 위하여 유정 시추점(well centre)을 정하고 최적화된 시추와 생산계획을 세우는 데에 수학적 모형을 이용한 접근법을 연구하였다. 동년에는 Richard J. Barnes et al.이 이를 기초로 주 유전(main field)과 이에 인접한 위성 유전(satellite field)으로 이루어진 해양 석유 유전에서의 시추와 생산의 최적화 설계를 연구하였는데, 위성 유전의 개발계획에 영향을 주는 주 유전의 최적 생산능력의 결정에는 혼합정수선형계획 모델을, 유전 안에서의 개별 유정의 선택문제에는 이진변수(binary variable)를 사용하였다. 해양 석유 유전에서의 최적 운용문제에는

혼합정수비선형계획모델을 적용했는데, 각 파이프라인과 유정에서의 압력 감소 시 다상흐름 기법(multiphase flow)을 적용하기 위하여 비선형 방정식을 사용하였으며, 유정의 수명, 생산성 그리고 유지보수에 따른 비용문제에는 비선형 비용방정식을 광범위하게 적용시켰다.

### 2.3 해양 석유 수송의 최적화

해양에서의 수송문제는 화물의 선적지가 항만이 아닌 해양 유전이며 FPSO 나 SPM를 통하여 화물을 선적한다는 일부 특성을 제외한다면, 서로 다른 선적지에서 화물을 선적하여 서로 다른 하역지로 수송한다는 점에서 전형적인 해상수송의 문제(maritime transportation problem)라고 할 수 있으며, 이 중에서도 화물의 특성상 유조선대의 운영 최적화 문제와 동일하다.

Dantzig & Fulkerson(1954)이 연료유의 고정 수송 계획에 투입되는 유조선의 척수를 최소화하는 문제에 정수계획법을 사용한 연구가 선대 운영의 최적화에 대한 연구의 시초로 알려져 있으며 이들의 연구는 각각 Briskin & Bellmore(1966 & 1968)에 의하여 일반화된 선형계획 모형으로 확대되었다.

Laderman et al.(1966)은 북미 오대호의 여러 항만간의 부정기선 화물수송에 관한 문제를 최소의 선박량으로 해결하는 데에 선형계획법을 도입하였으며 1967년 Whiton(1967)이 이 모형에 항만수용능력과 화물처리 능력 등과 같은 제약조건을 추가하여 연구하였다.

이후 Appelgren(1969 and 1971)이 부정기선의 운항문제에 대한 이전의 연구들과는 다르게 집합 분할(Set Partitioning) 또는 집합 패킹(Set Packing)모형으로 정식화하였는데, 선박이 운항 가능한 일자를 구하고 운항 일정의 선택 여부를 0-1 정수변수로 정의하는 방식으로 문제를 해결하였으며 이를 계기로 이후의 부정기선 또는 화주 직접운항 형태의 선박 운항일정계획 최적화 모형은 거의 모두가 집합 분할 또는 집합 패킹모형의 형태를 취하고 있다. McKay와 Hartley(1974)은 이에 더하여 유조선 화물의 분할선적을 허용하는 문제에 정수계획법을 적용하였다.

Ronen(1979)은 단일 지역에서 발생하는 화물의 수송에 대한 선대운용 문

제를 비선형 정수계획법으로 모형화 하여 연구하였다. Baker(1981)는 단일 정유공장에서 다수의 수요지까지의 석유제품 수송에 관한 문제를 선형계획 모형으로 연구하였다. Brown et al.(1987)이 중동에서 유럽, 북미까지의 석유 수송을 위한 경로와 일정을 구하는 문제를 집합 분할모형으로 정식화하였으며 Fisher & Resenwein(1989)은 살물선(bulk cargo ship)의 운항일정 계획 문제를 위한 대화형 최적화 시스템에 관한 연구에서, 각 화물에 대한 용선요율과 계획기간동안 선박을 계선 없이 임의의 스케줄에 투입하여 운항할 경우의 비용을 고려하여 집합 패킹 문제로 정식화하였다.

Kim(1999)은 부정기선 운항 문제의 핵심이 되는 선박운항일정계획 문제를 일반화하여 정의하고 그 최적화 모형을 집합패킹모형으로 제안한 최적화 모형 기반의 시스템인 MoDiSS(Model based Decision Support System in Ship Scheduling, 선박운항일정 의사결정 지원시스템)를 발표하였다. 이는 여러 시제품을 거쳐 PC 베이스의 GUI(graphical user interface)로 완성되었는데, 선박과 화물의 상세 그리고 항구간의 거리를 입력하면 최적 운항일정 계획을 출력하여준다.

Hwang et al.(2008)은 이전까지의 선박운항일정 모델이 해운 특유의 불확실성을 고려하지 않았다는 점에 주목하여 기대위험도를 줄이기 위하여 분산을 제한하기 위한 이차분산제약식을 사용하여 위험성을 제한한 집합패킹 모델을 제안하였는데, 이에는 Kelley's cutting plane algorithm과 Delayed column-and-cut generation (branch-and-price-and-cut) algorithm이 응용되었다. Park(2014)은 이를 참고로 평균-분산 모형 (Mean-Variance Model)을 적용하여, 일정한 기대이익률을 만족시키면서 운항이익의 분산 공분산을 최소화하는 로버스트 선박운항일정계획 모형을 2차계획모형으로 정식화한 최적화 모형을 제안하였다.

본 논문은 선행연구에서 살펴보았던 생산과 수송의 문제를 해양에 응용하여 다수의 지역에 해양 석유 유전을 보유한 다국적 석유기업(major oil company)이 당면할 수 있는 해양 석유 생산과 수송에 관한 문제를 일반화하여 정의하고, 이윤을 극대화할 수 있는 최적화 모형을 혼합정수계획모형

(mixed integer programming)으로 정식화 하였다. 해양 석유 생산의 최적화 모형의 해는 MS Office Excel 해찾기(solver)를 통해 구하였으며, 해양 수송의 최적화 모형의 해는 MoDiSS 프로그램을 통하여 구하였다.





## 제 3장 문제의 개요 및 정식화

### 3.1 문제의 개요

생산과 수송의 문제는 다국적 석유기업의 중요한 로지스틱(logistic) 문제이다. 이 논문은 해양 석유 유전에서 석유를 생산하고 이를 시장에 수송하는 문제를 하나의 시스템으로 보고 이에 대한 최적화 모델에 관한 연구이다. 생산-수송에 관한 네트워크는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

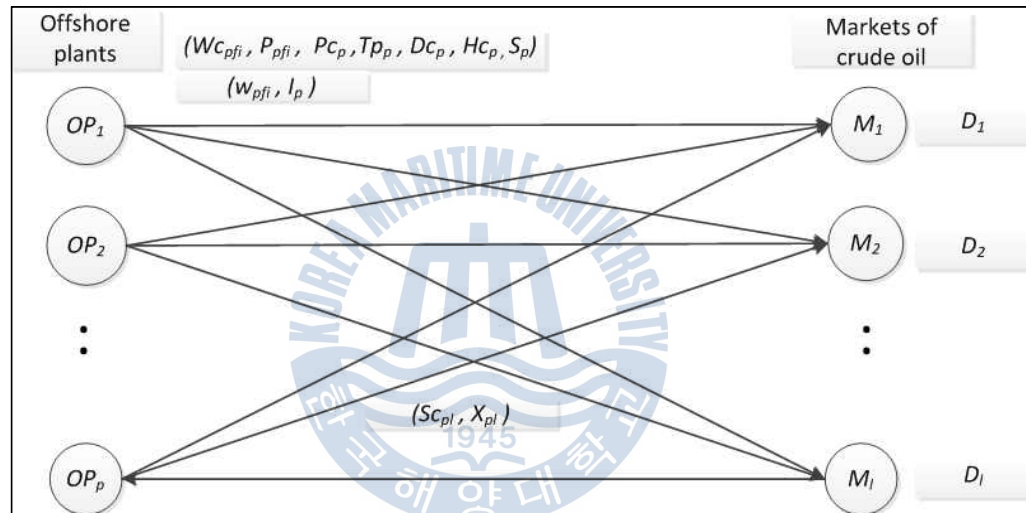


Fig. 8 해양 석유 생산-수송 네트워크

해양 플랜트(offshore plant)의 구성은 지역의 수심, 석유의 매장량, 사용되는 기술, 기후, 환경적 요인 등에 따라 저마다 다르지만 본 논문에서는 일반적인 해양 플랜트의 형태를 모델로 삼았다. 각 해양 플랜트는 다수의 해양 유전(offshore field)으로 이루어져 있으며, 해양 유전의 개발과정은 다음과 같다.

탄성과 탐사(Seismic survey)<sup>15)</sup>를 통해 석유의 매장 가능성이 높은 곳의 위치정보들을 확보 한 후 해양 시추설비(offshore drilling rig)<sup>16)</sup>로 탐사시추

15) 탄성과 탐사(Seismic survey): 탄성과(彈性波)를 이용한 해저 저질 탐사. 2D 또는 3D로 수행한다.

16) Offshore drilling rig: 해상에서의 시추 작업을 수행하는 설비를 통칭한다. Fig. 1 참조.

(exploration drilling) 또는 평가시추(appraisal drilling)을 한다. 시추 작업 중 샘플 채취, ‘와이어라인 로깅(wire line logging)’<sup>17)</sup> 등의 기법을 통하여 시추하고 있는 지점의 해저 지층 분포형태를 파악한 후 이를 바탕으로 시추 계획서에 따른 목표 시추 깊이(target depth)까지 시추 작업을 계속할 것인지 아니면, 유정 시추를 중단(abandon well)할 것인지를 결정하며, 석유층이나 가스층의 존재여부가 확인되면 유정평가(well test<sup>18)</sup>)를 진행하여 자원의 매장여부, 매장량, 채산성 등을 추산한다. 시추한 유정의 분석 결과가 좋으면 해저작업을 통한 몇 가지 처리 과정을 거쳐서 생산 유정으로 발전시키나간다. 그런 후, 근처의 다른 생산 유정들과 함께 해저 생산 라인(subsea production line)과 수직도관 장치(riser system)를 통해 생산 플랫폼(production platform) 또는 FPSO와 연결하고, 생산 유정 근처에 물이나 가스를 주입하여 석유의 생산을 돕는 물 주입용 유정(water injection well) 또는 가스 주입용 유정(gas injection well)을 형성하여 이 또한 해저 라인(subsea line)과 수직도관 장치에 연결한다. 이렇게 여러 개의 유정(well)이 모여 하나의 유전(field)을 형성한다. 본격적인 석유의 생산 준비가 완료되면 FPSO나 FSU<sup>19)</sup> 또는 SPM과 연결하여 생산된 석유를 탱커를 통하여 수송할 준비를 한다. 경우에 따라서는 석유를 해저 파이프라인을 통하여 육상으로 바로 수송하기도 하며 주변에 다른 FSU등을 보유하여 재고를 비축하기도 한다. 또한 석유의 매장 형태에 따라 한쪽에서는 시추와 해저 작업을 계속하여 다른 석유 유정을 개발하기도 한다.

Fig. 9는 FPSO와 해저 파이프라인을 통하여 생산된 석유를 수송하며 한편으로는 계속해서 다른 석유 유정의 개발을 진행하고 있는 해양 석유 유전의 예를 보여준다.

17) Wire line logging: ‘Bore hole logging’ 이라고도 하며, 시추공을 통하여 wire line, NMR(Nuclear magnetic resonance, 자기공명장치)등의 관측장비를 내려 기록하여 저질의 구조와 형질을 파악한다.

18) Well test: 석유층이나 가스층이 발견될 경우 매장 자원의 매장량과 질(quality)을 측정하는 작업이다. 여러 처리작업을 거치는데, 보통 유정에서 가스를 끌어올려 대기 중에서 연소시키는 flaring 작업이 수반된다.

19) FSU: Floating Storage Unit. 해상 석유 저장시설. FPSO와는 달리 생산(production) 기능이 없다.

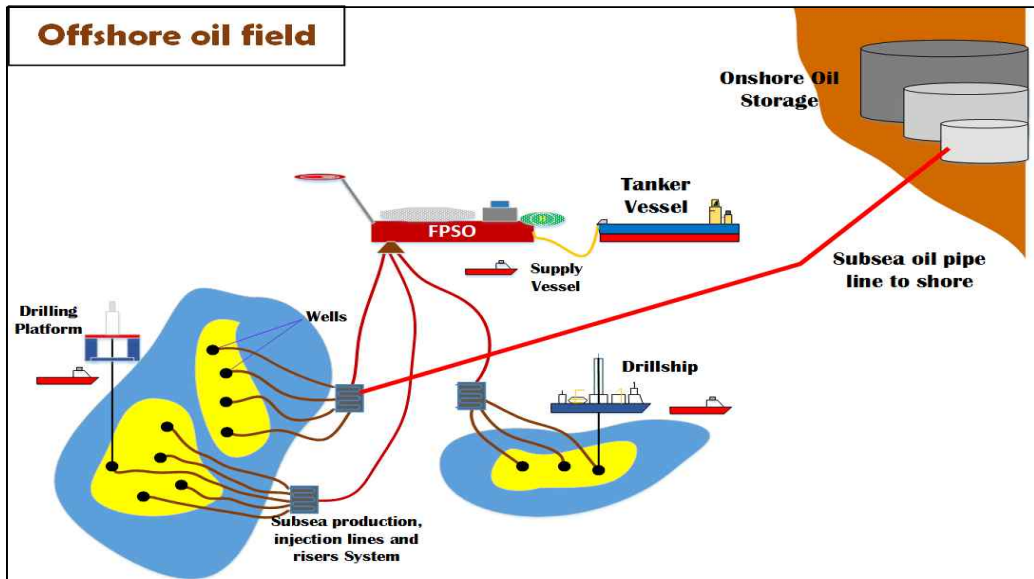


Fig. 9 해양 석유 유전의 구성

### 3.2 문제의 정식화

본 논문에서는 West Africa, Gulf of Mexico, 그리고 Middle East에 석유를 생산하는 해양 플랜트를 보유하고 있는 가상의 다국적 석유기업을 구상하였으며, 각 해양 플랜트의 상세는 Table 4와 같다.

Table 4 가상 해양 유전 개요

Plant	Field	Field당 총매장량 (Thousand bbls)	Field 수명 (년)	연간 생산량 (Thousand bbls)	분기별 생산량 (Thousand bbls)	Production well 개수
West Africa	1	1,100,000	21	52,381	13,095	6
	2	1,200,000	22	54,545	13,636	7
	3	950,000	20	47,500	11,875	5
	4	1,250,000	23	54,348	13,587	8
	5	1,400,000	25	56,000	14,000	10
Gulf of Mexico	1	1,050,000	21	50,000	12,500	6
	2	1,000,000	20	50,000	12,500	5
	3	850,000	18	47,222	11,806	4
	4	1,200,000	23	52,174	13,043	8
Middle East	1	1,300,000	24	54,167	13,542	8
	2	1,250,000	22	56,818	14,205	7
	3	1,200,000	19	63,158	15,789	4

비용 대비 수익을 극대화 시키는 최적화 문제를 구하기 위한 자료는 다음

과 같이 정식화 한다.

[Data]

$Wc_{pfi}$ : Well cost of well  $i$  in the field  $f$  of OP(Offshore Plant)  $p$  (\$US)

$P_{pfi}$ : Productivity of well  $i$  in the field  $f$  of OP  $p$  (Thousand bbls)

$Pc_p$ : Crude oil price of OP  $p$  (\$US/Thousand bbls)

$Sc_{pl}$ : Shipping cost of crude oil from OP  $p$  to local market  $l$   
(\$US/Thousand bbls)

$D_l$ : Demand of local market  $l$  (Thousand bbls)

$Hc_p$ : Holding cost of crude oil storage of OP  $p$ (\$US/Thousand bbls/day)

$Tp_p$ : Target Production of OP  $p$  (Thousand bbls)

$Dc_p$ : Design capacity of OP  $p$  (Thousand bbls)

$S_p$ : Storage capacity of OP  $p$  (Thousand bbls)

[Decision Variables]

$w_{pfi}$ : The binary variable to select well  $i$  of the field  $f$  in OP  $p$

$X_{pl}$ : Quantity of crude oil shipped from OP  $p$  to local market  $l$   
(Thousand bbls)

$I_p$ : The amount of inventory storage in OP  $p$ (Thousand bbls)

[Formulation]

$$\text{Max } Z = \sum_p \sum_l (Pc_p - Sc_{pl})X_{pl} - \sum_p \sum_f \sum_i Wc_{pfi}w_{pfi} - \sum_p Hc_p I_p \quad (\text{unit: } \$\text{US})$$

*s.t.*

$$\sum_f \sum_i P_{pfi}w_{pfi} \geq Tp_p \quad \text{for all } p$$

$$\sum_f \sum_i P_{pfi}w_{pfi} \leq Dc_p \quad \text{for all } p$$

$$\sum_p X_{pl} = D_l \quad \text{for all } l$$

$$I_p \leq S_p \quad \text{for all } p$$

$$\sum_f \sum_i P_{pfi}w_{pfi} - \sum_l X_{pl} - I_p = 0 \quad \text{for all } p$$

## 제 4장 자료의 준비 및 계산실험

### 4.1 자료의 준비

본 장의 계산실험은 크게 2가지로 나뉘는데, 하나는 MS Office Excel 해 찾기 프로그램을 통한 해양 석유 생산의 최적화이고 다른 하나는 MoDiSS 프로그램을 사용한 해양 석유 수송의 최적화이다. 해양 석유 생산의 최적화 문제는 시장의 수요가 높을 때와 낮을 때의 두 가지 상황으로 나누어 실험하여 그 결과를 비교하였다.

앞의 제 3장에서와 같이 정식화 된 해양 석유 생산과 수송에 관한 상수와 변수를 이용한 최적화 모형을 계산하기 위하여 준비된 자료는 다음과 같다.

Well cost( $W_{c_{pfi}}$ ): 석유를 생산하기 위하여 소요되는 비용은 기본적으로 매우 큰 비용이 들어간다는 공통점이 있지만 수심, 기후, 저질(底質), 지정학적 위치 등에 따라 천차만별이다. 또한 각각의 프로젝트마다 작업 공정이 달라 정밀한 유정당 생산비용(well cost)을 도출해내기는 불가능하다. 본 논문에서는 EIA(US Energy Information Administration)의 해양 석유 생산 관련 통계자료와 offshoretechnology.com<sup>20)</sup>의 ‘offshore project survey’ 그리고, 인디아 동부에서 진행했던 ‘해양 시추 계획서(offshore drilling program)’ 를 참고하여 각 지역별로 대략의 배럴당 석유 생산 비용을 산출하여 이를 가상 유전에 설정된 각 유정마다 무작위로 배분하여 유정당 생산비용을 설정하였다.

Productivity( $P_{pfi}$ ): offshoretechnology.com<sup>21)</sup>의 ‘offshore project survey’ 를 참조하여 각 지역별로 대략의 생산성을 산출하여 이를 가상 유전에 설정된 각 유정마다 무작위로 배분하여 생산성을 설정하였다.

Crude oil price( $P_{c_p}$ ): 한국석유공사에서 제공하는 두바이유와 서부텍사스유, 그리고 북해산 브렌트유 가격을 참고하였다. West africa산 석유의 가격

20) [www.offshore-technology.com](http://www.offshore-technology.com)

21) [www.offshore-technology.com](http://www.offshore-technology.com)

은 나이지리아의 ‘bonny light crude oil’의 가격을 참고하였는데, 2014년 6월 이후의 최근 공시유가를 구할 수 없어 bonny light crude oil의 그동안의 통상 가격대를 참고하여 북해산 브렌트유 가격에 0.8 US\$를 더하여 설정하였다.

Shipping cost( $Sc_{pl}$ ): 본 논문에서는 해양 유전에서 생산된 석유를 탱커를 통해 각 수요지까지 수송한다고 가정하였다. 탱커의 계약 형태는 자사 선단 보유(industrial fleet) 또는 항해용선계약이며, DWT 260,000 규모의 VLCC를 기준으로 flat rate와 월드스케일을 통해 계산된 톤당 운임을 배럴당 운임으로 환산하였다.

Demand of local market( $D_l$ ): 가상의 해양 플랜트의 총 매장량에 대한 수요분배를 해양수산개발원의 해운통계요람과 Fig. 4 World Oil Production and Consumption에 나타난 지역별 수요를 참조하여 설정하였다. 해양 석유 생산의 최적화문제는 시장의 수요가 높을 때와 낮을 때의 두 가지 상황으로 나누어 계산실험을 진행하였는데, 시장수요가 낮을 경우는 시장 수요가 높을 경우의 75%로 설정하였다.

Holding cost( $Hc_p$ ): REUTER.com의 2012년 6월 25일자 기사 ‘Supertanker sea storage looms as oil prices fall’에 나타난 해상 저장시설(offshore storage)의 재고 저장비용(37 cent / bbls부터 시작)을 각 지역별로 약간의 편차를 두어, 다국적 석유기업의 분기당 계획을 위한 모형을 만들기 위하여 3개월 치로 계산하였다.

Design capacity( $Dc_p$ ): 가상의 해양 플랜트의 총 매장량을 각 유전의 수명으로 나누어 연간 목표 생산량을 구한 후 다국적 석유기업의 분기당 계획을 위한 모형을 만들기 위하여 3개월 치로 계산하였다.

Target Production( $Tp_p$ ): 석유 생산 과정에서 생길 수 있는 압력의 감소(pressure drop)나, 다양한 형태의 사고로 인한 작업 중단 등과 같은 변수로 인하여 해양 플랜트가 항상 design capacity에 해당하는 석유를 생산할 수 있는 것은 아니라고 보고 각 플랜트의 목표 생산량을 design capacity보다

는 적게 설정하였다. 시장수요가 높을 경우는 94~98%로 설정하였으며, 시장수요가 낮을 경우는 가정하는 저유시설 용량의 한계를 고려하여 시장수요가 높을 경우의 85% 수준으로 설정하였다.

## 4.2 계산실험 - 해양 석유 생산의 최적화

상기 해양 플랜트에서 생산된 석유의 수요지는 Europe, North America 그리고 Far East로 설정하였으며, 계산실험에 사용된 각 수요지의 수요량은 Table 5와 같다. 낮은 시장수요일 때는 높은 시장수요의 75%로 설정하였다.

**Table 5** 가상 수요지의 수요량 (Unit: Thousand bbls)

Local market	High demand	Low demand
Europe	47,000	35,250
North America	49,500	37,125
Far East	55,000	41,250

각 유정의 목표 생산량은 table 6과 같다. 낮은 시장수요일 때는 목표 생산량을 높은 시장수요의 85% 수준으로 설정하였다.

**Table 6** 가상 해양 플랜트의 목표 생산량 (Unit: Thousand bbls)

해양 플랜트	High demand	Low demand
West Africa	62,000	52,700
Gulf of Mexico	47,000	39,950
Middle East	42,900	36,465

MS Office Excel에는 ‘Frontline System’ 이 개발한 ‘해찾기(solver)’ 라는 프로그램이 포함되어있는데, 이는 대상 셀(cell)의 해를 계산하는데 사용되는 셀의 값을 자동으로 변경하여 대상 셀의 최적화 모형의 해를 찾는 가상분석도구이다.

본 논문의 계산실험에서는 ‘최대값’ 을 대상으로 설정하고 ‘linear programming simplex’ 엔진을 해법으로 선택하였다. Fig. 10은 MS Office Excel 해찾기 프로그램을 통한 계산실험을 위해 작성한 스프레드시트

(spreadsheet)와 해 찾기 프로그램의 가동 그리고, 해답보고서를 보여준다.

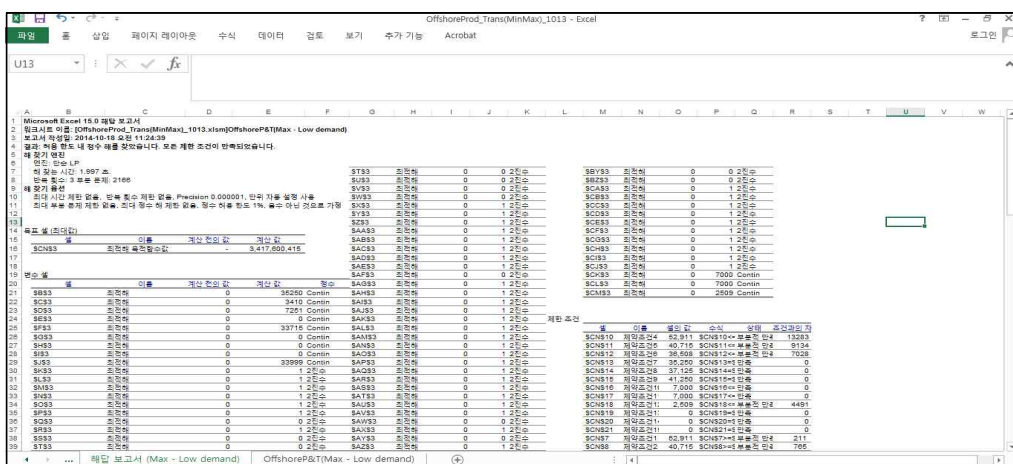
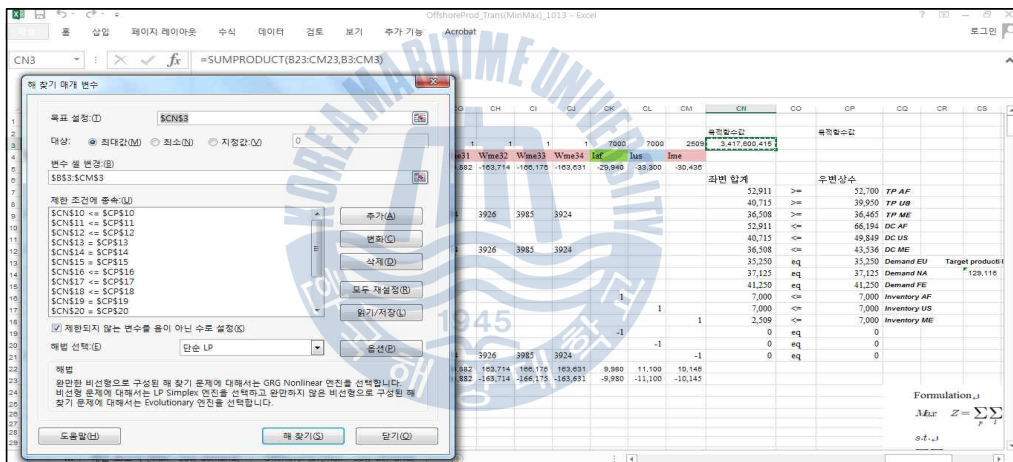
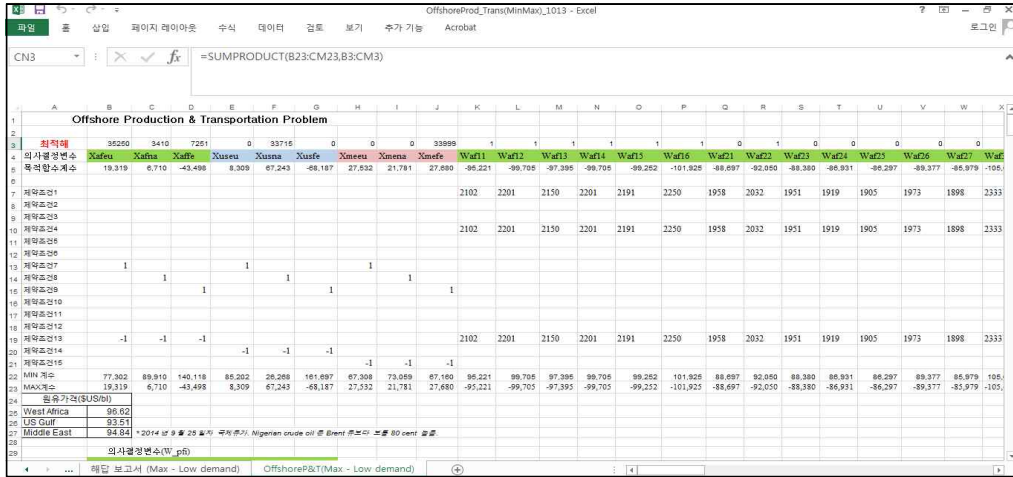


Fig. 10 MS Office Excel 해 찾기 프로그램의 가동, 해답보고서



Fig. 11은 MS Office Excel 해찾기 프로그램을 통한 높은 시장수요일 경우의 해양 석유 생산의 최적화 실험 결과이며, Fig. 12은 이때 각 생산 유형의 가동 여부를 나타낸다. 검은색 글씨가 가동(1)을 의미하며, 붉은 색 글씨는 미가동(0)을 의미한다.

최적해	47000	0	11464	0	49500	0	0	0	43536	3798	349	0	4,893,911,988	목적함수값
의사결정변수	Xafeu	Xafna	Xaffe	Xuseu	Xusna	Xusfe	Xmneu	Xmena	Xmefe	Iaf	Ius	Ime		
목적함수계수	19,319	6,710	-43,498	8,309	67,243	-88,187	27,532	21,781	27,680	-29,940	-33,300	-30,435		
													좌변 합계	우변 상수
제약조건1													62,262	>= 62,000 TP AF
제약조건2													49,849	>= 47,000 TP US
제약조건3													43,536	>= 42,900 TP ME
제약조건4													62,262	<= 66,194 DC AF
제약조건5													49,849	<= 49,849 DC US
제약조건6													43,536	<= 43,536 DC ME
제약조건7	1			1			1						47,000	eq 47,000 Demand EU
제약조건8		1			1			1					49,500	eq 49,500 Demand NA
제약조건9			1			1			1				55,000	eq 55,000 Demand FE
제약조건10										1			3,798	<= 7,000 Inventory AF
제약조건11											1		349	<= 7,000 Inventory US
제약조건12												1	0	<= 7,000 Inventory ME
제약조건13	-1	-1	-1										0	eq 0
제약조건14				-1	-1	-1							0	eq 0
제약조건15							-1	-1	-1				-1	eq 0

Microsoft Excel 15.0 해당 보고서  
 워크시트 이름: [OffshoreProd\_Trans(MinMax)\_1013.xlsm]OffshoreP&T(Max - High demand)  
 보고서 작성일: 2014-10-18 오전 10:41:19  
 결과: 허용 한도 내 정수 해를 찾았습니다. 모든 제한 조건이 만족되었습니다.  
 해 찾기 엔진  
 엔진: 단순 LP  
 해 찾는 시간: 1.716 초.  
 반복 횟수: 2 부분 문제: 1962  
 해 찾기 옵션  
 최대 시간 제한 없음, 반복 횟수 제한 없음, Precision 0.000001, 단위 자동 설정 사용  
 최대 부분 문제 제한 없음, 최대 정수 해 제한 없음, 정수 허용 한도 1%, 음수 아닌 것으로 가정

목표 셀 (최대값)

셀	이름	계산 전의 값	계산 값
SCN\$3	최적해 목적함수값	-	4,893,911,988

제한 조건

셀	이름	셀의 값	수식	상태	조건과의 차
SCN\$10	제약조건4 좌변 합계	62,262	SCN\$10<=SCP\$10	부분적 만족	3932
SCN\$11	제약조건5 좌변 합계	49,849	SCN\$11<=SCP\$11	만족	0
SCN\$12	제약조건6 좌변 합계	43,536	SCN\$12<=SCP\$12	만족	0
SCN\$13	제약조건7 좌변 합계	47,000	SCN\$13=SCP\$13	만족	0
SCN\$14	제약조건8 좌변 합계	49,500	SCN\$14=SCP\$14	만족	0
SCN\$15	제약조건9 좌변 합계	55,000	SCN\$15=SCP\$15	만족	0
SCN\$16	제약조건10 좌변 합계	3,798	SCN\$16<=SCP\$16	부분적 만족	3202
SCN\$17	제약조건11 좌변 합계	349	SCN\$17<=SCP\$17	부분적 만족	6651
SCN\$18	제약조건12 좌변 합계	0	SCN\$18<=SCP\$18	부분적 만족	7000
SCN\$19	제약조건13 좌변 합계	0	SCN\$19=SCP\$19	만족	0
SCN\$20	제약조건14 좌변 합계	0	SCN\$20=SCP\$20	만족	0
SCN\$21	제약조건15 좌변 합계	0	SCN\$21=SCP\$21	만족	0
SCN\$7	제약조건1 좌변 합계	62,262	SCN\$7>=SCP\$7	부분적 만족	262
SCN\$8	제약조건2 좌변 합계	49,849	SCN\$8>=SCP\$8	부분적 만족	2,849
SCN\$9	제약조건3 좌변 합계	43,536	SCN\$9>=SCP\$9	부분적 만족	636

SK\$3:SCJ\$3=2진수

Fig. 11 해양 석유 생산 최적화 실험(시장 수요가 높을 경우)

Waf11 - 1	Waf12 - 1	Waf13 - 1	Waf14 - 1	Waf15 - 1	Waf16 - 1				
Waf21 - 0	Waf22 - 1	Waf23 - 1	Waf24 - 1	Waf25 - 1	Waf26 - 0	Waf27 - 1			
Waf31 - 1	Waf32 - 1	Waf33 - 1	Waf34 - 1	Waf35 - 1					
Waf41 - 1	Waf42 - 1	Waf43 - 1	Waf44 - 1	Waf45 - 1	Waf46 - 1	Waf47 - 1	Waf48 - 1		
Waf51 - 1	Waf52 - 1	Waf53 - 1	Waf54 - 1	Waf55 - 1	Waf56 - 1	Waf57 - 1	Waf58 - 1	Waf59 - 1	
Wus11 - 1	Wus12 - 1	Wus13 - 1	Wus14 - 1	Wus15 - 1	Wus16 - 1				
Wus21 - 1	Wus22 - 1	Wus23 - 1	Wus24 - 1	Wus25 - 1					
Wus31 - 1	Wus32 - 1	Wus33 - 1	Wus34 - 1						
Wus41 - 1	Wus42 - 1	Wus43 - 1	Wus44 - 1	Wus45 - 1	Wus46 - 1	Wus47 - 1	Wus48 - 1		
Wme11 - 1	Wme12 - 1	Wme13 - 1	Wme14 - 1	Wme15 - 1	Wme16 - 1	Wme17 - 1	Wme18 - 1		
Wme21 - 1	Wme22 - 1	Wme23 - 1	Wme24 - 1	Wme25 - 1	Wme26 - 1	Wme27 - 1			
Wme31 - 1	Wme32 - 1	Wme33 - 1	Wme34 - 1						

Fig. 12 유정의 선택(시장 수요가 높을 경우)

높은 시장수요일 경우에, 시장 수요를 충족시키기 위하여 West africa의 2 개를 제외한 모든 생산 유정을 가동하였다. 석유의 수송은 West Africa에서 Europe으로 47,000,000 배럴, Far East로 11,464,000 배럴, Gulf of Mexico에서 North America로 49,500,000 배럴 그리고 Middle East에서 Far East로 43,536,000 배럴이다. 재고는 West Africa에서 3,798,000 배럴, Gulf of Mexico에서 349,000 배럴이 발생하였다. 생산-수송된 석유가격에서 유정당 생산비용과 수송비 그리고, 재고비용을 제한 순수익은 4,893,911,988 US\$이다.

다음은 낮은 시장수요일 경우의 계산실험 결과이다. Fig. 13은 낮은 시장 수요일 경우의 해양 석유 생산의 최적화 실험 결과이며, Fig. 14는 이때 각 생산 유정의 가동 여부를 나타낸다.

최적해	35250	3410	7251	0	33715	0	0	0	33999	7000	7000	2509	3,417,600,415	목적함수값			
의사결정변수	Xafeu	Xafna	Xaffe	Xuseu	Xusna	Xusfe	Xmeeu	Xmena	Xmefe	Iaf	Ius	Ime					
목적함수계수	19,319	6,710	-43,498	8,309	67,243	-68,187	27,532	21,781	27,680	-29,940	-33,300	-30,435					
														좌변 합계			
제약조건1														52,911	>=	52,700	TP AF
제약조건2														40,715	>=	39,950	TP US
제약조건3														36,508	>=	36,465	TP ME
제약조건4														52,911	<=	66,194	DC AF
제약조건5														40,715	<=	49,849	DC US
제약조건6														36,508	<=	43,536	DC ME
제약조건7	1			1			1		1					35,250	eq	35,250	Demand EU
제약조건8		1			1			1						37,125	eq	37,125	Demand NA
제약조건9			1			1			1					41,250	eq	41,250	Demand FE
제약조건10										1				7,000	<=	7,000	Inventory AF
제약조건11											1			7,000	<=	7,000	Inventory US
제약조건12												1		2,509	<=	7,000	Inventory ME
제약조건13	-1	-1	-1							-1				0	eq	0	
제약조건14				-1	-1	-1					-1			0	eq	0	
제약조건15							-1	-1	-1			-1		0	eq	0	

Microsoft Excel 15.0 해당 보고서  
 워크시트 이름: [OffshoreProd\_Trans(MinMax)\_1013.xlsm]OffshoreP&T(Max - Low demand)  
 보고서 작성일: 2014-10-18 오전 11:24:39  
 결과: 허용 한도 내 정수 해를 찾았습니다. 모든 제한 조건이 만족되었습니다.  
 해 찾기 엔진  
 엔진: 단순 LP  
 해 찾는 시간: 1.997 초.  
 반복 횟수: 3 부분 문제: 2166  
 해 찾기 옵션  
 최대 시간 제한 없음, 반복 횟수 제한 없음, Precision 0.000001, 단위 자동 설정 사용  
 최대 부분 문제 제한 없음, 최대 정수 해 제한 없음, 정수 허용 한도 1%, 음수 아닌 것으로 가정

목표 셀 (최대값)

셀	이름	계산 전의 값	계산 값
\$C\$3	최적해 목적함수값	-	3,417,600,415

제한 조건

셀	이름	셀의 값	수식	상태	조건과의 차
\$C\$10	제약조건4 좌변 합계	52,911	\$C\$10<=\$C\$10	부분적 만족	13283
\$C\$11	제약조건5 좌변 합계	40,715	\$C\$11<=\$C\$11	부분적 만족	9134
\$C\$12	제약조건6 좌변 합계	36,508	\$C\$12<=\$C\$12	부분적 만족	7028
\$C\$13	제약조건7 좌변 합계	35,250	\$C\$13=\$C\$13	만족	0
\$C\$14	제약조건8 좌변 합계	37,125	\$C\$14=\$C\$14	만족	0
\$C\$15	제약조건9 좌변 합계	41,250	\$C\$15=\$C\$15	만족	0
\$C\$16	제약조건10 좌변 합계	7,000	\$C\$16<=\$C\$16	만족	0
\$C\$17	제약조건11 좌변 합계	7,000	\$C\$17<=\$C\$17	만족	0
\$C\$18	제약조건12 좌변 합계	2,509	\$C\$18<=\$C\$18	부분적 만족	4491
\$C\$19	제약조건13 좌변 합계	0	\$C\$19=\$C\$19	만족	0
\$C\$20	제약조건14 좌변 합계	0	\$C\$20=\$C\$20	만족	0
\$C\$21	제약조건15 좌변 합계	0	\$C\$21=\$C\$21	만족	0
\$C\$7	제약조건1 좌변 합계	52,911	\$C\$7>=\$C\$7	부분적 만족	211
\$C\$8	제약조건2 좌변 합계	40,715	\$C\$8>=\$C\$8	부분적 만족	765
\$C\$9	제약조건3 좌변 합계	36,508	\$C\$9>=\$C\$9	부분적 만족	43

\$K\$3:\$CJ\$3=2진수

Fig. 13 해양 석유 생산 최적화 실험(시장 수요가 낮을 경우)

Waf11 - 1	Waf12 - 1	Waf13 - 1	Waf14 - 1	Waf15 - 1	Waf16 - 1				
Waf21 - 0	Waf22 - 1	Waf23 - 0	Waf24 - 0	Waf25 - 0	Waf26 - 0	Waf27 - 0			
Waf31 - 1	Waf32 - 1	Waf33 - 1	Waf34 - 1	Waf35 - 1					
Waf41 - 1	Waf42 - 1	Waf43 - 1	Waf44 - 0	Waf45 - 1	Waf46 - 1	Waf47 - 1	Waf48 - 1		
Waf51 - 1	Waf52 - 1	Waf53 - 1	Waf54 - 1	Waf55 - 1	Waf56 - 1	Waf57 - 1	Waf58 - 1	Waf59 - 1	Waf510
Wus11 - 1	Wus12 - 1	Wus13 - 0	Wus14 - 1	Wus15 - 0	Wus16 - 1				
Wus21 - 1	Wus22 - 1	Wus23 - 1	Wus24 - 1	Wus25 - 1					
Wus31 - 1	Wus32 - 1	Wus33 - 1	Wus34 - 1						
Wus41 - 0	Wus42 - 1	Wus43 - 0	Wus44 - 1	Wus45 - 1	Wus46 - 1	Wus47 - 1	Wus48 - 0		
Wme11 - 1	Wme12 - 1	Wme13 - 0	Wme14 - 0	Wme15 - 1	Wme16 - 1	Wme17 - 1	Wme18 - 0		
Wme21 - 0	Wme22 - 1	Wme23 - 1	Wme24 - 1	Wme25 - 1	Wme26 - 1	Wme27 - 1			
Wme31 - 1	Wme32 - 1	Wme33 - 1	Wme34 - 1						

Fig. 14 유정의 선택(시장 수요가 낮을 경우)

낮은 시장수요일 경우에는 시장 수요가 감소하였기 때문에 생산량을 줄이기 위하여 West africa의 7개, Gulf of Mexico의 5개 그리고, Middle East의 4개의 생산 유정의 가동이 중지되었다. 석유의 수송은 West Africa에서 Europe으로 35,250,000 배럴, North America로 3,410,000 배럴, Far East로

7,251,000 배럴, Gulf of Mexico에서 North America로 33,715,000 배럴 그리고 Middle East에서 Far East로 33,999,000 배럴이다. 재고는 West Africa에서 7,000,000 배럴, Gulf of Mexico에서 7,000,000 배럴 그리고, Middle East에서 2,509,000 배럴이 발생하였다. 수출된 석유가격에서 유정당 생산비용과 수송비 그리고, 재고비용을 제한 순수익은 3,417,600,415 US\$이다.

해양 석유 생산에는 많은 비용이 발생하며, 시장 수요에 반응하지 못하여 초과생산을 할 경우에도 재고비용이 발생하며 또한 저유능력에 따라 재고량 수용에도 한계가 있다. 따라서, 다국적 석유기업의 시장 수요에 따른 시장점유율(market share)이 해양 석유 생산에 결정적인 영향을 미친다. 시장 수요가 많을 경우에는 생산량을 늘려 수요를 최대한 충족시켜 이윤을 극대화시키며, 수요가 적을 경우에는 생산량을 줄여 재고비용 등으로 인한 손실을 줄여야 한다. 이와 같이 시장 수요를 고려한 생산의 최적화 (optimal design of production) 모형이 다국적 석유기업의 연간, 분기별 생산계획을 세우는데 필수요소이다.

### 4.3 계산실험 - 해양 석유 수송의 최적화

위의 4.2장에서 해양 석유 생산의 최적화 모형에 의하여 석유를 생산하였다면 이를 수요지까지 수송하는 문제가 남아있다. 해양 플랜트에서 생산된 석유를 수송하는 방법에는 해저 파이프라인을 통해 수요지까지 수송하는 방법과 탱커로 해상운송을 하는 방법이 있는데, 설치에 많은 비용과 시간이 소요되는 해저 파이프라인은 한번 설치되면 운송 목적지를 변경할 수 없어 다양한 시장수요에 대응하기에는 한계가 있기 때문에 자국 내 수송이나 장기운송계약이 아닌 이상 해저 파이프라인 보다는 해상운송을 하는 경우가 더욱 일반적이다.

본 장에서는 위의 실험결과들 중 낮은 시장 수요일 경우의 수송 문제를 다루며, 다국적 석유기업을 자신의 화물을 보다 경제적, 안정적으로 적시에 수송하기 위한 목적으로 자사 소유의 VLCC 선대를 보유한 화주 직접운항 선사(industrial carrier)로 가정하여 해양 플랜트에서 생산된 석유를 수요지

까지 수송하는 문제를 주어진 선박, 화물, 항구간 거리에 대한 정보로 수익을 극대화 할 수 있는 최적의 선대 운항일정을 도출해주는 MoDiSS 프로그램을 사용하여 그 최적화 해를 구한다.

MoDiSS는 그래프이론(Graph theory)을 통해 운항가능일정 알고리즘을 구현한 후 선형 0-1 정수계획모형인 [SPK 모형]으로 최적화된 운항일정을 선택하는데, 최적화 모형의 해법은 Fig. 15에서 보듯이 선형, 비선형, 정수계획법의 해를 구하는 상용 프로그램인 LINDO optimizer를 이용하여 구한다.

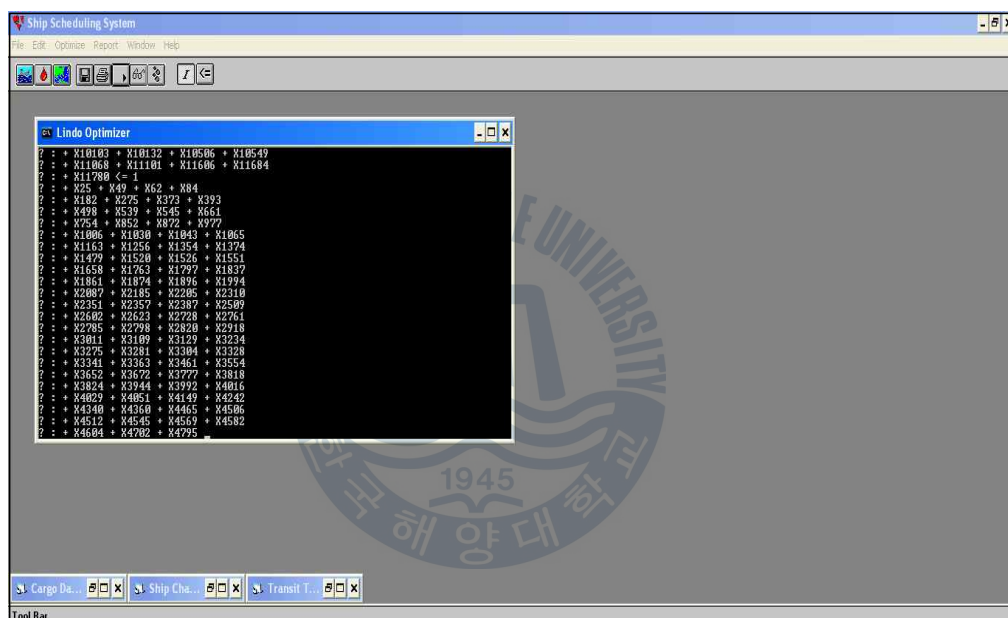


Fig. 15 MoDiSS 프로그램에서의 LINDO optimizer 구동

MoDiSS를 사용하여 최적화된 운항일정을 구하기 위하여 선박, 화물의 상세와 각 선적항과 하역항간의 거리가 필요하다. 계산실험에 사용된 자사 선대 선박의 정보는 Table 7과 같다. 다국적 석유기업은 자회사를 통하여 총 30척의 280,000 ~ 300,000 DWT급 VLCC 선단을 보유한 것으로 설정하였다.

Table 7 선박 데이터 (자사 탱커 선단)

ID	Size (1,000 MT)	Opr. Cost (1,000 US\$)	Open Date	Initial Position	Cargo Type	Name
1	280	114	7	Yeosu	5678	M/T Platinum
2	290	119	5	Bonny offshore terminal	5678	M/T Titanium
3	280	114	1	LOOP	5678	M/T Tungsten
4	290	119	3	Bonny offshore terminal	5678	M/T Cobalt
5	300	124	1	Rotterdam	5678	M/T Victory
6	290	119	2	Yokohama	5678	M/T Warden
7	300	124	1	Bonny offshore terminal	5678	M/T Valhalla
8	280	114	4	Ulsan	5678	M/T Dragon
9	280	114	4	Halifax	5678	M/T Duke
10	280	114	1	Bonny offshore terminal	5678	M/T Millennium
11	290	119	8	Qingdao	5678	M/T Vladivostok
12	290	119	1	Bonny offshore terminal	5678	M/T Junior
13	300	124	4	Rotterdam	5678	M/T Future
14	280	114	2	Dos Bocas terminal	5678	M/T Banner
15	280	114	3	Qingdao	5678	M/T Sun
16	280	114	5	Dos Bocas terminal	5678	M/T Star
17	280	114	1	Yeosu	5678	M/T Brave
18	300	124	3	Dos Bocas terminal	5678	M/T Queen
19	290	119	5	Le Havre	5678	M/T Fortune
20	300	124	1	Dos Bocas terminal	5678	M/T Roses
21	280	114	1	Zirku field	5678	M/T Tiger
22	280	114	5	Ulsan	5678	M/T Todol
23	280	114	2	Zirku field	5678	M/T Freedom
24	290	119	5	Mailiao	5678	M/T Zafiro
25	300	124	1	Zirku field	5678	M/T Orang
26	290	119	2	Qingdao	5678	M/T Tosik
27	280	114	1	Zirku field	5678	M/T Justice
28	300	124	5	Wilhelmshaven	5678	M/T Lucy
29	280	114	1	Zirku field	5678	M/T Tousoon
30	300	124	4	Constanta	5678	M/T Power

Table 8은 계산실험에 사용된 화물정보이다. 4.2장에서의 해양 석유 생산의 최적화 모형 계산실험에서 낮은 시장수요일 경우에 해양 플랜트에서 생산된 석유의 수송수요는 West Africa에서 Europe으로 35,250,000 배럴, North America로 3,410,000 배럴, Far East로 7,251,000 배럴, Gulf of Mexico에서 North America로 33,715,000 배럴 그리고 Middle East에서 Far East로 33,999,000 배럴이었다. 이는 다국적 석유기업의 분기별(90일) 석유의 수송계획이 된다. 정해진 기간 동안 발생한 시장수요를 충족시키기 위한 수송의 최적화 모형 계산실험을 목적으로 각 플랜트의 일일 생산량 (productivity per day)과 그 플랜트가 보유한 저유시설(storage facility)의 규모 그리고, 보유한 탱커들의 수송화물 용적을 고려하여 수송되어야 할 화물을 60개로 나누었다.

Table 8 화물 데이터

ID	Size (1,000 MT)	Freight (1,000 US\$)	Load Date	Load Port	Disch. Date	Disch. Port	Type
1	271	465	33	Bonny offshore terminal	50	Rotterdam	5
2	235	465	52	Bonny offshore terminal	69	Rotterdam	5
3	270	465	57	Bonny offshore terminal	74	Rotterdam	5
4	278	465	67	Bonny offshore terminal	84	Rotterdam	5
5	212	465	22	Bonny offshore terminal	39	Rotterdam	5
6	218	465	40	Bonny offshore terminal	57	Rotterdam	5
7	265	465	19	Bonny offshore terminal	36	Rotterdam	5
8	265	562	55	Bonny offshore terminal	75	Constanta	5
9	252	562	47	Bonny offshore terminal	67	Constanta	5
10	271	653	45	Bonny offshore terminal	69	Le Havre	5
11	234	653	13	Bonny offshore terminal	37	Le Havre	5
12	254	653	64	Bonny offshore terminal	88	Le Havre	5
13	278	653	35	Bonny offshore terminal	59	Le Havre	5
14	205	486	61	Bonny offshore terminal	79	Wilhelmshaven	5
15	255	486	24	Bonny offshore terminal	42	Wilhelmshaven	5
16	202	486	16	Bonny offshore terminal	34	Wilhelmshaven	8
17	267	486	49	Bonny offshore terminal	67	Wilhelmshaven	8
18	230	486	29	Bonny offshore terminal	47	Wilhelmshaven	8
19	213	456	43	Bonny offshore terminal	60	New York	8
20	219	502	27	Bonny offshore terminal	45	Halifax	8

21	245	993	25	Bonny offshore terminal	64	Ningbo	5
22	235	990	28	Bonny offshore terminal	68	Qingdao	5
23	238	999	37	Bonny offshore terminal	78	Yokohama	5
24	200	995	31	Bonny offshore terminal	71	Yeosu	5
25	242	240	29	Dos Bocas terminal	38	Halifax	6
26	227	240	31	Dos Bocas terminal	40	Halifax	6
27	221	240	43	Dos Bocas terminal	52	Halifax	6
28	254	240	15	Dos Bocas terminal	24	Halifax	6
29	268	240	56	Dos Bocas terminal	65	Halifax	6
30	251	218	27	Dos Bocas terminal	35	Philadelphia	6
31	233	218	67	Dos Bocas terminal	75	Philadelphia	6
32	213	218	23	Dos Bocas terminal	31	Philadelphia	6
33	223	218	41	Dos Bocas terminal	49	Philadelphia	6
34	266	192	18	Dos Bocas terminal	25	New York	6
35	202	192	55	Dos Bocas terminal	62	New York	6
36	236	192	11	Dos Bocas terminal	19	New York	6
37	232	192	25	Dos Bocas terminal	32	New York	6
38	241	140	35	Dos Bocas terminal	38	LOOP	6
39	253	140	51	Dos Bocas terminal	54	LOOP	6
40	238	140	20	Dos Bocas terminal	23	LOOP	6
41	230	140	38	Dos Bocas terminal	41	LOOP	6
42	238	140	33	Dos Bocas terminal	36	LOOP	6
43	265	612	62	Zirku field	84	Ningbo	7
44	223	612	31	Zirku field	53	Ningbo	7
45	244	612	48	Zirku field	70	Ningbo	7
46	250	638	21	Zirku field	44	Qingdao	7
47	231	638	27	Zirku field	50	Qingdao	7
48	256	638	43	Zirku field	66	Qingdao	7
49	236	554	69	Zirku field	89	Mailiao	7
50	225	554	35	Zirku field	55	Mailiao	7
51	270	662	29	Zirku field	53	Sakai	7
52	275	683	13	Zirku field	38	Yokohama	7
53	217	683	50	Zirku field	75	Yokohama	7
54	267	683	17	Zirku field	42	Yokohama	7
55	221	683	40	Zirku field	65	Yokohama	7
56	232	636	11	Zirku field	34	Yeosu	7
57	208	636	15	Zirku field	39	Yeosu	7
58	208	636	35	Zirku field	58	Yeosu	7
59	267	644	61	Zirku field	84	Ulsan	7
60	209	644	25	Zirku field	48	Ulsan	7



Table 9는 선적항과 하역항간의 거리와 소요시간이다. 소요시간(Time)은 탱커가 11.0 Knot로 항해하였다고 가정하여 계산하였다.

**Table 9** 선적항과 하역항간 거리와 소요시간

Loading port	Discharging port	Distance (NM)	Time (day)
Bonny offshore terminal	Ningbo	10082	38.19
Dos Bocas terminal	Ningbo	9911	37.54
Zirku field	Ningbo	5766	21.84
Bonny offshore terminal	Qingdao	10330	39.13
Dos Bocas terminal	Qingdao	9900	37.5
Zirku field	Qingdao	6014	22.78
Bonny offshore terminal	Mailiao	9530	36.1
Dos Bocas terminal	Mailiao	10209	38.67
Zirku field	Mailiao	5225	19.79
Bonny offshore terminal	Yeosu	10307	39.04
Dos Bocas terminal	Yeosu	9499	35.98
Zirku field	Yeosu	5995	22.71
Bonny offshore terminal	Ulsan	10383	39.33
Dos Bocas terminal	Ulsan	9396	35.59
Zirku field	Ulsan	6075	23.01
Bonny offshore terminal	Yokohama	10718	40.6
Dos Bocas terminal	Yokohama	9010	34.13
Zirku field	Yokohama	6439	24.39
Bonny offshore terminal	Sakai	10520	39.85
Dos Bocas terminal	Sakai	9306	35.25
Zirku field	Sakai	6241	23.64
Bonny offshore terminal	Halifax	4736	17.94
Dos Bocas terminal	Halifax	2265	8.58
Zirku field	Halifax	6457	24.46
Bonny offshore terminal	New York	4301	16.29
Dos Bocas terminal	New York	1808	6.85
Zirku field	New York	6875	26.04
Bonny offshore terminal	Philadelphia	5196	19.68
Dos Bocas terminal	Philadelphia	2051	7.77
Zirku field	Philadelphia	8287	31.39
Bonny offshore terminal	LOOP	5906	22.37

Dos Bocas terminal	LOOP	639	2.42
Zirku field	LOOP	9438	35.75
Bonny offshore terminal	Rotterdam	4380	16.59
Dos Bocas terminal	Rotterdam	4937	18.7
Zirku field	Rotterdam	6352	24.06
Bonny offshore terminal	Constanta	5296	20.06
Dos Bocas terminal	Constanta	6684	25.32
Zirku field	Constanta	4034	15.28
Bonny offshore terminal	Le Havre	6156	23.32
Dos Bocas terminal	Le Havre	4752	18
Zirku field	Le Havre	6156	23.32
Bonny offshore terminal	Wilhelmshaven	4580	17.35
Dos Bocas terminal	Wilhelmshaven	5074	19.22
Zirku field	Wilhelmshaven	6552	24.82

Fig. 16은 위의 선박, 화물, 거리 정보를 바탕으로 도출된 최적의 선대 운항일정을 나타내는 MoDiSS 프로그램 화면이다.

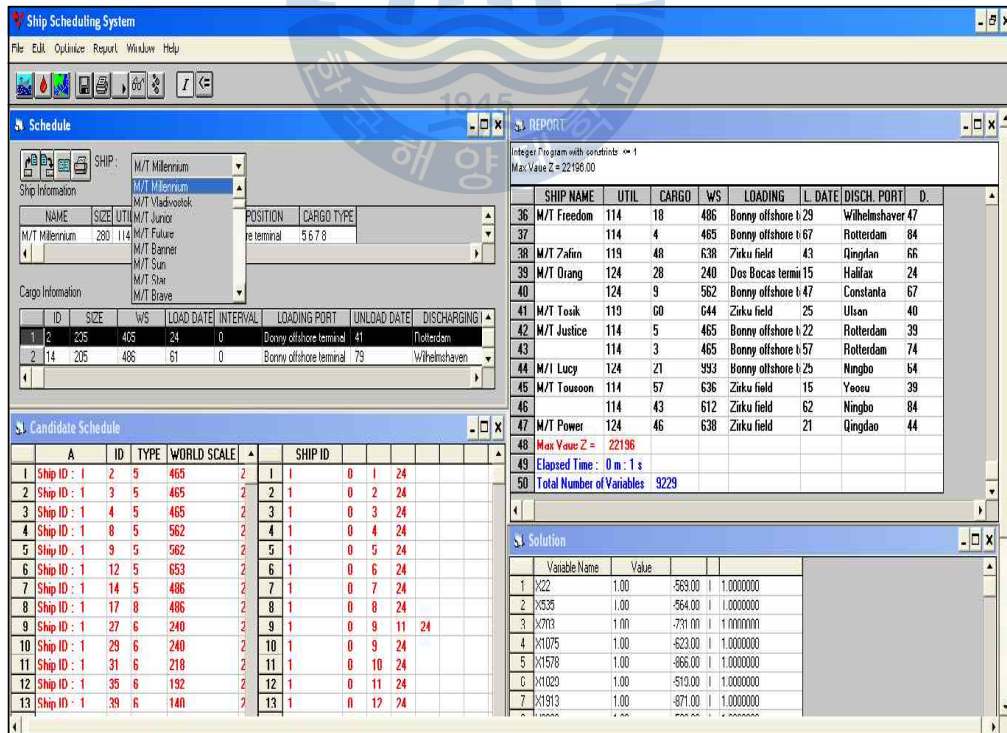


Fig. 16 자사 선단을 이용한 최적 운항일정계획을 보여주는 MoDiSS 화면

Table 10은 위의 실험을 통하여 도출된 선대 최적운항일정의 상세이다.

Table 10 자사 선단을 이용한 최적 운항일정계획

Ship's name	Cargo ID	Opr. Cost (1,000 US\$)	Loading port	Load date	Discharging port	Disch. date
M/T Platinum	53	114	Zirku field	50	Yokohama	75
M/T Titanium	54	119	Zirku field	17	Yokohama	42
M/T Tungsten	34	114	Dos Bocas terminal	18	New York	25
	10	114	Bonny offshore terminal	45	Le Havre	69
M/T Cobalt	20	119	Bonny offshore terminal	27	Halifax	45
	29	119	Dos Bocas terminal	56	Halifax	65
M/T Victory	22	124	Bonny offshore terminal	28	Qingdao	68
M/T Warden	47	119	Zirku field	27	Qingdao	50
M/T Valhalla	24	124	Bonny offshore terminal	31	Yeosu	71
M/T Dragon	58	114	Zirku field	35	Yeosu	58
M/T Duke	40	114	Dos Bocas terminal	20	LOOP	23
	30	114	Dos Bocas terminal	27	Philadelphia	35
	27	114	Dos Bocas terminal	43	Halifax	52
	31	114	Dos Bocas terminal	67	Philadelphia	75
M/T Millennium	52	114	Zirku field	13	Yokohama	38
	49	114	Zirku field	69	Mailiao	89
M/T Vladivostok	45	119	Zirku field	48	Ningbo	70
M/T Junior	16	119	Bonny offshore terminal	16	Wilhelmshaven	34
	2	119	Bonny offshore terminal	52	Rotterdam	69
M/T Future	37	124	Dos Bocas terminal	25	New York	32
	17	124	Bonny offshore terminal	49	Wilhelmshaven	67
M/T Banner	56	114	Zirku field	11	Yeosu	34
	59	114	Zirku field	61	Ulsan	84
M/T Sun	55	114	Zirku field	40	Yokohama	65

M/T Star	15	114	Bonny offshore terminal	24	Wilhelmshaven	42
	14	114	Bonny offshore terminal	61	Wilhelmshaven	79
M/T Brave	44	114	Zirku field	31	Ningbo	53
M/T Queen	7	124	Bonny offshore terminal	19	Rotterdam	36
	8	124	Bonny offshore terminal	55	Constanta	75
M/T Fortune	13	119	Bonny offshore terminal	35	Le Havre	59
M/T Roses	36	124	Dos Bocas terminal	11	New York	19
	23	124	Bonny offshore terminal	37	Yokohama	78
M/T Tiger	11	114	Bonny offshore terminal	13	Le Havre	37
	12	114	Bonny offshore terminal	64	Le Havre	88
M/T Todol	51	114	Zirku field	29	Sakai	53
M/T Freedom	18	114	Bonny offshore terminal	29	Wilhelmshaven	47
	4	114	Bonny offshore terminal	67	Rotterdam	84
M/T Zafiro	48	119	Zirku field	43	Qingdao	66
M/T Orang	28	124	Dos Bocas terminal	15	Halifax	24
	9	124	Bonny offshore terminal	47	Constanta	67
M/T Tosik	60	119	Zirku field	25	Ulsan	48
M/T Justice	5	114	Bonny offshore terminal	22	Rotterdam	39
	3	114	Bonny offshore terminal	57	Rotterdam	74
M/T Lucy	21	124	Bonny offshore terminal	25	Ningbo	64
M/T Tousoon	57	114	Zirku field	15	Yeosu	39
	43	114	Zirku field	62	Ningbo	84
M/T Power	46	124	Zirku field	21	Qingdao	44
<p>Transported cargo ID: 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 36, 37, 40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60</p> <p>Total transported cargo: 47 cargos, 11,388,000 MT</p>						

위의 결과에서 보듯이 자사 선단만으로는 30척이 모두 운항일정에 투입되었음에도 불구하고 60개의 수송수요 중 47개만을 충족하는 결과가 나왔다. 이는 30척의 자사선단으로는 다국적 석유기업의 당해 분기 동안의 수송수요를 충족시키는 것이 불가능하다는 것을 의미한다. 따라서 다국적 석유기업은 나머지 13개의 수송화물들도 수요지까지 안정적으로 수송하기 위하여 Table 11과 같이 선박의 크기와 초기위치(initial position) 등을 고려하여 용선시장(spot market)에 나와 있는 다른 선주 소유의 탱커들 중 자사의 수송수요를 충족시킬 수 있는 조건의 탱커 10척을 항해용선계약의 형태로 용선하여 석유 수송에 투입한다.

**Table 11** 선박 데이터 (용선 탱커 선단)

ID	Size (1,000 MT)	Open Date	Initial Position	Cargo Type	Name
31	280	25	Bonny offshore terminal	5678	M/T Aquarius
32	245	24	Bonny offshore terminal	5678	M/T Ariel
33	240	30	Dos Bocas terminal	5678	M/T Carina
34	290	31	Bonny offshore terminal	5678	M/T Courageous
35	280	23	Dos Bocas terminal	5678	M/T Defender
36	290	41	Bonny offshore terminal	5678	M/T Eclipse
37	290	38	Dos Bocas terminal	5678	M/T Jupiter
38	230	36	Dos Bocas terminal	5678	M/T Leo
39	300	23	Dos Bocas terminal	5678	M/T Mira
40	290	2	Yokohama	5678	M/T Navigator

Fig. 17은 자사 선단에 더하여 용선해온 선박을 추가로 입력하여 도출된 최적 운항일정계획 결과를 보여주는 MoDiSS 화면이다.

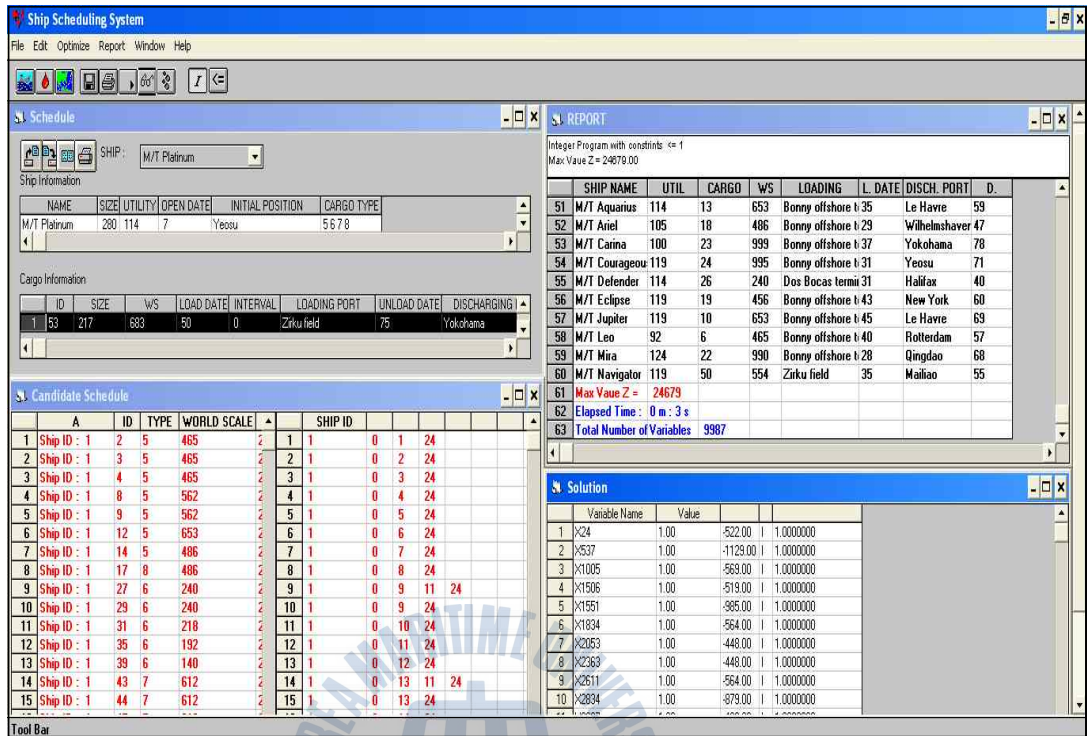


Fig. 17 용선 선단을 추가한 최적 운항일정계획을 보여주는 MoDiSS 화면

Table 12는 위의 실험을 통하여 도출된 선대 최적운항일정의 상세이다.

Table 12 용선 선단을 추가한 최적 운항일정계획

Ship's name	Opr. Cost (1,000 US\$)	Cargo ID	Loading port	Load date	Discharging port	Disch. date
M/T Platinum	114	58	Zirku field	35	Yeosu	58
M/T Titanium	119	56	Zirku field	11	Yeosu	34
	119	43	Zirku field	62	Ningbo	84
M/T Tungsten	114	55	Zirku field	40	Yokohama	65
M/T Cobalt	119	46	Zirku field	21	Qingdao	44
M/T Victory	124	7	Bonny offshore terminal	19	Rotterdam	36
	124	59	Zirku field	61	Ulsan	84
M/T Warden	119	53	Zirku field	50	Yokohama	75

M/T Valhalla	124	34	Dos Bocas terminal	18	New York	25
	124	38	Dos Bocas terminal	35	LOOP	38
	124	27	Dos Bocas terminal	43	Halifax	52
M/T Dragon	114	9	Bonny offshore terminal	47	Constanta	67
M/T Duke	114	37	Dos Bocas terminal	25	New York	32
	114	17	Bonny offshore terminal	49	Wilhelmshaven	67
M/T Millennium	114	21	Bonny offshore terminal	25	Ningbo	64
M/T Vladivostok	119	45	Zirku field	48	Ningbo	70
M/T Junior	119	11	Bonny offshore terminal	13	Le Havre	37
M/T Future	124	5	Bonny offshore terminal	22	Rotterdam	39
	124	12	Bonny offshore terminal	64	Le Havre	88
M/T Banner	114	28	Dos Bocas terminal	15	Halifax	24
	114	42	Dos Bocas terminal	33	LOOP	36
	114	33	Dos Bocas terminal	41	Philadelphia	49
	114	31	Dos Bocas terminal	67	Philadelphia	75
M/T Sun	114	48	Zirku field	43	Qingdao	66
M/T Star	114	41	Dos Bocas terminal	38	LOOP	41
	114	39	Dos Bocas terminal	51	LOOP	54
M/T Brave	114	51	Zirku field	29	Sakai	53
M/T Queen	124	16	Bonny offshore terminal	16	Wilhelmshaven	34
	124	8	Bonny offshore terminal	55	Constanta	75
M/T Fortune	119	32	Dos Bocas terminal	23	Philadelphia	31
	119	2	Bonny offshore terminal	52	Rotterdam	69
M/T Roses	124	36	Dos Bocas terminal	11	New York	19

	124	25	Dos Bocas terminal	29	Halifax	38
	124	3	Bonny offshore terminal	57	Rotterdam	74
M/T Tiger	114	54	Zirku field	17	Yokohama	42
	114	49	Zirku field	69	Mailiao	89
M/T Todol	114	44	Zirku field	31	Ningbo	53
M/T Freedom	114	40	Dos Bocas terminal	20	LOOP	23
	114	30	Dos Bocas terminal	27	Philadelphia	35
	114	35	Dos Bocas terminal	55	New York	62
M/T Zafiro	119	47	Zirku field	27	Qingdao	50
M/T Orang	124	57	Zirku field	15	Yeosu	39
M/T Tosik	119	60	Zirku field	25	Ulsan	48
M/T Justice	114	15	Bonny offshore terminal	24	Wilhelmshaven	42
	114	14	Bonny offshore terminal	61	Wilhelmshaven	79
M/T Lucy	124	1	Bonny offshore terminal	33	Rotterdam	50
	124	4	Bonny offshore terminal	67	Rotterdam	84
M/T Tousoon	114	52	Zirku field	13	Yokohama	38
M/T Power	124	20	Bonny offshore terminal	27	Halifax	45
	124	29	Dos Bocas terminal	56	Halifax	65
Ship' s name	Freight (1,000 US\$)	Cargo ID	Loading port	Load date	Discharging port	Disch. date
M/T Aquarius	653	13	Bonny offshore terminal	35	Le Havre	59
M/T Ariel	486	18	Bonny offshore terminal	29	Wilhelmshaven	47
M/T Carina	999	23	Bonny offshore terminal	37	Yokohama	78
M/T Courageous	995	24	Bonny offshore terminal	31	Yeosu	71



M/T Defender	240	26	Dos Bocas terminal	31	Halifax	40
M/T Eclipse	456	19	Bonny offshore terminal	43	New York	60
M/T Jupiter	653	10	Bonny offshore terminal	45	Le Havre	69
M/T Leo	465	6	Bonny offshore terminal	40	Rotterdam	57
M/T Mira	990	22	Bonny offshore terminal	28	Qingdao	68
M/T Navigator	554	50	Zirku field	35	Mailiao	55
Transported cargo ID: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60 Total transported cargo: 60 cargos, 14,384,000 MT						

위의 결과에서 보듯이 다국적 석유기업은 30척의 자사 선단과 10척의 용선 선단으로 60개의 수송수요를 모두 만족시키는 최적 운항일정계획을 수립하였으며, 이는 제 4.2장에서 다룬 다국적 석유기업의 분기별 석유 생산 계획에 이은 분기별 석유 수송계획이 된다.

단기 용선을 하여 운항하는 선박은 자사 선박에 비하여 기본적으로 더욱 많은 비용이 소요되며, 용선시장은 운임의 변동이 계속 있기 때문에 다국적 석유기업의 수송수요를 안정적으로 충족시키는데 무리가 있다. 자사 선단을 과도하게 많이 보유하는 것 또한 선박 구입비용, 유지비, 운항비용, 감가상각 등의 위험요소들을 무시할 수 없다. 이러한 사항들을 고려하여 적정 규모의 자사선단을 보유하고 자사선단만으로는 수송수요의 충족이 불가능한 경우에 적절한 용선 선박을 들여와 운항계획에 투입하는 의사결정은 매우 중요하며, 위와 같은 최적 운항일정계획을 목적으로 한 실험이 그러한 의사결정을 지원할 수 있다.

## 제 5장 결론

### 5.1 결론

육상의 자원은 점점 고갈되어가고 있는데 비해 해양에서 생산하는 석유 및 가스는 2014년 현재 이미 전 세계 석유 및 가스 생산량의 1/3을 차지하고 있고, 탐사와 시추, 그리고 생산기술의 지속적인 발전으로 보다 심해로 개발영역이 확장되고 있어 그 비중은 더욱 커질 전망이다. 하지만, 해양에서의 석유 및 가스 생산은 육상 생산보다 더욱 많은 시간과 자본이 소요되며 개발과정중의 실패, 환경오염, 인명사고 등 상당한 위험성을 내포하고 있는 산업이기에 인명과 환경, 자산의 안전을 보장하는 범위 안에서 생산과 수송에 소요되는 시간과 비용을 효율적으로 계획하여 수익을 극대화 시키는 최적화된 의사결정모델의 수립이 필수이다.

본 논문에서 다룬 해양 석유 생산 문제는 혼합정수계획모형을 이용하여 각 해양 플랜트의 석유 생산 가능량과 시장수요가 주어졌을 경우에 생산에 필요한 유정의 선택, 수송 목적지의 선정과 수송량 그리고, 수송하고 남은 석유의 재고처리 문제에 대한 최적화된 의사결정이 가능하다. 또한 시장 수요가 높을 경우에는 생산량을 늘려 수요를 최대한 충족시켜 이윤을 극대화 시키며, 수요가 낮을 경우에는 생산량을 줄여 생산비용과 재고비용 등을 최소화하여 손실을 줄일 수 있는 합리적인 의사결정의 수립도 가능하다.

해양 유전에서 수요지까지의 해사수송에 관한 문제도 그래프이론으로 운항가능일정 알고리즘을 구현한 후 선형 0-1 정수계획모형인 [SPK 모형]으로 최적화된 운항일정을 도출해내는 MoDiSS 같은 최적화 기반 의사결정 지원시스템을 이용할 수 있다. 다국적 석유기업이 보유하고 있는 운항선대만으로 주어진 수용수요를 충족시킬 수 있을지 아니면, 추가로 용선시장에서 탱커들을 용선하여 투입하여야 해양 플랜트에서 생산된 석유를 수요지까지 안정적으로 수송이 가능한지의 여부도 검토 가능하다.

## 5.2 향후과제

우리나라의 해양 산업의 규모는 에너지 소비량과 자원의 해외 의존도에 비해 아직은 미비한 규모이다. 해양 플랜트의 건조실적을 제외하고는 주변 국인 중국, 일본에 비하여도 그동안 느린 행보를 보였었지만, 수년 전부터 해양자원개발에 대한 각계의 공감대가 형성되고 있고 국내 대륙붕 사업 등을 포함한 해양 산업을 통한 다양한 분야의 경제 활성화 효과를 확산하는 정부의 의지 또한 굳어지고 있다. 계속해서 노력한다면 우리나라도 국내 혹은 해외에서 석유 및 가스 또는 가스하이드레이트(Gas Hydrate)<sup>22)</sup> 생산을 하는 해양 플랜트를 보유할 수 있을 것이다. 이를 위하여는 해양 고유의 기술 분야도 물론 중요하지만, 본 논문에서 다룬 해양 석유 생산과 수송의 최적화 등과 같은 경영과학적 접근 또한 필수이다. 노르웨이와 같이 해양 산업이 활발한 나라에서 탐사, 시추, 그리고 생산 등 해양 산업의 다양한 분야에 경영과학적 기법을 적용하는 연구가 활발한 것도 이를 뒷받침해주는 증거이다. 본 논문에서는 단순히 시장수요와 생산량이 이미 주어졌다는 가정 하의 최적화 모델을 제시하였지만, 불확실한 시장수요에 대하여 강인성(robustness)을 가지는 추계적 모형(stochastic program)등과 같은 보다 실제적이고 다양한 상황에 응용할 수 있는 모형에 대한 연구도 향후 연구과제로 제안할 수 있다.

22) 낮은 온도와 높은 압력에서 가스와 물이 결합되어 형성된 고체 에너지. 해저의 고압 저온 상태에서 물분자 간의 수소 결합으로 형성되는 3차원 격자 구조로 형성되어 있으며, 격자 구조 내의 빈 공간에 메탄, 에탄, 프로판, 이산화탄소 등 작은 가스 분자가 화학 결합이 아닌 물리적으로 결합한 것이다. 상온·상압 상태에서는 바로 물과 가스로 분리된다. 1m<sup>3</sup> 가스 하이드레이트 안에는 약 170 m<sup>3</sup>의 가스가 함유되어 있기 때문에 불을 붙이면 불꽃을 내며 탄다고 하여 일명 '불타는 얼음'으로 불린다. 2014년 9월 19일 대한민국 산업통상자원부는 '국내의 자원개발과 신재생에너지 분야의 중장기 기본계획'을 통해 2023년까지 울릉·서해·제주분지 등 대륙붕 3개 퇴적분지 일대에서 최대 9곳의 시추탐사 사업을 벌이기로 했으며 울릉분지에 매장된 것으로 추정되는 가스 하이드레이트에 대한 연구개발도 지속한다고 발표했다. (출처: IT용어사전, 한국정보통신기술협회, 해럴드경제)

## 감사의 글

삶의 모든 순간은 선택이라는 의사결정의 연속이다. 합리적인 의사결정과 비합리적인 의사결정이 가져다주는 결과는 실로 엄청난 차이를 보이기 때문에 최적화된 의사결정의 방법을 연구하는 경영과학은 본인에게 실로 매력적인 학문이다. 지금까지 해운, 물류 등 여러 분야에 관한 경영과학적 접근법에 관한 많은 연구가 있어왔으며, 이러한 선행연구를 공부하는 과정 역시 무척 흥미로웠다. 본 논문은 본인이 몸담고 있는 offshore 분야에 최적화된 의사결정을 지원하는 경영과학의 기법을 적용하여 연구해보자는 시도에서 출발하였으며, 완성되기까지 많은 분들의 도움이 있었기에 가능했었던 연구였다.

논문의 주제조차도 정하기 힘들어하던 본인과 함께 고민해 주셨고, 넓은 제안으로 연구의 방향을 제시해주셨으며 조언을 아끼지 않으신 김시화 교수님께 이 지면을 통해 감사와 존경을 표현한다. 동문수학하며 정을 나누고 이 연구에 흔쾌히 큰 도움이 되어준 오동건, 임상섭, 박민경, 박나래, 김정민, 구지혜 후배에게도 감사드리며 앞으로도 각자 큰 학문적 성과가 있기를 바란다. 원석(原石)의 상태에 지나지 않았던 이 글이 논문의 형태를 취하기까지 주옥같은 조언을 주시고 격려해주신 조성철, 김태균 교수님께 감사드린다. 해운의 특성에 관한 연구를 도운 해대 동기 서창휘에게도 감사하며 앞으로의 무궁한 발전을 소망한다. 본가와 처가의 어르신들과 우성고교의 은사님들께도 깊은 감사를 드린다. 또한 남편의 뒤통까지 두 아들을 돌보며 외조를 다한 사랑하는 아내 김은경과, 우리 부부에게 기쁨과 소망이 되는 아들 하민과 하울에게도 감사하며 주 안에서 밝고 건강하기를 소원한다.

2014년의 대부분을 학업과 건강상의 이유로 승선생활을 잠시 중단하고 육상에 있었음에도 불구하고 졸업논문을 쓴다는 핑계로 큰 아픔을 겪은 분들과 함께 하지 못하였음을 죄송하게 생각한다. 세월호 사건으로 목숨을 잃은 사람들과 아직도 돌아오지 못한 사람들, 살아남아 트라우마에 시달리는 사람들, 평생을 슬퍼할 유가족들, 특히 자식을 잃은 부모들, 그 슬픔을 나눠진 지인들, 그리고 대한민국 모두에게 이 지면을 통해 선원된 입장으로 사죄하며, 하나님의 위로와 평안이 항상 임하시기를 기도한다.

## 참고문헌

### [국내문헌]

- 김세헌, 2008. *현대경영과학*, 무역경영사.
- 김시화, 2013. *살롱경영경제수학*, 세종출판사.
- 김성호 등, 2008. *엑셀을 활용한 경영과학*, 서울경제경영.
- 김시화, 이희용, 1996. 유조선운항일정계획 의사결정지원시스템의 개발에 관한 연구, *한국항해학회지*, 제20권 제1호, pp 27-46
- 김시화, 곽민석, 1998. 인더스트리얼 캐리어를 위한 통합선대운영의 최적화에 관한 연구, *한국항해학회지*, 제22권 제4호, pp 1-14
- 김시화, 1999. 부정기선 해운의 해상수송 문제에 대한 최적화 기반 의사결정 지원 시스템. 박사학위논문. 부산:부산대학교
- 황희수, 2000. 집합 패킹 문제에 적용된 컬럼 서브트랙션 해법구현에 관한 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- 박나래, 2014. 평균-분산 최적화 모형을 이용한 로버스트 선박운항일정계획. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- 한국해양수산개발원, *세계 원유관련 통계* [Online] (Updated June 2013) Available at:<http://www.kmi.re.kr/kmi/kr/analysis/analysis04/index020102.jsp#dataTit03> [Accessed 12<sup>th</sup> September. 2014].

### [국외문헌]

- Bohannon, J. M., 1970. Alinear programming model for optimum development of multi-reservoir pipeline systems. *Journal of Petroleum Technology*, 22, 1429-436.
- Frair, L. C., 1973. *Economic optimisation of offshore oil field development*. Tulsa, OK: University of Oklahoma.
- Iyer, R. R., Grossmann, I. E., Vasantharajan, S., & Cullick, A. S., 1998. Optimal

planning and scheduling of offshore oil field infrastructure investment and operation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 37, 1380.

Ortiz-Gómez, A., Rico-Ramirez, V., & Hernández-Castro, S., 2002. Mixedinteger multiperiod model for the planning of oilfield production. *Computers and Chemical Engineering*, 26, 703-14.

Lin, X., & Floudas, C. A., 2003. A novel continuous-time modelling and optimisation framework for well platform planning problems. *Optimisation and Engineering*, 4, 65-3.

Richard J. Barnes, Antonis Kokossis, 2007. A mathematical programming approach to the analysis, design and scheduling of offshore oilfields. *17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering-ESCAPE17*

Richard J. Barnes, Antonis Kokossis & Zhigang Shang, 2007. An integrated mathematical programming approach for the design and optimisation of offshore fields. *Computers and Chemical Engineering*, 31, 612-29.

WANG Dongjin, LI Xiusheng, ZHANG Haiying & WANG Zhen, 2012. A model for estimating the drilling and completion investment in offshore oilfields in West Africa and the Asia-Pacific region. *Petroleum Exploration and Development*, 39(4), 534-38

National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, 2011. *The History of Offshore Oil and Gas in the United States*.

British Petroleum (BP), 2014. *BP Statistical Review of World Energy June 2014*.

John Ferentinos, 2013. *Global Offshore Oil and Gas Outlook*.

Douglas Westwood, 2013. *Global offshore prospects*, Infield systems.

Offshore Center Denmark, 2010. *OffshoreBook An introduction to the offshore industry*.

U.S. Energy Information Administration, 2009. *Performance Profiles of Major Energy Producers 2009*

- Offshore-technology.com, Project - Industry projects - *Kizomba Offshore Field Deepwater Project, Angola* [Online] (Updated : Unknown) Available at: <http://www.offshore-technology.com/projects/kizomba/> [Accessed 11<sup>th</sup> June. 2014].
- REUTERS.com (US edition), 2012. News & quotes - *Supertanker sea storage looms as oil prices fall* [Online] (Updated 25<sup>th</sup> June 2012) Available at: <http://www.reuters.com/article/2012/06/25/oil-storage-idUSL6E8HP7V320120625> [Accessed 03<sup>rd</sup> September. 2014].
- US Energy information administration, *How much does it cost to produce crude oil and natural gas?* [Online] (Updated 15<sup>th</sup> January 2014) Available at: <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=367&t=6> [Accessed 16<sup>th</sup> August. 2014].
- Dantzig, G. B., & Fulkerson, D. R., 1954. *Minimizing the number of carriers to meet a fixed schedule* (No. P-569). RAND CORP SANTA MONICA CALIF.
- Briskin, L. E., 1966. Selecting delivery dates in the tanker scheduling problem. *Management Science*, 12(6), B-224.
- Bellmore, M., Bennington, G., & Lubore, S., 1968. *A maximum utility solution to a vehicle constrained tanker scheduling problem* (No. MTP-319). MITRE CORP MCLEAN VA.
- Laderman, J., Gleiberman, L. & Egan, J. F., 1966. Vessel allocation by linear programming. *Naval Research Logistics Quarterly*, 13(3), 315-320.
- Whiton J. C., 1967, Some constraints on shipping in linear programming models, *Naval Research Logistics Quarterly*, 14, 257- 260.
- Appelgren, L. H., 1969. A column generation algorithm for a ship scheduling problem. *Transportation Science*, 3(1), 53-68.
- Appelgren, L. H., 1971. Integer programming methods for a vessel scheduling problem. *Transportation Science*, 5(1), 64-78.
- McKay, M. D., & Hartley, H. O., 1974. Computerized scheduling of seagoing tankers. *Naval Research Logistics Quarterly*, 21(2), 255-264.

Ronen, D., 1979. *Schedulling of vessels for shipment of bulk and semi-bulk comodities originating in single area*. The Ohio State University.

Kim, S. H., & Lee, K. K., 1997. An optimization-based decision support system for ship scheduling. *Computers & industrial engineering*, 33(3), 689-692.

Hwang, H. S., Visoldilokpun, S., & Rosenberger, J. M., 2008. A branch-and-price-and-cut method for ship scheduling with limited risk. *Transportation science*, 42(3), 336-351.

