

# 해양 석유 생산 및 수송 최적화 문제에 관한 연구

김창수\* · † 김시화

\* 한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 해사수송과학부 교수

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

Chang-Soo Kim\* · † Si-Hwa Kim

\* Graduate school, National Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

† Division of Maritime Transportation Science, National Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

**요 약** : 해양 석유 생산은 ‘해양’이라는 특성에 기인하는 여러 가지 변수를 동반하면서 막대한 비용과 시간을 필요로 한다. 모든 관련된 프로세스는 인명, 환경 그리고 재산의 손실을 줄이기 위한 치밀한 일련의 계획에 의하여 통제된다. 이 논문은 해양 석유 생산 및 수송의 최적화 문제를 다룬다. 문제 영역의 범위를 정의하기 위해 해양 석유 생산 및 수송 네트워크를 제시하고 그 문제를 해결하기 위한 혼합정수계획모형을 구축하였다. 제안된 최적화 모형의 타당성을 확인하기 위해 가상의 해양 유전과 수요 시장을 바탕으로 MS Office Excel의 해찾기를 이용하여 계산실험들을 수행하였다. 해양 석유 생산 및 수송 네트워크 하위 흐름은 해양 유전에서 생산된 원유를 수요 시장으로 배분하는 해사수송문제가 된다. 이 해사수송문제를 해결하기 위해 집합 패킹 모형을 이용하여 구축된 MoDiSS(Model-based DSS in Ship Scheduling)를 사용하였다. 이러한 연구결과들은 실제적인 해양 석유 생산 및 수송 최적화 문제에 의미 있게 적용될 수 있으리라 사료된다.

**핵심용어** : 해양 생산, 해양 유전, 해양플랜트, 유정비용, 최적화, 해사수송문제, 혼합 정수계획법, 집합 패킹문제

**Abstract** : The offshore oil production requires a huge amount of cost and time accompanied by multiple variables due to the peculiar nature of ‘offshore.’ And every process concerned is controlled by elaborate series of plans for reducing loss of lives, environment and property. This paper treats an optimization problem for offshore oil production and transportation. We present an offshore production and transportation network to define scope of the problem and construct a mixed integer linear programming model to tackle it. To demonstrate the validity of the optimization model presented, some computational experiments based on hypothetical offshore oil fields and demand markets are carried out by using MS Office Excel solver. The downstream of the offshore production and transportation network ends up with the maritime transportation problem distributing the crude oil produced from offshore fields to demand markets. We used MoDiSS(Model-based DSS in Ship Scheduling) which was built to resolve this maritime transportation problem. The paper concludes with the remark that the results of the study might be meaningfully applicable to the real world problems of offshore oil production and transportation.

**Key words** : Offshore production; Offshore field; Offshore plant; Well cost; Optimization; Maritime transportation problem; Mixed integer programing; Set Packing Problem

### 1. 서론

‘Offshore’라는 단어는 여러 의미를 가지고 있는데, 지정학적인 표현일 경우에는 말 그대로 ‘Onshore’의 반대 의미로써 ‘육안(shore)과 떨어진(off)’ 즉 ‘해양’이라는 의미를 담고 있다. 특히 ‘Offshore’가 석유 및 가스 산업과 관련하여 쓰일 때는 육안에서 떨어진 해양에서 이루어지는 모든 석유 및 가스 관련 산업을 통칭하는 의미로 쓰인다.

해양 석유 생산은 ‘해양’이라는 장소적 특성으로 인한 해양

기상, 해저환경, 해양플랜트의 기술적 요소, 해사수송 문제 이외에도 글로벌 에너지 수급에 영향을 미치는 정치 경제적 요인 등 여러 가지 변수에 의한 제약을 받는다. 또한 장기적으로 거대한 자본이 소요되는 산업이기에 자본력이 막강한 다국적 석유회사(International Oil Company, IOC)나 국영석유회사(National Oil Company, NOC)의 주도하에 진행된다.

해양 석유 생산은 크게 탐사(Exploration), 시추(Drilling), 그리고 생산(Production)이라는 3가지 절차를 거치는데, 추후 해양 유전의 석유 자원이 고갈된 후에는 해체(Decommissioning)

† 교신저자 : 종신회원, shalom@kmou.ac.kr 051)410-4237

\* 연회원, cskim1978@gmail.com

(주) 이 논문은 “시장 수요를 고려한 Offshore Production의 최적화 설계”란 제목으로 “2014년 한국해양학회 추계학술대회 논문집 (동명대학교, pp. 53-55)”에 연구의 일부가 발표되었음.

절차를 밟게 된다.

해양 석유 생산은 1970년대 말 들어 육상 석유 생산 대비 그 비중이 증가하였다. 또한 2000년대부터는 수심 4,000 feet 이상의 심해 석유 생산의 비중이 꾸준히 증가하여 2013년에는 9%에 달하였으며, 이미 2009년 무렵에 심해 시추가 천해 시추보다 늘어난 것으로 미루어 해양 석유 생산, 특히 심해 석유 생산이 증가하는 추세는 앞으로도 지속될 것으로 전망된다.

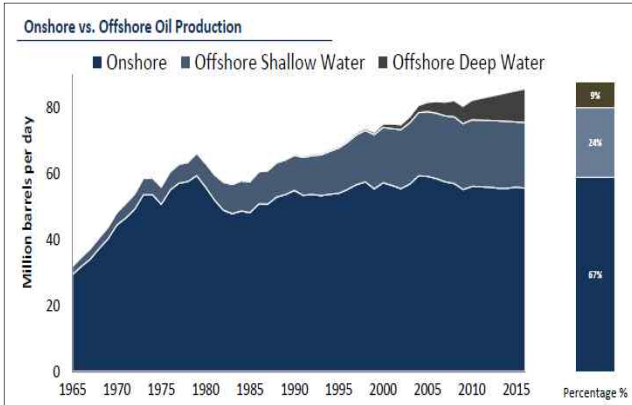


Fig. 1 Onshore vs. Offshore Oil Production (Infield system, 2013)

해양에서 생산된 석유를 수송하는 방법에는 해저 파이프라인을 통하여 수요지까지 보내는 방법과 FPSO(Floating production storage and offloading) 또는 SPM(Single Point Mooring)을 통해 탱커로 하역을 한 후 수요지까지 해상운송(Maritime transportation)을 하는 방법이 있다. 2014년 현재, 가장 긴 해저 파이프라인은 2012년 러시아의 바이보르그(Vyborg)와 독일의 그라이프즈발드(Greifswald)사이에 건설된 1,222 Km길이의 노르드 스트림(Nord Stream) 천연가스 파이프라인이다. 이 프로젝트에 88억 Euro가 들었음이 시사하듯이 해저 파이프라인 건설에는 많은 비용이 발생하고 운송 목적지의 선택이 지극히 제한적이기 때문에 해양에서 생산된 석유와 가스는 대부분 해상운송을 통하여 수송하고 있다.

본 논문은 가상의 해양 유전과 이에서 생산된 원유의 수요지들을 설정하여 다국적 석유회사 혹은 국영석유회사들이 직면하는 해양 석유 생산과 수송의 최적화 문제를 연구대상으로 한다.

## 2. 선행연구

해양 석유 생산의 최적화 문제는 해양 석유 생산 기술이 비교적 안정권에 들어선 1970년대의 유럽에서 처음 연구되기 시작하였다. 해양 유전의 탐사, 개발, 시추, 생산 등의 전반적인 과정에 있어 경영과학적 접근이 도입되었고 이는 차츰 다른 지역의 신규 해양 유전을 개발하는 데에 유용하게 사용될 수 있는 지침으로 활용되기 시작하였다. Bohannon(1970)은 유

전의 설계와 생산계획에 혼합정수선형계획의 사용을 제안하였고, Flare(1973)는 시간 배분에 따른 유정(well)의 배치와 생산시설의 운영일정의 최적화 모형을 발표하였다. 이후 Iyer et al.(1998)이 해양 시설의 계획, 투자, 운영에 관한 다기간(multi-period) 혼합정수선형계획 모형을 발표하였다. Ortiz-Gomez 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 et al.(2007)은 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. 이 논문은 Richard J. Barnes et al.(2007)이 제안한 최적화 모형과는 달리 예측된 시장의 수요를 만족시키면서 기업의 이익을 최대화하는 새로운 모형을 제안하고자 한다.

한편으로 해양에서의 수송문제는 화물의 선적지가 항만이 아닌 해양 유전이며 FPSO나 SPM를 통하여 화물을 선적한다는 일부 특성을 제외한다면, 서로 다른 선적지에서 화물을 선적하여 서로 다른 하역지로 수송한다는 점에서 전형적인 해상수송 문제라고 할 수 있으며, 이중에서도 화물의 특성상 유조선대의 운영 최적화 문제와 동일하다[Kim & Heo(1999)]. 이러한 해상수송 문제에 대하여 Appelgren(1969 and 1971)은 기존의 연구들과는 다르게 집합 분할(Set Partitioning) 또는 집합 패킹(Set Packing)모형으로 정식화하였는데, 선박이 운항 가능한 일정에 투입되는지의 여부를 0-1 정수변수로 정의하는 방식으로 문제를 해결하였다. 이를 계기로 이후의 부정기선 또는 화주 직접운항 형태의 선박 운항일정계획 최적화 모형은 거의 모두가 집합 분할 또는 집합 패킹모형의 형태를 취하고 있다(Lee & Kim, 1994). 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 구축하였다. 이 연구에서는 해양 유전에서 생산된 석유를 수요시장으로 수송하는 문제의 최적화를 위해 MoDiSS를 사용하고자 한다.

## 3. 문제의 개요 및 정식화

해양석유의 생산 및 수송 문제는 다국적 석유기업이 점유 시장의 수요를 만족시키면서 기업의 이익을 극대화하는 최적화 문제로 설명할 수 있다. 이 논문은 해양 유전에서 석유를 생산하고 이를 시장에 수송하는 문제를 Fig. 2와 같이 하나의 물류 네트워크로 표현하여 이 해양석유 생산 및 수송 네트워크를 최적화하고자 한다.

1) Global Offshore Prospects 2013, Douglas Westwood

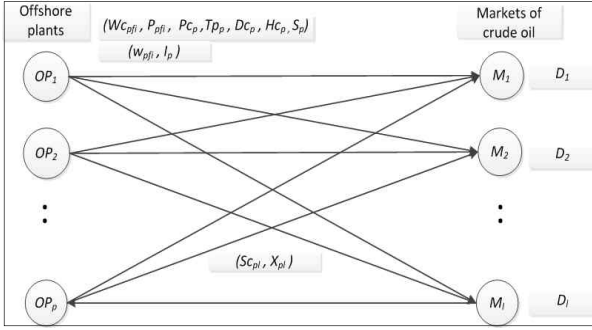


Fig. 2 Offshore production-transportation network

해양석유 생산 및 수송 네트워크를 최적화하는 문제는 다음과 같이 혼합정수계획모형으로 정식화할 수 있다.

[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)
- $Sp$  : 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 [MILP1]

$$Max Z = \sum_p \sum_l (Pc_p - Sc_{pl}) X_{pl} - \sum_p \sum_f \sum_i Wc_{pfi} w_{pfi} - \sum_p Hc_p I_p \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_f \sum_i P_{pfi} w_{pfi} \geq Tp_p \quad \text{for all } p \quad (2)$$

$$\sum_f \sum_i P_{pfi} w_{pfi} \leq Dc_p \quad \text{for all } p \quad (3)$$

$$\sum_p X_{pl} = D_l \quad \text{for all } l \quad (4)$$

$$I_p \leq Sp \quad \text{for all } p \quad (5)$$

$$\sum_f \sum_i P_{pfi} w_{pfi} - \sum_l X_{pl} - I_p = 0 \quad \text{for all } p \quad (6)$$

$$w_{pfi} \in \{0, 1\}, X_{pl}, I_p \geq 0, \quad \text{for all } p, f, i, p, l \quad (7)$$

모형 [MILP1]의 식 (1)은 생산된 해양석유의 판매수익에서 유정생산비용, 수송비용 및 재고비용을 감한 목적함수를 최대화한다는 것이다. 제약식 (2)는 해양플랜트에서 생산하는 해양석유의 양이 각 플랜트의 목표생산량 이상이어야 한다는 것이며, 제약식 (3)은 각 해양플랜트의 해양석유 생산량이 해당 플랜트의 설계용량을 초과할 수 없다는 것이다. 제약식 (4)는 해양플랜트의 해양석유 총 생산량이 수요 시장의 수요를 만족하여야 한다는 것이고, 제약식 (5)는 각 플랜트의 재고량이 그 플랜트의 저장용량을 초과할 수 없다는 것이며, 제약식 (6)은 각 해양플랜트의 해양석유 생산량에서 수요시장으로 수송하고 남은 것이 그 플랜트의 재고량이 된다는 균형제약식이다. 마지막으로 식 (7)은 이진변수 및 비음제약에 관한 식이다.

모형 [MILP1]의 최적해가 구해지면 각 해양플랜트에서 생산된 원유를 각 시장의 수요를 만족시키도록 수송하여야 한다. 이러한 하위 흐름의 해사수송문제를 해결하기 위하여 집합패킹모형을 기반으로 구축된 MoDiSS를 이용한다.

#### 4. 계산실험

계산실험은 크게 2가지로 나뉘는데, 하나는 MS Office Excel의 해찾기를 통한 모형 [MILP1]의 최적화이고 다른 하나는 MoDiSS 프로그램을 사용한 해사수송 문제의 최적화이다. 해양 석유 생산의 최적화문제는 시장의 수요가 많을 때와 적을 때의 두 가지 상황으로 나누어 실험하여 그 결과를 비교하고자 한다.

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 1과 같다.

Table 1 Hypothetical Offshore fields

Plant	Field	Field Capacity (1000 bbls)	Field Life (yrs)	Annual Production (1000 bbls)	Quarterly Production (1000 bbls)	# of Production well
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
Middle East	4	1,200,000	23	52,174	13,043	8
	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

##### 4.1 해양 석유 생산의 최적화

상기 해양 플랜트에서 생산된 원유의 수요지는 Europe, North America 그리고 Far East로 설정하였으며, 계산실험에 사용된 각 수요지의 수요량은 Table 2와 같다. 낮은 시장 수요는

해양 석유 생산 및 수송 최적화 문제에 관한 연구

높은 시장 수요의 75%로 설정하였다.

Table 2 Demand of local market (Unit: 1000 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 3과 같다. 낮은 시장 수요일 때는 목표 생산량을 높은 시장 수요의 85% 수준으로 설정하였다.

Table 3 target production of offshore plant (Unit: 1000 bbls)

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

Fig. 3은 높은 시장 수요일 경우의 해양 석유 생산의 최적해 결과이며, Fig. 4는 이때 각 생산 유정의 가동 여부를 나타낸다. 검은색 글씨가 가동(1)을 의미하며, 붉은 색 글씨는 미가동(0)을 의미한다.

높은 시장 수요일 경우에, 시장 수요를 충족시키기 위하여 West africa의 2개를 제외한 모든 생산 유정을 가동하였다. 원유의 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 원유가격에서 유정의 단위생산 비용과 수송비 그리고, 재고비용을 제외한 순수익은 4,893,911,988 US\$이다.

다음은 낮은 시장 수요일 경우의 계산실행 결과이다. Fig. 5는 낮은 시장 수요일 경우의 해양 석유 생산의 최적화 실행 결과이며, Fig. 6는 이때 각 생산 유정의 가동 여부를 나타낸다.

Fig. 3 Offshore production optimization (high market demand)

Fig. 4 Well selection(high market demand)

Fig. 5 Offshore production optimization (low market demand)

Fig. 6 Well selection(low market demand)

낮은 시장 수요일 경우에는 시장 수요가 감소하였기 때문에 생산량을 줄이기 위하여 West africa의 7개, Gulf of Mexico

의 5개 그리고, Middle East의 4개의 생산 유정의 가동이 중지되었다. 원유의 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. 생산-수송된 원유가격에서 유정의 단위생산 비용과 수송비 그리고, 재고비용을 제한 순수익은 3,417,600,415 US\$이다.

해양 석유 생산의 최적화 설계에는 다국적 석유기업의 시장 수요에 따른 시장점유율(market share) 상황을 고려한 시장 수요, 각 플랜트의 저유능력 및 재고비용 등이 매우 중요한 영향을 미친다고 볼 수 있다.

#### 4.2 해양 석유 수송의 최적화

본 절에서는 위의 두 실험결과들 중 낮은 시장 수요일 경우의 수송 문제를 다룬다. 다국적 석유기업을 자신의 화물을 보다 경제적, 안정적으로 적시에 수송하기 위한 목적으로 30척의 자사 소유의 280,000 ~ 300,000 DWT급 VLCC 선대를 보유한 화주 직접운항 선사(industrial carrier)로 가정하여 해양 플랜트에서 생산된 석유를 수요지까지 수송하는 문제를 주어진 선박, 화물, 항구간 거리에 대한 정보로 수익을 극대화 할 수 있는 최적의 선대 운항일정을 도출해주는 MoDiSS 프로그램을 사용하여 그 최적해를 구한다.

Table 4 Ship data

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 terminal	5678	M/T Titanium
3	280	114	1	LOOP	5678	M/T Tungsten
4	290	119	3	Bonny 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 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 terminal	5678	M/T Millennium
11	290	119	8	Qingdao	5678	M/T Vladivostok
12	290	119	1	Bonny 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 Touseon
30	300	124	4	Constanta	5678	M/T Power

MoDiSS 프로그램의 입력자료는 Table 4와 같은 자사 선대의 선박 자료, Table 5와 같은 수송 화물 자료, 그리고 각 선적항과 하역항간의 거리가 필요하다. Table 5와 같은 수송 화물 자료는 4.1절에서 낮은 시장 수요일 경우의 해양 석유 생산의 최적화 계산실험 결과를 바탕으로, 각 플랜트의 일일 생산량과 저유시설의 규모, 운항 가능한 탱커들의 수송화물 용적을 고려하여, 다국적 석유기업의 1분기(90일)간의 원유의 수송계획을 화물 60개로 나누어 수립한 것이다.

Table 5 Cargo data

ID	Size (1,000 MT)	Freight (1,000 US\$)	Load Date	Load Port	Disch Date	Disch. Port	Type
1	271	465	33	Bonny terminal	50	Rotterdam	5
2	235	465	52	Bonny terminal	69	Rotterdam	5
3	270	465	57	Bonny terminal	74	Rotterdam	5
4	278	465	67	Bonny terminal	84	Rotterdam	5
5	212	465	22	Bonny terminal	39	Rotterdam	5
6	218	465	40	Bonny terminal	57	Rotterdam	5
7	265	465	19	Bonny terminal	36	Rotterdam	5
8	265	562	55	Bonny terminal	75	Constanta	5
9	252	562	47	Bonny terminal	67	Constanta	5
10	271	653	45	Bonny terminal	69	Le Havre	5
- omitted -							
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 6은 loading port와 discharging port간의 거리와 소요 시간이다. 소요시간(Time)은 탱커가 11.0 Knot로 항해하였다고 가정하여 계산하였다.

Table 6 Distance table between loading and discharging ports

Loading port	Discharging port	Distance (NM)	Time (day)
Bonny terminal	Ningbo	10082	38.19
Dos Bocas terminal	Ningbo	9911	37.54
Zirku field	Ningbo	5766	21.84
Bonny terminal	Qingdao	10330	39.13
Dos Bocas terminal	Qingdao	9900	37.5
Zirku field	Qingdao	6014	22.78
Bonny terminal	Mailiao	9530	36.1
Dos Bocas terminal	Mailiao	10209	38.67
Zirku field	Mailiao	5225	19.79
- omitted -			
Zirku field	LOOP	9438	35.75
Bonny terminal	Rotterdam	4380	16.59
Dos Bocas terminal	Rotterdam	4937	18.7
Zirku field	Rotterdam	6352	24.06
Bonny terminal	Constanta	5296	20.06
Dos Bocas terminal	Constanta	6684	25.32
Zirku field	Constanta	4034	15.28
Bonny terminal	Le Havre	6156	23.32
Dos Bocas terminal	Le Havre	4752	18
Zirku field	Le Havre	6156	23.32
Bonny terminal	Wilhelmshaven	4580	17.35
Dos Bocas terminal	Wilhelmshaven	5074	19.22
Zirku field	Wilhelmshaven	6552	24.82

Fig. 7은 위의 선박, 화물, 거리 정보를 바탕으로 도출된 최적의 선대 운항일정을 나타내는 MoDiSS 프로그램 화면이다.

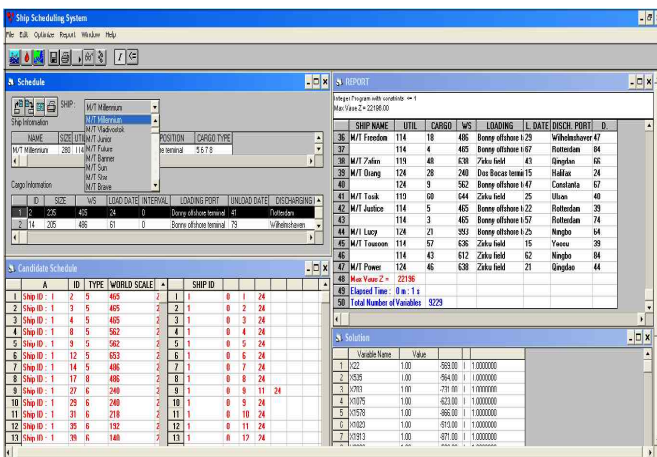


Fig. 7 MoDiSS showing optimal schedule using own tanker fleet

Table 7은 위의 실험을 통하여 도출된 선대 최적운항일정의 상세이다.

Table 7 Optimal schedule by using own tanker fleet

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 terminal	45	Le Havre	69
M/T Cobalt	20	119	Bonny terminal	27	Halifax	45
	29	119	Dos Bocas terminal	56	Halifax	65
M/T Victory	22	124	Bonny terminal	28	Qingdao	68
M/T Warden	47	119	Zirku field	27	Qingdao	50
M/T Valhalla	24	124	Bonny 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
M/T Vladivostok	49	114	Zirku field	69	Mailiao	89
M/T Vladivostok	45	119	Zirku field	48	Ningbo	70
M/T Junior	16	119	Bonny terminal	16	Wilhelmshaven	34
	2	119	Bonny terminal	52	Rotterdam	69
M/T Future	37	124	Dos Bocas terminal	25	New York	32
	17	124	Bonny 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 terminal	24	Wilhelmshaven	42
	14	114	Bonny terminal	61	Wilhelmshaven	79
M/T Brave	44	114	Zirku field	31	Ningbo	53
M/T Queen	7	124	Bonny terminal	19	Rotterdam	36
	8	124	Bonny terminal	55	Constanta	75
M/T Fortune	13	119	Bonny terminal	35	Le Havre	59
M/T Roses	36	124	Dos Bocas terminal	11	New York	19
	23	124	Bonny terminal	37	Yokohama	78
M/T Tiger	11	114	Bonny terminal	13	Le Havre	37
	12	114	Bonny terminal	64	Le Havre	88
M/T Todol	51	114	Zirku field	29	Sakai	53
M/T Freedom	18	114	Bonny terminal	29	Wilhelmshaven	47
	4	114	Bonny 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 terminal	47	Constanta	67
M/T Tosik	60	119	Zirku field	25	Ulsan	48
M/T Justice	5	114	Bonny terminal	22	Rotterdam	39
	3	114	Bonny terminal	57	Rotterdam	74
M/T Lucy	21	124	Bonny 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

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  
 Total transported cargo: 47 cargos, 11,388,000 MT

위의 결과에서 보듯이 자사 선단만으로는 30척이 모두 운항 일정에 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 8과 같이 선박의 크기와 초기위치(initial position) 등을 고려하여 용선시장(spot market)의 탱커를 추가로 입력하여 계산실험을 할 수 있다.

Table 8 Ship data (Chartered tanker fleet)

ID	Size (1,000 MT)	Open Date	Initial Position	Cargo Type	Name
31	280	25	Bonny terminal	5678	M/T Aquarius
32	245	24	Bonny terminal	5678	M/T Ariel
33	240	30	Dos Bocas terminal	5678	M/T Carina
34	290	31	Bonny terminal	5678	M/T Courageous
35	280	23	Dos Bocas terminal	5678	M/T Defender
36	290	41	Bonny 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

Table 9는 위의 실험을 통하여 도출된 선대 최적운항일정의 상세이다.

Table 9 Optimal schedule by using own tanker fleet and chartered fleet.

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
	124	7	Bonny terminal	19	Rotterdam	36
M/T Victory	124	59	Zirku field	61	Ulsan	84
	119	53	Zirku field	50	Yokohama	75
M/T Warden	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 terminal	47	Constanta	67
M/T Duke	114	37	Dos Bocas terminal	25	New York	32
	114	17	Bonny terminal	49	Wilhelmshaven	67
M/T Millennium	114	21	Bonny terminal	25	Ningbo	64
M/T Vladivostok	119	45	Zirku field	48	Ningbo	70
M/T Junior	119	11	Bonny terminal	13	Le Havre	37
M/T Future	124	5	Bonny terminal	22	Rotterdam	39
	124	12	Bonny 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 terminal	16	Wilhelmshaven	34
	124	8	Bonny terminal	55	Constanta	75
M/T Fortune	119	32	Dos Bocas terminal	23	Philadelphia	31
	119	2	Bonny 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 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 terminal	24	Wilhelmshaven	42
	114	14	Bonny terminal	61	Wilhelmshaven	79
M/T Lucy	124	1	Bonny terminal	33	Rotterdam	50
	124	4	Bonny terminal	67	Rotterdam	84
M/T Tousoon	114	52	Zirku field	13	Yokohama	38
M/T Power	124	20	Bonny terminal	27	Halifax	45
	124	29	Dos Bocas terminal	56	Halifax	65
M/T Aquarius	653	13	Bonny terminal	35	Le Havre	59
M/T Ariel	486	18	Bonny terminal	29	Wilhelmshaven	47
M/T Carina	999	23	Bonny terminal	37	Yokohama	78
M/T Courageous	995	24	Bonny terminal	31	Yeosu	71
M/T Defender	240	26	Dos Bocas terminal	31	Halifax	40
M/T Eclipse	456	19	Bonny terminal	43	New York	60
M/T Jupiter	653	10	Bonny terminal	45	Le Havre	69
M/T Leo	465	6	Bonny terminal	40	Rotterdam	57
M/T Mira	990	22	Bonny 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 선박으로 60개의 수송수요를 모두 만족시키는 최적 운항일정계획을 수립하였으며, 이는 제 4.1절에서 다룬 다국적 석유기업의 분기별 원유 생산계획에 이은 분기별 원유 수송계획이 된다.

단기 용선을 하여 운항하는 선박은 자사 선박에 비하여 기본적으로 더 많은 비용이 소요되며, 용선시장은 운임 변동의 영향을 받기 때문에 다국적 석유기업의 수송수요를 안정적으로 충족시키기 위한 자사 선단을 보유할 필요가 있다. 이러한 사항들을 고려하여 적정 규모의 자사선단을 보유하고 자사 선단만으로는 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.

## 5. 결 론

육상의 자원은 점점 고갈되어가고 있는데 비해 해양에서 생산하는 석유 및 가스는 2014년 현재 이미 전 세계 석유 및 가스 생산량의 1/3을 차지하고 있고, 탐사, 시추, 그리고 생산 기술의 지속적인 발전으로 보다 심해로 개발영역이 확장되고 있어 그 비중은 더욱 커질 전망이다. 하지만, 해양에서의 석유 및 가스 생산은 육상 생산보다 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 의사결정 모델의 수립이 필수이다.

본 논문에서 다룬 해양 석유 생산 문제는 혼합정수계획모형을 이용하면, 각 해양 플랜트의 석유 생산 가능량과 시장수요가 주어졌을 경우에 생산에 필요한 유형의 선박, 수요시장으로의 해사수송, 그리고 해양플랜트에서의 원유의 재고처리 문제에 대한 최적화된 의사결정이 가능하다. 또한 시장 수요가 많을 경우에는 생산량을 늘려 수요를 최대한 충족시켜 이윤을 극대화시키며, 수요가 적을 경우에는 생산량을 줄여 생산비용과 재고비용 등을 최소화하여 손실을 줄일 수 있는 합리적인 의사결정의 수립도 가능하다.

또한 다국적 석유기업이 보유하고 있는 화주직접 운항선대 (Industrial fleet)로 주어진 수송수요를 충족시킬 수 있을지 아니면, 추가로 용선시장에서 탱커들을 용선하여 투입하여야 할 것인지에 대한 의사결정도 지원할 수 있음을 알 수 있었다.

## References

[1] Appelgren, L. H.(1971), Integer programming methods for a vessel scheduling problem. *Transportation Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 64-78.

[2] Bohannon, J. M.(1970), "Alinear programming model for optimum development of multi-reservoir pipeline systems", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 22, pp. 1429 - 436.

[3] British Petroleum(BP)(2014), BP Statistical Review of World Energy June 2014.

[4] Douglas Westwood(2013), *Global offshore prospects, Infield systems*.

[5] Frair, L. C.(1973), *Economic optimisation of offshore oil field development*. Tulsa, OK: University of Oklahoma.

[6] 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*, Vol. 37, p. 1380.

[7] Kim, C. S, & Kim, S. H.(2014), "Optimal design of offshore production considering market demand", *proceeding of Korea Institute of Navigation and Port Research*, pp. 53-55.

[8] Kim, S. H. & Heo, K. Y.(1999), "Integrated Fleet Management Support System for Industrial Carrier", *Journal of Korea Institute of Navigation*, pp. 63-76.

[9] Kim, S. H., & Lee, K. K.(1997), "An optimization-based decision support system for ship scheduling. *Computers & industrial engineering*", Vol. 33, No. 3, pp. 689-692.

[10] Lee, K. K, & Kim, S. H.(1994), "A Study on the Optimization Analysis of Tactical Ship Scheduling", *Journal of Korea Institute of Navigation*, pp. 57-67.

[11] 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.

[12] Ortiz-Gomez, A., Rico-Ramirez, V., & Hernandez-Castro, S., 2002. Mixed integer multi-period model for the planning of oil field production. *Computers and Chemical Engineering*, 26, 703 - 14.

[13] 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.

[14] 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*, Vol. 39, No. 4, pp. 534 - 38

Received 21 July 2015

Revised 27 August 2015

Accepted 27 August 2015