



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](#)

경영학 석사 학위논문

불확실성하의 해양석유생산 최적화를 위한  
추계적 모형

A Stochastic Model for Optimizing Offshore Oil Production  
under Risk

지도교수 김 시 화

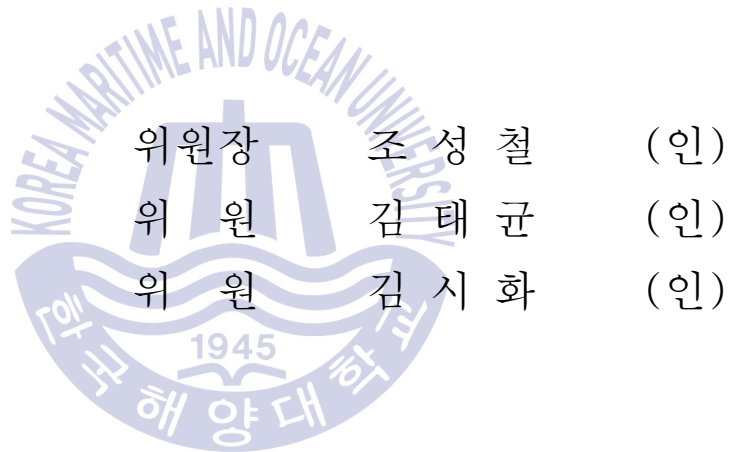
2017년 2월

한국해양대학교 대학원

해운경영학부

구 지 혜

본 논문을 구지혜의 경영학석사 학위논문으로 인준함.



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	v

## 1. 서론

1.1 해양플랜트 산업의 현황 .....	1
1.2 연구의 대상과 방법 .....	7

## 2. 선행연구

2.1 추계적 계획법 연구 .....	8
2.2 해양 석유 생산의 최적화 .....	9
2.3 2단계 추계적 계획법 모형 .....	10
2.4 강인한 최적화 모형구조 .....	11
2.5 리코스 제한 모형구조 .....	11
2.6 변동측정법 .....	12

## 3. 문제의 개요 및 정식화

3.1 문제의 개요 .....	14
3.2 문제의 정식화 .....	15
3.3 확정적 모형 .....	18
3.4 추계적 의사결정모형 .....	19
3.5 하위부분평균 강인한 최적화모형 .....	20
3.6 하위부분평균 리코스 제한 최적화모형 .....	21

<b>4. 계산실험</b>	
4.1 계산실험 준비 .....	23
4.2 계산실험 및 결과 .....	24
4.2.1 확정적 모형 선형계획법 .....	24
4.2.2 추계적 모형 .....	32
4.2.3 완전정보의 기대가치 .....	35
4.2.4 확률적 변동을 고려하지 않은 평균값 .....	36
4.2.5 추계적 해의 가치완전정보의 기대가치 .....	38
4.2.6 하위부분평균 강인한 최적화 모형 .....	39
4.2.7 하위부분평균 리코스 제한 최적화 모형 .....	41
<b>5. 결론</b>	
5.1 결론 .....	45
5.2 향후 과제 .....	47
<b>참고문헌</b> .....	48



## List of Tables

Table 1 Changes of offshore drilling rig counts .....	3
Table 2 Outline of Simulated Offshore fields .....	16
Table 3 Crude oil price and Demand Scenarios .....	16
Table 4 Optimal Solution Based on boom market .....	26
Table 5 Optimal Solution Based on good market .....	28
Table 6 Optimal Solution Based on fair market .....	30
Table 7 Optimal Solution Based on poor market .....	32
Table 8 Optimal Solution Based on the Stochastic Model .....	34
Table 9 Expected Profit based on Expected Production .....	36
Table 10 Robust Optimization with Lower partial mean .....	40
Table 11 Restricted Recourse with Lower partial mean .....	42



## List of Figures

Fig. 1 Key Manufactures Subsea Backlog .....	1
Fig. 2 Unexploded offshore mining area E&P cost .....	3
Fig. 3 Rig Utilization Rate .....	4
Fig. 4 Type of Rig Images .....	5
Fig. 5 Crude Oil Price and World Rig Count .....	5
Fig. 6 Fluctuation of Crude Oil Price .....	6
Fig. 7 Elements of affecting Oil Price change .....	7
Fig. 8 Offshore production-transportation network .....	14
Fig. 9 Field selection(boom market demand) .....	25
Fig. 10 Well selection(boom market demand) .....	25
Fig. 11 Microsoft office excel solver solution report(boom market) .....	25
Fig. 12 Field selection(good market demand) .....	27
Fig. 13 Well selection (good market demand) .....	27
Fig. 14 Microsoft office excel solver solution report(good market) .....	27
Fig. 15 Field selection(fair market demand) .....	29
Fig. 16 Well selection (fair market demand) .....	29
Fig. 17 Microsoft office excel solver solution report (fair market) .....	29
Fig. 18 Field selection(poor market demand) .....	31
Fig. 19 Well selection (poor market demand) .....	31
Fig. 20 Microsoft office excel solver solution report (poor market) .....	31
Fig. 21 Field selection(stochastic model based on scenarios) .....	33
Fig. 22 Well selection (stochastic model based on scenarios) .....	33
Fig. 23 Microsoft office excel solver solution report (stochastic model) .....	33
Fig. 24 Field selection( RO-LPM) .....	39
Fig. 25 Well selection (RO-LPM) .....	39
Fig. 26 Microsoft office excel solver solution report (RO-LPM) .....	39
Fig. 27 Field selection( RR-LPM) .....	42
Fig. 28 Well selection (RR-LPM) .....	42

# A Stochastic Model for Optimizing Offshore Oil Production under Uncertainty

Jihye, Ku

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

## Abstract

Offshore oil production lies in facing difficulties caused by oil price decline and unexpected changes in global petroleum logistics. This paper suggests a stochastic model for optimizing the offshore oil production under uncertainty. The proposed model incorporates robust optimization and restricted recourse framework and uses the lower partial mean as measure of variability of the recourse profit. Some computational experiments and results using scenario-based data on the crude oil price and demand under uncertainty are presented. This study would be meaningful for the decision making in offshore oil production considering risks under uncertainty.

**KEY WORDS:** Robust optimization; Stochastic programming; Offshore production; Offshore plant; Logistic problem; 해양플랜트; 최적화; 생산



# 제 1장 서론

## 1.1 해양플랜트 산업의 현황

오늘날 원유과잉공급으로 국제유가는 2014년 하반기 급락하면서 큰 변동성을 보여 왔다. 올해 2월 유가가 최저점(WTI 26.21달러/배럴, Brent유 27.88달러/배럴)에 내려간 후에도 여러 가지 불확실한 변수들로 인해 큰 변동 폭을 유지할 것으로 보인다. 이는 2010년부터 유가가 고공행진을 하면서 메이저 이외의 중소형 E&P (exploration and production) 업체들도 투기적 성격으로 해양플랜트 광구개발에 뛰어들면서 수급 불균형을 초래하였다. 극심해 시추선의 경우 10군데 이하의 회사에서 시추선 계약을 하고 있었으나 2010년 이후에는 이 숫자가 25~30 곳으로 늘어난 것으로 보고되고 있다.

2015년 국제 원유시장은 저유가에도 불구하고 미국의 셰일오일 등 비 OPEC 생산이 예상보다 높은 증가세를 유지하고 OPEC의 시장점유율 방어를 위한 생산 확대로 2014년에 이어 공급 과잉 상황이 지속되고 있다. OECD 총 석유재고는 2015년 11월 기준 2,981.9백만 배럴로 전년 동월보다 246.5백만 배럴(9.0%) 증가하였다.

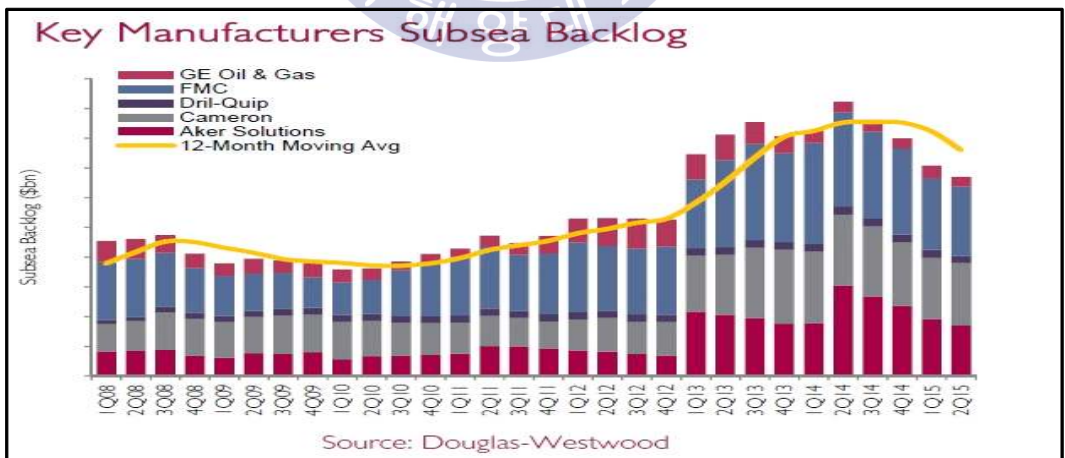


Fig.1 Key Manufactures Subsea Backlog (Source : Douglas-Westwood)

이런 극심한 수급 불균형으로 해양플랜트 서비스 부분에서는 수요층이 얇아지고 신규계약이 줄어들거나 기존 계약이 취소되면서 계약물량(order backlog)이 급감하고 있다.

Subsea 업계의 실적발표 자료에 따르면, 해당업계의 평균 계약물량이 2014년 대비 40% 줄어들었다고 보고되고 있다. 해양 시추 업계의 상황도 비슷해서 극심해 시추선의 경우 계약물량이 2009년 대비 60% 줄었다고 알려졌다. 해양 시추 업체들은 최근까지 용선료가 60~70% 하락하였으며, 설계, 서브씨(subsea), 해양탐사, 시추 및 유정서비스(drilling and well service)분야 등에서도 15~20%의 단가 하락이 이루어지고 있다.

해양 E&P의 프로젝트 발주량은 1998년 이후 최저치를 기록했다. 올해 안에 투입될 개발 투자 비용은 총 430억 달러로 추정되는데 이는 지난 2011년부터 2014년까지 투입된 투자액의 평균치보다 75% 이상 감소하였다. Chevron사의 Rosebank 프로젝트와 BP사의 Mad Dog phase 2 프로젝트 모두 각 운영사에서 추가 개발 비용을 충당하지 못한 이유로 보류되었다. Petrobras사는 2016년 개발비용을 줄일 뿐 아니라 5년 투자계획을 25%까지 대폭 줄였다. Murphy Oil사의 개발 투자 비용은 26억 달러에서 5억8천만 달러로 77% 하락하였다. 이외에도 비용 삭감을 목적으로 광구개발 가능성을 재평가(reassessment)하거나 인원 감축을 위한 구조조정 과정을 거치는 추세이다. 프로젝트를 보류시키고 광구에 대한 재평가가 이루어지는 와중에도 유가가 배럴당 50달러의 마지노선 아래로 하락했다. 결과적으로 프로젝트 투자는 더욱 감소했고 서비스 기업의 가격 결정권은 약해졌으며 OSV(offshore supply vessel) 임대료가 인하하는 악순환의 고리가 시작되었다.

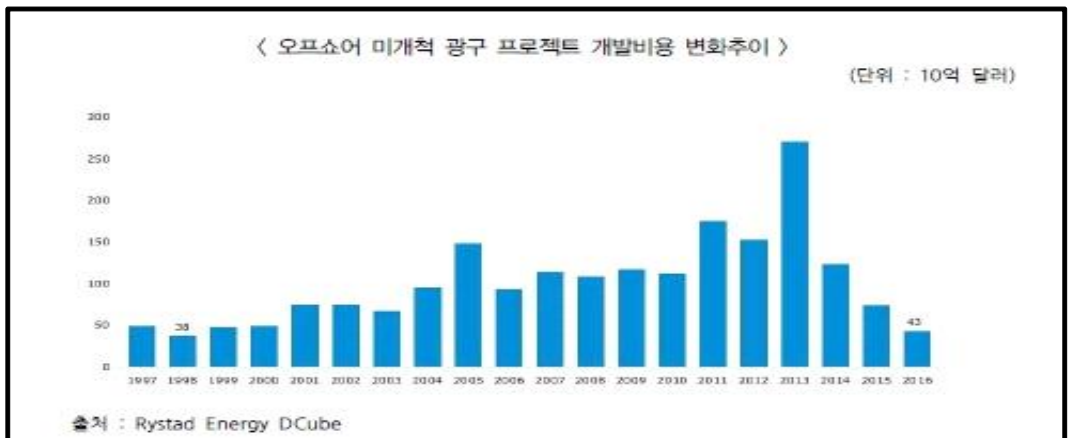


Fig.2 Unexploded offshore mining area E&P cost (Source : Rystad Energy DCube)

또한 금년 석유 및 가스 산업 실직률이 전 산업 대비 43% 이상을 차지하였다. Graves & Co.에 따르면 올해 초까지 총 35만 1,410명이 직장을 잃었으며 유전 서비스 영역에서 가장 많은 실직자가 발생하였다. 저유가 상황에서 비용절감에 대한 자극이 석유 및 가스의 탐사, 개발 및 생산영역에 있는 노동자들에게 상당한 영향을 끼쳤다. 지난 3월과 4월에 북미 회사 18개가 파산보호를 신청하였고 이 추세는 현재까지 지속되고 있다. 2012~2014년 동안 공격적인 인수합병을 진행하며 약 105억 달러의 자산을 매입했던 Linn Energy가 5월 11에 파산신청을 하였다. 뿐만 아니라 현지 시추업체 Newfield Exploration은 비용절감을 위해 미국 인력의 15%를 재배치할 계획이다.

Table 1 Changes of offshore drilling rig counts

Area	Last Count	Count	Change from Prior Count	Date of Prior Count	Change from Last Year	Date of Last Year's Count
U.S.	15 April 2016	440	-3	8 April 2016	-514	17 April 2015
Canada	15 April 2016	40	-1	8 April 2016	-40	17 April 2015
International	March 2016	985	-33	February 2016	-266	March 2015

(Source : Baker Hughes (BHI))

Baker Hughes에 따르면, 미국의 해양시추리그시장(offshore drilling rig industry)에서 2016년 8월 15일 리그(rig)수는 440척으로 지난달보다 3척이 작년 8월달보다는 514척이 줄어들었다. 리그수의 감소는 유가의 하락으로 해양 E&P의 개발 투자비용을 삭감했기 때문이다. 해양시추리그에 대한 수요의 감소로 리그 수의 상당한 증가를 기대하기는 어렵다. 리그 회사인 Ensco, Seadrill, Seadrill Partners, Noble Corporation, Transocean, Atwood Oceanics, Diamond Offshore, Rowan Companies, Pacific Drillers and Ocean Rig사들의 리그수가 가까운 미래에 회복이 되지 않을 것이라 예상한다.

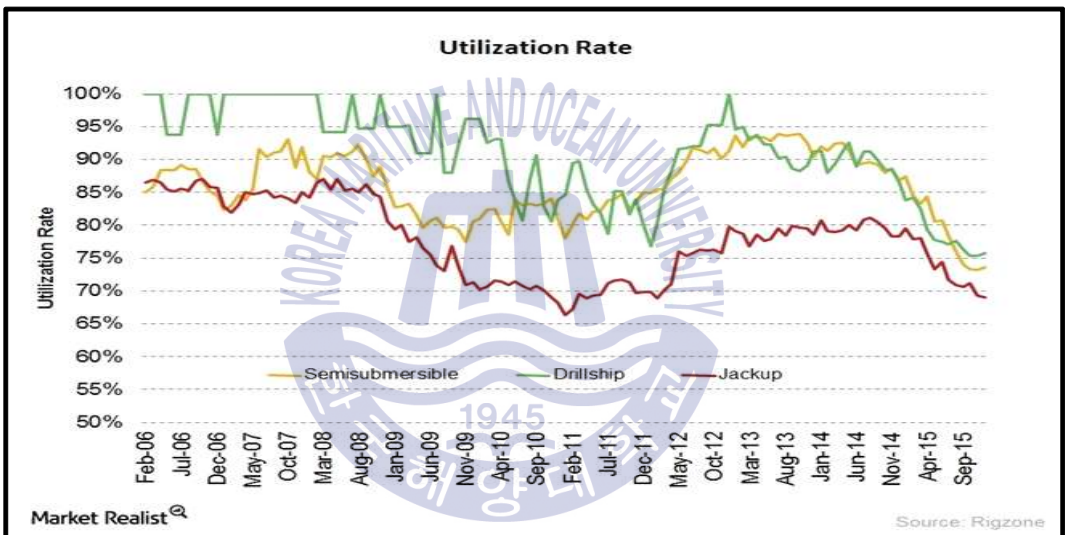


Fig.3 Rig Utilization Rate (Source : RigZone)

과거 리그 가동률과 비교했을 때 최근 리그의 가동률은 급격히 하락하고 있다. 가동률은 해양시추리그시장에서 수요와 활동사이를 측정할 수 있는 중요한 지표이다. 이는 이용 가능한 리그 수 들 중에서 운영되고 있는 리그 수의 비율을 나타낸다. 총 이용 가능한 리그 수에는 cold-stacked rig도 포함한다. 높은 가동률은 리그에 대한 수요와 공급 사이에 작은 차이가 있고 높은 운임(day rate)을 받지만, 낮은 가동률은

리그에 대한 수요와 공급 사이에 큰 차이가 있어 낮은 운임(day rate)을 받는다. 드릴쉽(drillship) 가동률은 2016년 2월 73.3%로 1월 73.9%, 2015년 12월 76%와 비교하여 하락하였다. 2015년 2월 가동률이 85.7%인 것을 감안하면 상당히 낮은 수준으로 가동률이 감소했다. 반잠수식 시추설비(semisubmersible)는 2016년 2월 가동률이 68%로 1월 70%, 2015년 12월 73%와 비교하여 하락하였고, 2015년 2월 가동률이 85%으로 2016년 2월 가동률이 17% 하락하였다.

부유식 시추장비들과 마찬가지로 잭업(jack-up)리그도 낮은 가동률로 시달리고 있다. 2016년 2월 가동률이 60.7%로 1월 62.5%, 2015년 12월 67.8%와 비교하여 감소하였다.



Fig.4 Type of Rig Images (Source : Sea drill)

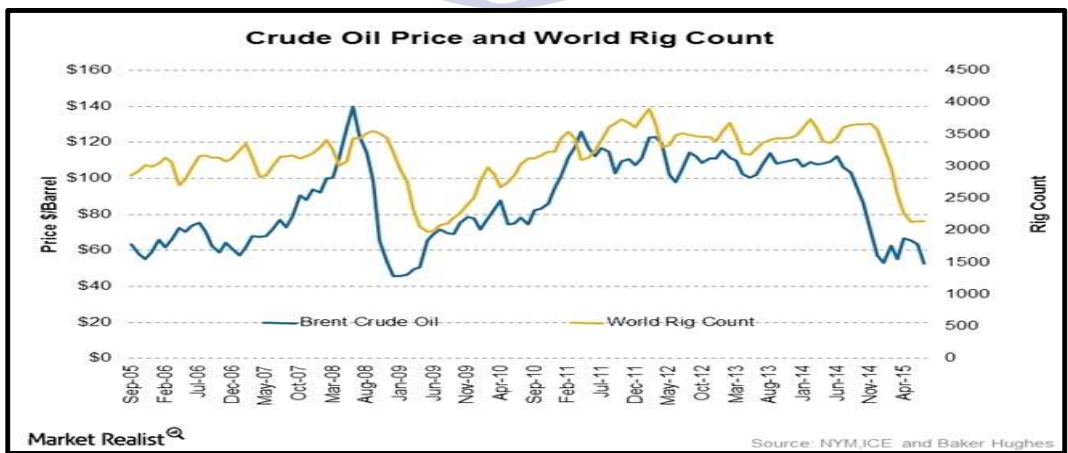


Fig.5 Crude Oil Price and World Rig Count (Source : NYMICE and Baker Hughes)



한국 조선소 또한 E&P업계의 자본지출 감소의 충격으로 기존에 수주가 예상되었던 많은 프로젝트들이 연기 또는 중단되고 있다. 이에 대우조선과 삼성중공업 사측도 일감감소로 해양플랜트 비중을 점차 줄여가면서 근로자 재배치 등에 나서고 있다. 고유가 시절 생산능력을 급격히 확대하여 왔기 때문에 그 충격이 더 크게 느껴지고 있다.

세계 해양플랜트 산업에 불확실성을 확대시킨 영국 브렉시트(Brexit)로 금융, 환율은 물론 유가도 출렁이고 있다. 브렌트유(Brent)는 전일 대비 5.2% 급락해 48.2달러를 기록했고, 서부텍사스유(WTI)와 두바이유도 일제히 하락세를 보였다. 영국계 오일메이저인 BP와 Shell의 주가도 하루만에 각각 6.2%, 4.9% 하락하였다. 영국이 유럽과 분리될 경우 석유가스 산업 분야의 인력, 자본, 설비 이동에 장벽이 생김으로 인해 중장기적으로 비용이 상승할 것으로 전망된다. 결국 유가 하락과 비용 상승에 따른 수익성 악화가 예견된다.

이러한 유가의 예측할 수 없는 불확실성 하로 인해 고성장을 하고 있던 해양플랜트 산업은 어려움에 직면하고 있다.

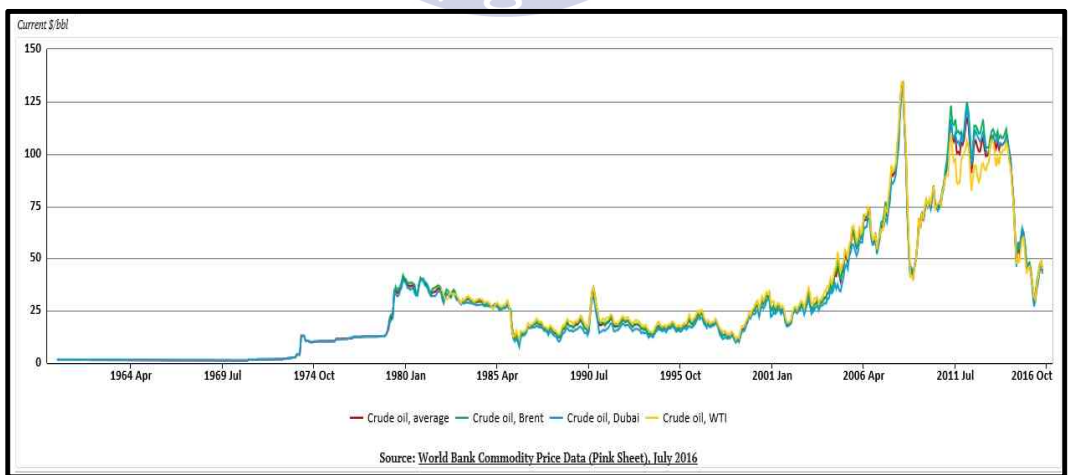


Fig.6 Fluctuation of Crude Oil Price (Source : World bank Commodity Price)

## 1.2 연구의 대상과 방법

본 연구에서는 불확실한 유가와 수요상황을 고려하여 해양석유생산 최적화를 위한 추계적 모형을 설계하였다. 불확실한 유가와 수요는 해양 유전(field)의 탐사 및 시추작업에 영향을 미쳐 결과적으로 해양석유 생산에도 영향을 준다. 새로운 유전을 개발하여 가동을 시키기까지 수년이 걸리고, 유전의 수명이 수십 년인 것을 감안할 때 미래시장상황을 주의 깊게 분석할 필요가 있다. 갑자기 급등한 유가로는 새로운 유전을 개발하고 시추하여 석유를 생산하기에 충분한 조건이 되지 못한다. 해양플랜트 시장은 현금 유동성(cash flow)이 매우 크고 시장에 영향을 미치는 변수가 많아 현 시점에서의 시장예측은 완전한 정보를 가질 수 없어 불확실하며 현실에서 이러한 변수를 고려하여 유가와 수요를 예측하기란 불가능에 가깝다.

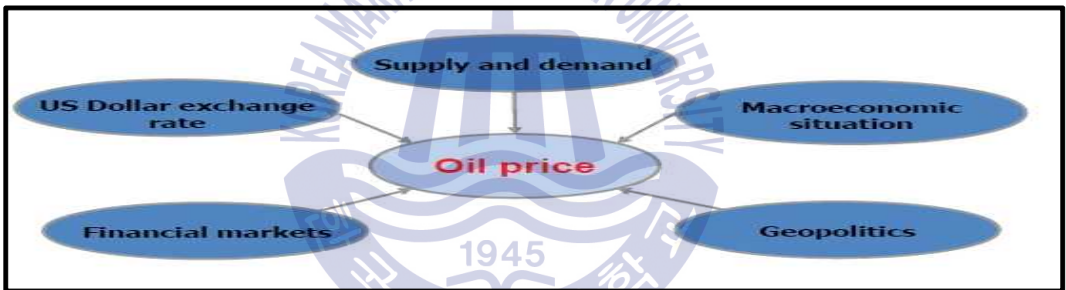


Fig.7 Elements of affecting Oil Price change

따라서 해양플랜트 산업은 유가와 수요변화에 대한 대응이 필요하며 이를 고려한 해양석유생산 최적화가 중요하다. 본 연구의 목적은 유가와 수요에 관한 시나리오 기반의 데이터를 사용하여 유가와 수요가 불확실한 상황에서 해양석유생산의 최적화를 통해 공급사슬의 비용과 위험을 최소화하면서 이익을 최대화 할 수 있는 추계적 모형 설계를 목표로 한다.

제시된 추계적 모형은 강인한 최적화 모형과 리코스 제한 최적화 모형을 사용하고 리코스 이익의 변동 척도로 하위부분평균을 사용한다.

## 제 2장 선행연구

### 2.1 추계적 계획법 연구

오래전부터 설계 및 운영과정에 대한 불확실성 모형화의 필요성은 오랫동안 필수적인 것으로 인식되어 왔으며 이와 관련된 많은 연구들이 이루어졌다. 추계적 선형계획법은 1950년대부터 Dantzig(1955)와 Beale(1955)에 의해 연구되기 시작하였다. 추계적 계획법이 40년이 넘게 연구되어 왔지만 전통적인 추계적 계획 모형들은 위험회피(risk aversion)와 의사결정자의 선호도를 직접적으로 다루지 못하였기 때문에 제한적으로 사용되었다. 이는 결과적으로 많은 중요한 영역에서 제외되는 결과를 초래하였다.

Mulvey et al.(1995)은 향상된 추계적 계획법인 강인한 최적화 모형구조를 소개하였으며, 이는 리코스 비용의 기대치와 변동간의 절충을 가늠하기 위한 목표계획모형 접근법이다. 목적함수에 가중치를 곱한 변동의 기여를 고려한 방법으로 가중치를 변화시킴으로써, 목적함수에 들어 있는 2단계 비용의 기대치와 변동의 상대적인 중요도를 통제하여 해집합에서의 유효한 경계(efficient frontier)를 구할 수 있다.

Vladimirou 및 Zenios(1997)에 의해 모형이 강인성을 갖기 위한 리코스 제한 접근법이 소개되었다. 2단계 변수에 관한 한계를 조정함으로써 2단계 해의 변동을 감소시킨다는 점에서 강인한 최적화 모형과 다르다. 리코스 변수들의 한계를 제한함으로써 얻은 해가 반드시 최적해는 아니지만 최적해의 비용보다는 더 적은 비용변동을 갖는 일련의 가능해를 생성할 수 있다.



Sahinidis(1998)에 의해 리코스 비용의 변동의 척도로 상위부분평균(upper partial mean)이 제안되었다. 강인한 최적화 모형구조 및 리코스 제한 모형구조 둘 다 모형이 리코스 강인성을 갖게 하는 정식화에서 가장 중요한 문제는 변동의 측정법 선택이다. 대부분이 분산을 선택하지만 기대 리코스 비용 초과 및 미달에 대하여 똑같이 벌점을 부과하는 대칭성 위험척도이며 정식화에 비선형의 포함을 초래한다. 여기서는 기대비용을 초과하는 경우에만 벌점을 부과하는 비대칭 위험척도를 사용하여 설득력을 얻었다.

## 2.2 해양 석유 생산의 최적화

Richard J. Barnes & Antonis Kokossis(2007)는 해양유전이 개발되어 운용되는 동안의 전체기간 중 well centre를 정하고 최적화된 시추 및 생산계획을 세워 최소한의 비용을 유지하기 위한 모형을 설계하였다. 동년에는 Richard J. Barnes et al.이 main field와 인접한 satellite field로 이루어진 offshore oil field에서의 시추와 생산계획 최적화 설계를 연구하였는데, 해양유전의 개별 유정(well)을 선택하는 문제에는 이진변수(binary variable)를 사용하고, satellite field의 개발계획에 영향을 주는 main field의 최적 생산능력의 결정에는 혼합정수선형계획 모델을 사용하였다. 또한 혼합정수비선형계획모형을 적용하여 해양유전에서의 최적 운용문제를 사용하였는데, 이는 각 pipe line과 well에서의 압력 감소 시 multiphase flow를 적용하고 well의 수명, 생산성 그리고 유지보수에 따른 비용문제를 적용하기 위해 비선형방정식을 사용하였다.

Ribas et al.(2010)은 통합된 석유공급사슬에서 석유 생산량, 정제품에 대한 수요 그리고 시장가격이 불확실할 때 전략적 계획모형을 설계하였다. 3가지 모형인 2단계 추계적 계획법 모형, robust minmax regret 모형, 그리고 maxmin 모형을 제안하여 3가지 값을 비교하였다.

김창수(2015)은 해양플랜트에서 혼합정수계획모형을 이용하여 해양 석유 생산 및 수송 최적화 문제를 연구하였다. 석유 생산 가능 량과 시장 수요가 주어졌을 경우에 생산에 필요한 유정의 선택, 수송 목적지의 선정과 수송량 그리고, 수송하고 남은 석유의 재고처리 문제에 대한 최적화된 의사결정을 가능하게 하였다. 이를 수요지까지 수송하는 문제는 그래프이론으로 운항가능일정 알고리즘을 구현할 후 선형 0-1 정수계획 모형인 [SPK 모형]으로 최적화된 운항일정을 도출해냈다.

### 2.3 2단계 추계적 계획법(Two-Stage Stochastic Programming) 모형

불확실성하의 설계 또는 운영 문제의 의사결정변수들은 1단계 변수 및 2단계 변수의 두 종류 집합으로 나뉜다. 1단계 변수들은 설계변수(Design Variables)로 불확실한 파라메타들이 현실화되기 전에 결정되어야 할 변수들이다. 설계변수들의 값이 결정되고 확률적인 결과들이 현실로 드러나면, 2단계 변수인 제어 또는 운영변수(Control or Operating Variables)의 값을 어느 정도의 비용으로 선택한다.

불확실성을 모형화하기 위하여 유한한 개수의 시나리오  $\{1,2,\dots,K\}$ 를 가정하면, 제약식의 우변 항에 불확실성을 갖는 표준 2단계 추계적 선형계획법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= c^T x + \sum_{k=1}^K p^k f^k y^k \\ \text{s.t. } \quad & Ax \leq b \\ & Tx + Dy^k = \omega^k \quad \forall k \\ & x \geq 0, \quad y^k \geq 0 \quad \forall k \end{aligned}$$

$x$ 는 1단계 변수들이고  $y^k$ 는 시나리오  $k$ 에 대응되는 2단계 리코스 변수들이다. 시나리오  $k$ 하에서 불확실한 파라메타의 예상치와 그 발생확률은 각각  $w^k$  및  $p^k$ 로 나타낸다.

## 2.4 강인한 최적화 모형구조(Robust Optimization Framework)

2단계 추계적 계획법은 2단계 리코스 이익의 기대치만 고려하고 이익들의 변동에 관한 제약이 전혀 없다. Mulvey 등(1995)에 의해 소개된 강인한 최적화 모형구조는 리코스 이익의 기대치와 변동간의 절충을 가능하기 위한 목표계획모형 접근법이다.  $v(y^1, y^2, \dots, y^K)$ 를 리코스 이익의 변동의 척도라고 하여 가중치  $\rho$ 를 곱한 변동의 기여를 고려한 강인한 최적화 모형구조는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & Z = c^T x + \sum_{k=1}^K p^k f^T y^k + \rho v(y^1, y^2, \dots, y^K) \\ \text{s.t.} \quad & AX \leq b \\ & Tx + Dy^k = \omega^k \quad \forall k \\ & X \geq 0, y^k \geq 0 \quad \forall k \end{aligned}$$

단,  $\rho$ 는 목표계획모형 가중치이다.

가중치  $\rho$ 를 변화시킴으로써, 목적함수에 들어있는 2단계 이익의 기대치와 변동의 상대적인 중요도를 통제하여 해집합에서 유효한 경계 (efficient frontier)를 구할 수 있다.

## 2.5 리코스 제한 모형구조(Restricted Recourse Framework)

모형이 강인성을 갖게 하기 위한 리코스 제한 접근법은 Vladimirov 및 Zenios(1996)에 의해 소개되었다. 2단계 변수에 관한 한계(bound)를 조정함으로써 2단계 해의 변동을 감소시킨다는 점에서 강인한 최적화 모형과 다르다.

Vladimirou 및 Zenios(1996)의 원래의 정식화는 기대 해로부터 2단계 해 벡터의 평균 유클리드 편차에 관한 제약식을 포함시킨 모형이었다. 이렇게 함으로써 2단계 해의 산포도는 미리 정해진 수준으로 제한된다. 해 벡터의 산포도를 제한하는 대신에 확률적인 리코스 이익의 산포도를 제한하는 접근법도 또한 고려할 수 있다. 추계적 리코스 제한모형은 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\text{Max} \quad Z = c^T x + \sum_{k=1}^K p^k f^T y^k$$

$$\text{s.t.} \quad AX \leq b$$

$$Tx + Dy^k = \omega^k \quad \forall k$$

$$v(y^1, y^2, \dots, y^K) = \epsilon$$

$$X \geq 0, y^k \geq 0 \quad \forall k$$

단,  $\epsilon$ 은 2단계 이익의 변동에 대한 미리 정해진 허용수준이다.

리코스 변수들의 한계를 제한함으로써 얻는 해가 반드시 리코스 제한 모형구조의 최적해는 아니다. 2단계 추계적 계획법에서의 최적해의 이익 변동보다는 더 적은 이익변동을 갖는 일련의 가능해를 생성한다.

## 2.6 변동 측정법(Variability Metric)

강인한 최적화 모형구조 및 리코스 제한 모형구조 둘 다 모형이 리코스 강인성을 갖게 하는 정식화에서 가장 중요한 문제는 변동  $v(y^1, y^2, \dots, y^k)$ 의 측정법의 선택이다. 분산은 기대 리코스 이익 초과 및 미달에 대하여 똑같이 별점을 부과하는 대칭성 위험의 척도이고, 정식화에서 비선형성의 포함을 초래한다.

이 논문에서 리코스 이익의 변동의 척도로 하위부분평균(Lower partial mean)을 사용한다. 리코스 이익의 하위부분평균(LPM)  $\overline{\Delta}$  는 다음과 같이 정의한다.

$$\overline{\Delta}(y^1, y^2, \dots, y^K) = \sum_{k=1}^K p^k \Delta^k(y^1, y^2, \dots, y^K)$$

여기서,

$$\Delta^k(y^1, y^2, \dots, y^K) = \max\{0, \sum_{k=1}^K p^k f^T y^k - f^T y^k\}$$

와 같다.

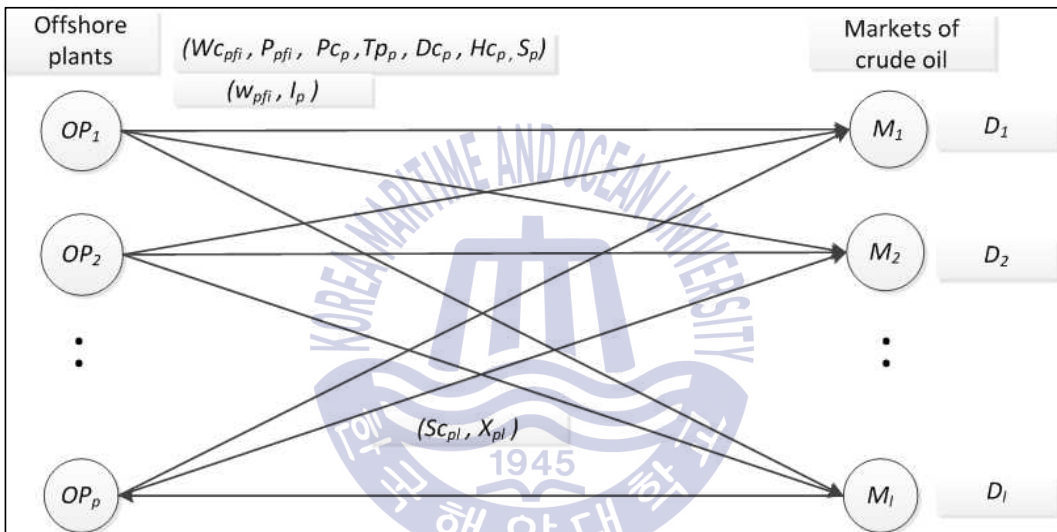
시나리오  $k$ 에 대하여,  $\Delta^k$ 는 기대 리코스 이익으로부터의 시나리오 이익의 음의 편차이다.  $\overline{\Delta}$ 는 모든 시나리오에 걸친 음의 편차의 기대치로 정의된다. 이 지표는 단지 기대치보다 더 낮은 이익만 측정하기 때문에 명백하게 비대칭이다.

이 논문에서는 위의 모형들을 기본으로 하여 하위부분평균의 강인한 최적화 모형구조와 리코스 제한 모형구조 개념을 적용하여 불확실한 유가와 수요상황을 고려한 해양석유생산 최적화를 위한 추계적 모형을 도출하려고 한다.

## 제 3장 문제의 개요 및 정식화

### 3.1 문제의 개요

해양 석유 유전에서 석유를 생산하고 수송하는 문제는 다국적 석유기업의 중요한 로지스틱(logistic) 문제이다. 이 논문에서는 해양 석유 유전에서 석유를 생산할 때, 시장수요, 유가 그리고 경제적인 상황들의 불확실성을 고려하여 유정(well)의 선택문제와 시장수요를 맞추기 위해 수송되어야 할 석유의 양에 대한 최적화 모형에 관한 연구이다. 생산-수송에 관한 네트워크는 다음과 같이 나타낼 수 있다.



**Fig.8 Offshore production-transportation network (Source : 김창수(2015))**

해양 플랜트(offshore plant)의 구성은 지역의 수심, 석유의 매장량, 사용되는 기술 기후, 환경적 요인 등에 따라 저마다 다르지만 본 논문에서는 일반적인 해양플랜트의 형태를 모델로 삼았다. 각 해양플랜트는 다수의 해양 유전(offshore field)으로 이루어져 있으며, 해양유전의 개발 과정을 통해 해양 석유를 생산한다. 개발된 유전에서 여러 개의 유정(well)들 중 유정의 가동여부에 따라 rig의 활동상태가 달라진다.



유가가 고공행진일 때 개발된 유전에서 모든 유정들을 가동하며 더 많은 해양유전을 개발한다. 이때 rig의 활동 상태는 active상태이며 활동(active)상태의 리그들은 계약이 체결되어 유일하게 이익이 발생하고 시추작업, 장소대기, 수송, 동원, 해제상태를 포함한다. 시추계약(작업의무)이 만료가 되면 활동(active) 상태의 리그들은 비 활동(inactive) 상태가 된다. 리그가 짧은 시간동안 작업을 개시하기 위한 명령을 대기하고 있는 상태(유휴상태)일 때, 일반적으로 'ready stacked'상태로 유지되고 있다. 유휴상태이기는 하지만 언제든지 작업 개시가 가능하도록 선원들을 그대로 고용하고, 보수 및 정비를 하여 시장성 있는 공급으로 볼 수 있다.

유가의 급락으로 저유가가 계속되어 단기간 안에 리그를 사용할 계획이 없다면, 리그들은 'cold stacked' 상태로 전환되어 운영 유지비를 감소시키기 위하여 최소한의 선원들만 고용한다. 'Cold stacked' 리그들은 몇 달에서 수년간 비활동 상태로 유지되며, 시장성 있는 공급으로 보지 않는다. 조선소 또는 wet dock에서 대기를 하고 있다. 실제 작업여건으로 돌아가기 위해서는 upgrade and maintenance 시장에서 자본과 시간이 소요되며, 종종 cold stacked 리그들은 중고시장에서 거래된다. 리그들은 시간이 지남에 따라 가치가 하락하고, cold stacked 상태로 지내는 유휴시간이 수년간 지속됨에 따라 재가동 비용이 엄두도 못 낼 정도로 높아지면 'dead stacked' 분류된다. 이는 구조물이 해체되기 전 단계이며, 다시 이익 창출활동을 하기 어렵다.

### 3.2 문제의 정식화

본 논문에서는 West Africa, Gulf of Mexico, 그리고 Middle East에 원유를 생산하는 offshore plant를 보유하고 있는 가상의 major oil company를 구상하였으며, 각 offshore plant의 상세는 Table 2와 같으며, 시장경제상황별 유가와 수요에 대한 시나리오는 Table 3과 같다.

**Table 2** Outline of Simulated Offshore fields

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

**Table 3** Crude oil price and Demand Scenarios

Possible economic situation	Market demands under each possible economic situation			Crude oil price under each possible situation			Likelihood of each possible economic situation
	(Unit: Thousand bbls)			West Africa	Gulf of Mexico	Middle East	
	Europe	North America	Far East		(WTI)	(Dubai)	
Boom	49,000	51,000	57,500	112.5	111.8	111.3	0.1
Good	39,200	40,800	46,000	90	89.44	89.04	0.35
Fair	24,500	25,500	28,750	67.5	67.08	66.78	0.43
Poor	14,700	15,300	17,250	33.75	33.54	33.39	0.12



시나리오에 따라 비용 대비 이익을 극대화 시키는 최적화 문제를 구하기 위한 자료는 다음과 같이 정식화 한다.

#### Data

$Fc_{pf}$  : Fixed cost of operating field  $f$  in OP  $p$  (\$US)

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

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

$Rc_{spl}$  : Revenue in scenario  $s$  of crude sales from OP  $p$  to local market  $l$  (\$US/Thousand bbls)

$D_{sl}$  : Demand in scenario  $s$  of local market  $l$  (Thousand bbls)

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

$\omega_{sl}^-$  : weighting penalty for falling short of demand in scenario  $s$  at local market  $l$ (\$US)

$\omega_{sl}^+$  : weighting penalty for exceeding demand in scenario  $s$  at local market  $l$ (\$US)

$Dc_{pf}$  : Design capacity in the field  $f$  of OP  $p$ (Thousand bbls)

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

#### Decision Variables

$y_{pf}$  : the binary variable to select the operating field  $f$  in OP  $p$

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

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

$Y_{sl}^-$  : the amount of crude falling short of demand in scenario  $s$  at

local market  $l$ (Thousand bbls)

$Y_{sl}^+$  : the amount of crude exceeding demand in scenario  $s$  at local market  $l$ (Thousand bbls)

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

### 3.3 확정적 모형(Deterministic Formulation)

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_p \sum_l R c_{pl} X_{pl} - \sum_p \sum_f F c_{pf} y_{pf} - \sum_p \sum_f \sum_i W c_{pfi} w_{pfi} - \sum_p H c_p I_p - \\ & \sum_l (\omega_l^- Y_l^- + \omega_l^+ Y_l^+) \end{aligned}$$

(unit: \$US) (1)

*s.t.*

$$\sum_i P_{pfi} w_{pfi} - D c_{pf} y_{pf} \leq 0 \quad \text{for all } p, f \quad (2)$$

$$\sum_p X_{pl} + Y_l^- - Y_l^+ = D_l \quad \text{for all } l \text{ and } s \quad (3)$$

$$I_p \leq S_p \quad \text{for all } p \quad (4)$$

$$\sum_f \sum_i P_{pfi} w_{pfi} - \sum_l X_{pl} - I_p = 0 \quad \text{for all } p \quad (5)$$

$$X_{pl}, I_p \geq 0, Y_{sl}^-, Y_{sl}^+ \geq 0$$

목적함수 (1)은 생산-수송된 석유가격에서 각 해양유전의 고정비용과 유정당 생산비용, 수송비, 재고비용 그리고 수요부족 및 수요초과분에 대한 외주비용과 보관비용을 제한 순이익을 최대화 시키는 것을 목적으로 한다. 각 해양유전과 생산 유정의 가동여부는 가동(1)을 의미하며, 미가동(0)을 의미한다. 여기서 수요를 만족시키지 못하는 변수  $Y_l^-$ 에 벌점  $w_l^-$ , 수요를 초과하는 변수  $Y_l^+$ 에 벌점  $w_l^+$ 을 부과하는 방법을 사용하였다.

제약식 (2)는 각 해양유전에서 유정의 생산된 양이 각 해양유전의 Design Capacity보다 작거나 같아야 한다. 제약식(3)은 시장수요량은 시장까지 수송된 양과 수요를 충족시키지 못한 양의 합과 수요를 초과하는 양의 차와 같아야 한다. 제약식(4)는 해양 유전별 재고량이 해양 유전별 가지고 있는 재고 수용량보다 작거나 같아야 한다. 제약식(5)는 각 유정에서 생산된 양은 시장까지 수송량과 재고량을 합한 양과 같아야 한다.

확정적 모형은 경제상황이 예측 가능할 때 불확실성을 모형화 하지 않은 선형계획법이다.

### 3.4 추계적 의사결정모형(Stochastic Formulation)

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z = & \sum_s p_s \left[ \sum_p \sum_l R c_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] - \sum_p \sum_f F c_{pff} y_{pf} \\
 & - \sum_p \sum_f \sum_i W c_{pfi} w_{pfi} - \sum_p H c_p I_p
 \end{aligned}$$

(unit: \$US) (1)

s.t.

$$\sum_i P_{pfi} w_{pfi} - D c_{pff} y_{pf} \leq 0 \quad \text{for all } p, f \quad (2)$$

$$\sum_p X_{pl} + Y_{sl}^- - Y_{sl}^+ = D_{sl} \quad \text{for all } l \text{ and } s \quad (3)$$

$$I_p \leq S_p \quad \text{for all } p \quad (4)$$

$$\sum_f \sum_i P_{pfi} w_{pfi} - \sum_l X_{pl} - I_p = 0 \quad \text{for all } p \quad (5)$$

$$X_{pl}, I_p \geq 0, \quad Y_{sl}^-, Y_{sl}^+ \geq 0$$

추계적 의사결정 모형은 확정적 모형에서 경제 상황을 정확히 예측하기가 어려워 시나리오 기반의 경제 상황 boom, good, fair, poor에 상응하는 확률을 가정하여 정식화한 모형이다.

목적함수(1)에서는 각 시나리오별 발생확률을 곱하여 생산-수송된 석유 가격에서 각 해양유전의 고정비용과 유정당 생산비용과 수송비, 재고비용 그리고 수요부족 및 수요초과분에 대한 외주비용을 과 보관비용을 제한 순이익을 최대화 시키는 것을 목적으로 한다. 여기서 시나리오별 수요를 만족시키지 못하는 변수  $Y_{sl}^-$ 에 벌점  $w_{sl}^-$ , 수요를 초과하는 변수  $Y_{sl}^+$ 에 벌점  $w_{sl}^+$ 을 부과하는 방법을 사용하였다.

제약식 (2)는 확정적 모형의 제약식(2)와 동일의미이다. 제약식(3)은 시나리오별 시장수요량은 시장까지 수송된 양과 수요를 충족시키지 못한 양과의 합과 같아야 한다. 제약식 (4), (5)는 확정적 모형의 제약식 (4), (5)와 동일의미이다.

### 3.5 하위부분평균 강인한 최적화 모형(RO-LPM Formulation)

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_s p_s \left[ \sum_p \sum_l Rc_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] - \sum_p \sum_f Fc_{pfi} y_{pfi} \\ & - \sum_p \sum_f \sum_i Wc_{pfi} w_{pfi} - \sum_p Hc_p I_p - \rho \sum_s p_s \Delta_s \end{aligned}$$

(unit: \$US) (1)

s.t.

$$\sum_i P_{pfi} w_{pfi} - Dc_{pfi} y_{pfi} \leq 0 \quad \text{for all } p, f \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & \sum_s p_s \left[ \sum_p \sum_l Rc_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] \\ & - \left[ \sum_p \sum_l Rc_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] - \Delta_s \leq 0 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\sum_p X_{pl} + Y_{sl}^- - Y_{sl}^+ = D_{sl} \quad \text{for all } l \text{ and } s \tag{4}$$

$$I_p \leq S_p \quad \text{for all } p \tag{5}$$

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

$$X_{pl}, I_p \geq 0, \Delta_s \geq 0, Y_{sl}^-, Y_{sl}^+ \geq 0$$

목적함수(1)에서는 추계적 의사결정 모형에 기대 리코스 이익으로부터의 시나리오 이익의 음의 편차에 가중치  $\rho$ 를 곱하여 빼주었다. 즉 리코스 이익의 기대치와 기대치 보다 작은 이익의 값을 가지는 변동간의 절충을 가능하기 위한 목표계획법이다. 앞의 추계적 의사결정모형의 제약식에서 추가된 제약식 (3)과 비음제약  $\Delta_s \geq 0$ 은 하위부분평균의 정의를 만족한다.

### 3.6 하위부분평균 리코스 제한 최적화 모형(RR-LPM Formulation)

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_s p_s \left[ \sum_p \sum_l Rc_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] - \sum_p \sum_f Fc_{pfi} y_{pfi} \\ & - \sum_p \sum_f \sum_i Wc_{pfi} w_{pfi} - \sum_p Hc_p I_p \end{aligned}$$

$$\text{(unit: \$US)} \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_i P_{pfi} w_{pfi} - Dc_{pfi} y_{pfi} \leq 0 \quad \text{for all } p, f \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & \sum_s p_s \left[ \sum_p \sum_l Rc_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] \\ & - \left[ \sum_p \sum_l Rc_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] - \Delta_s \leq 0 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\sum_s p_s \Delta_s \leq \epsilon \tag{4}$$

$$\sum_p X_{pl} + Y_{sl}^- - Y_{sl}^+ = D_{sl} \quad \text{for all } l \text{ and } s \tag{5}$$

$$I_p \leq S_p \quad \text{for all } p \tag{6}$$

$$\sum_f \sum_i P_{pfi} w_{pfi} - \sum_l X_{pl} - I_p = 0 \quad \text{for all } p \tag{7}$$

---

1)  $\Delta_s = \max(0, \sum_s p_s \left[ \sum_p \sum_l Rc_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] - \left[ \sum_p \sum_l Rc_{spl} X_{pl} - \sum_l (\omega_{sl}^- Y_{sl}^- + \omega_{sl}^+ Y_{sl}^+) \right] - \Delta_s)$

$$X_{pl}, I_p \geq 0, \Delta_s \geq 0, Y_{sl}^-, Y_{sl}^+ \geq 0$$

목적함수 (1)은 추계적 의사결정모형과 식이 같다. 하지만 제약식 (4)에서 하위평균기대이익에 대한 변동의 값을 미리 정해진 허용수준  $\epsilon$ 으로 한계를 조정한다. 한계를 조정함으로써 기대 리코스 이익과 실제 이익 간 하위 변동차를 감소시킨다. 하지만 리코스 변수들의 한계를 제한함으로써 얻은 해가 반드시 리코스 제한 최적화 모형의 최적해는 아니다.



## 제 4장 계산실험

### 4.1 계산실험 준비

본 장의 계산실험은 MS Office Excel 해 찾기 프로그램을 통한 최대 값을 대상으로 설정하고 ‘linear programming simplex’ 엔진을 해법을 선택한 해양 석유 생산의 최적화이다. 해양 석유 생산의 최적화 문제는 네 가지의 수요와 유가에 관한 시나리오와 상응하는 확률을 기반으로 한다. 이 문제의 불확실성은 확정적으로 알려져 있지 않은 수요와 유가에 기인한다. 앞의 정식화 된 해양 석유 생산에 관한 상수와 변수를 이용한 최적화 모형을 계산하기 위하여 김창수(2015)의 논문에서 사용된 well cost, productivity, shipping cost, design capacity 자료를 참고하였다.

Crude oil price는 한국석유공사에서 제공하는 두바이유와 서부텍사스유, 그리고 북해산 브렌트유 가격을 참고하였다. 시나리오가 Boom일 때의 유가가격을 정하고 시나리오가 Good일 때는 boom일 때 유가의 80%, fair일 때는 boom일 때 유가의 60%, poor일 때 boom일 때 유가의 30%로 산정하였다.

Fixed cost of operating field( $F_{c_{pf}}$ )는 각 해양유전에 해당되는 유정의 생산비용에 30%를 각 해양유전의 고정비용으로 설정하였다.

Revenue( $R_{c_{spl}}$ ) 값은 시나리오별로 설정한 배럴당 가격인 유가를 thousand 배럴당 가격으로 환산 후 김창수(2015)의 논문에서 사용된 shipping cost값을 제외한 가격으로 설정하였다. 이익을 산정하는데 있어 여러 요소가 있지만, 본 논문에서는 문제를 단순화하기 위해 유가와 shipping cost 값을 통한 revenue값을 시나리오 별로 설정하였다.

Holding cost는 각 지역별로 시나리오가 boom일 때 유가의 5%로 설정하고 이는 다국적 석유기업의 분기당 계획을 위한 모형을 만들기 위해 3개월 치의 holding cost로 본다.

Demand of local market은 김창수(2015)의 논문에서 사용된 시장수요가 높을 때를 참고하여 지역별 수요를 설정하였다. 시나리오가 boom일 때의 수요를 지역별로 설정하고 시나리오가 good일 때의 수요는 boom일 때 수요의 80%, fair일 때의 수요는 50%, poor일 때의 수요는 30%로 설정하였다.

수요를 충족시키질 못할 때와 수요를 초과할 때 부여하는 페널티  $w_{sl}^-$ ,  $w_{sl}^+$  값은 시나리오가 boom일 때는 지역별 holding cost값의 평균값을 사용하고, 시나리오가 good일 때는 평균값의 80%, fair일 때는 평균값의 50%, poor일 때는 평균값의 30%로 설정하였다.

## 4.2 계산실험 및 결과

계산실험은 시나리오별 선형계획모형, 시나리오별 확률에 상응하는 추계적 모형, 하위부분평균을 사용한 강인한 최적화 모형과 리코스 제한 모형을 계산하였다.

### 4.2.1 확정적 모형 선형계획법

확정적 모형 선형계획법에서 경제상황이 boom일 때, 시장수요는 Europe 49,000,000 배럴, North America 51,000,000배럴, Far East 57,500,000배럴이며, West Africa산 석유가격은 배럴당 112.5달러, 서부텍사스유(WTI)는 배럴당 111.8달러, 두바이유는 111.3달러이다.



Yaf1-1	Yaf2-1	Yaf3-1	Yaf4-1	Yaf5-1
Yus1-1	Yus2-1	Yus3-1	Yus4-1	
Yme1-1	Yme2-1	Yme3-1		

Fig.9 Field selection(boom market demand)

Fig.9는 이때 각 Field의 가동여부를 나타낸다. 검은색 글씨가 가동(1)을 의미하며, 붉은색 글씨는 미가동(0)을 의미한다.

Waf11-1	Waf12-1	Waf13-1	Waf14-0	Waf15-1	Waf16-1				
Waf21-1	Waf22-1	Waf23-1	Waf24-1	Waf25-1	Waf26-1	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	Waf510-1
Wus11-1	Wus12-1	Wus13-1	Wus14-1	Wus15-1	Wus16-1				
Wus21-1	Wus22-1	Wus23-1	Wus24-1	Wus25-1					
Wus31-1	Wus32-0	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	Wme18-0		
Wme21-1	Wme22-1	Wme23-1	Wme24-1	Wme25-0	Wme26-1	Wme27-1			
Wme31-1	Wme32-1	Wme33-1	Wme34-1						

Fig.10 Well selection(boom market demand)

Fig.9는 이때 각 production well의 가동여부를 나타낸다. 검은색 글씨가 가동(1)을 의미하며, 붉은색 글씨는 미가동(0)을 의미한다.

목표 셀 (최대값)						
셀	이름	계산값				
\$DF\$3	최적해 목적함수	7,378,191,590				
제한 조건						
셀	이름	셀의 값	수식	상태	조건과의 차	
\$DF\$18	제약조건13 목적함수	49000	\$DF\$18=\$DH\$18	만족		0
\$DF\$19	제약조건14 목적함수	51000	\$DF\$19=\$DH\$19	만족		0
\$DF\$20	제약조건15 목적함수	57500	\$DF\$20=\$DH\$20	만족		0
\$DF\$21	제약조건16 목적함수	0	\$DF\$21<=\$DH\$21	부족	최소	5000
\$DF\$22	제약조건17 목적함수	0	\$DF\$22<=\$DH\$22	부족	최소	5000
\$DF\$23	제약조건18 목적함수	0	\$DF\$23<=\$DH\$23	부족	최소	5000
\$DF\$24	제약조건19 목적함수	0	\$DF\$24=\$DH\$24	만족		0
\$DF\$25	제약조건20 목적함수	0	\$DF\$25=\$DH\$25	만족		0
\$DF\$26	제약조건21 목적함수	0	\$DF\$26=\$DH\$26	만족		0
\$DF\$6	제약조건2 목적함수	-0.238095238	\$DF\$6<=\$DH\$6	부족	최소	0.238095238
\$DF\$7	제약조건3 목적함수	-0.363636364	\$DF\$7<=\$DH\$7	부족	최소	0.363636364
\$DF\$8	제약조건4 목적함수	0	\$DF\$8<=\$DH\$8	만족		0
\$DF\$9	제약조건4 목적함수	-1676.956522	\$DF\$9<=\$DH\$9	부족	최소	1676.956522
\$DF\$10	제약조건5 목적함수	0	\$DF\$10<=\$DH\$10	만족		0
\$DF\$11	제약조건6 목적함수	0	\$DF\$11<=\$DH\$11	만족		0
\$DF\$12	제약조건7 목적함수	0	\$DF\$12<=\$DH\$12	만족		0
\$DF\$13	제약조건8 목적함수	-2944.555556	\$DF\$13<=\$DH\$13	부족	최소	2944.555556
\$DF\$14	제약조건9 목적함수	-0.47826087	\$DF\$14<=\$DH\$14	부족	최소	0.47826087
\$DF\$15	제약조건10 목적함수	-1639.666667	\$DF\$15<=\$DH\$15	부족	최소	1639.666667
\$DF\$16	제약조건11 목적함수	-2001.545455	\$DF\$16<=\$DH\$16	부족	최소	2001.545455
\$DF\$17	제약조건12 목적함수	-0.473684211	\$DF\$17<=\$DH\$17	부족	최소	0.473684211
\$CT\$3:\$DE\$3=2진수						
\$K\$3:\$CJ\$3=2진수						

Fig.11 Microsoft office excel solver solution report (boom market)

**Table 4** Optimal Solution Based on boom market

이름	계산 값
최적해 Xafeu	60420
최적해 Xafna	4096
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	46904
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YMeu	0
최적해 YMna	0
최적해 YMfe	17606
최적해 YPeu	11420
최적해 YPna	0
최적해 YPfe	0
Overall profit : 7,378,191,590	

계산실험 결과, 시장수요를 충족시키기 위하여 West Africa의 1개, Gulf of Mexico의 2개, Middle East의 2개를 제외한 모든 production well 을 가동하였다. Crude oil의 수송은 West Africa에서 Europe으로 60,420,000 배럴, North America로 4,096,000 배럴, Gulf of Mexico에서 North America로 46,904,000 배럴 그리고 Middle East에서 Far East로 38,894,000 배럴이다. 재고는 발생하지 않았고, 수송된 Crude oil의 양은 Far East의 시장수요에서 17,606,000 배럴 부족하였고, Europe의 시장수요에서 11,420,000 배럴 초과하였다. North America의 시장수요는 만족시켰다. 수출된 원유 가격에서 well cost와 수송비 그리고 재고비용을 제한

순이익은 \$ 7,378,191,590 이다.

확정적 모형 선형계획법에서 경제상황이 good일 때, 시장수요는 Europe 39,200,000 배럴, North America 40,800,000배럴, Far East 46,000,000배럴이며, West Africa산 석유가격은 배럴당 90달러, 서부텍사스유(WTI)는 배럴당 89.44달러, 두바이유는 89.04달러이다.

Yaf1-1	Yaf2-1	Yaf3-1	Yaf4-1	Yaf5-1
Yus1-1	Yus2-1	Yus3-1	Yus4-1	
Yme1-1	Yme2-1	Yme3-1		

Fig.12 Field selection(good market demand)

Waf11-1	Waf12-1	Waf13-1	Waf14-0	Waf15-1	Waf16-1				
Waf21-1	Waf22-1	Waf23-1	Waf24-1	Waf25-1	Waf26-1	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	Waf510-1
Wus11-1	Wus12-1	Wus13-1	Wus14-1	Wus15-1	Wus16-1				
Wus21-1	Wus22-1	Wus23-1	Wus24-1	Wus25-1					
Wus31-1	Wus32-0	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	Wme18-0		
Wme21-1	Wme22-1	Wme23-1	Wme24-1	Wme25-0	Wme26-1	Wme27-1			
Wme31-1	Wme32-1	Wme33-1	Wme34-1						

Fig.13 Well selection (good market demand)

목적 셀 (최대값)		이름	계산 값
\$D\$F\$3	셀	최적해 목적함수	3,960,163,092
제약 조건			
셀	이름	셀의 값	수식
\$D\$F\$18	제약조건13 목적	39200	\$D\$F\$18=\$D\$H\$18
\$D\$F\$19	제약조건14 목적	40800	\$D\$F\$19=\$D\$H\$19
\$D\$F\$20	제약조건15 목적	46000	\$D\$F\$20=\$D\$H\$20
\$D\$F\$21	제약조건16 목적	0	\$D\$F\$21<=\$D\$H\$21
\$D\$F\$22	제약조건17 목적	0	\$D\$F\$22<=\$D\$H\$22
\$D\$F\$23	제약조건18 목적	0	\$D\$F\$23<=\$D\$H\$23
\$D\$F\$24	제약조건19 목적	0	\$D\$F\$24=\$D\$H\$24
\$D\$F\$25	제약조건20 목적	7.27596E-12	\$D\$F\$25=\$D\$H\$25
\$D\$F\$26	제약조건21 목적	0	\$D\$F\$26<=\$D\$H\$26
\$D\$F\$27	제약조건22 목적	-0.238095238	\$D\$F\$27<=\$D\$H\$27
\$D\$F\$28	제약조건23 목적	-0.363636364	\$D\$F\$28<=\$D\$H\$28
\$D\$F\$29	제약조건24 목적	-1676.956522	\$D\$F\$29<=\$D\$H\$29
\$D\$F\$30	제약조건25 목적	0	\$D\$F\$30<=\$D\$H\$30
\$D\$F\$31	제약조건26 목적	0	\$D\$F\$31<=\$D\$H\$31
\$D\$F\$32	제약조건27 목적	0	\$D\$F\$32<=\$D\$H\$32
\$D\$F\$33	제약조건28 목적	-2944.555556	\$D\$F\$33<=\$D\$H\$33
\$D\$F\$34	제약조건29 목적	-0.47826087	\$D\$F\$34<=\$D\$H\$34
\$D\$F\$35	제약조건30 목적	-1639.666667	\$D\$F\$35<=\$D\$H\$35
\$D\$F\$36	제약조건31 목적	-2001.545455	\$D\$F\$36<=\$D\$H\$36
\$D\$F\$37	제약조건32 목적	-0.473684211	\$D\$F\$37<=\$D\$H\$37
SCT\$3:SD\$E\$3=2전주			
SK\$3:SCJ\$3=2전주			

Fig.14 Microsoft office excel solver solution report (good market)

**Table 5** Optimal Solution Based on good market

이름	계산 값
최적해 Xafeu	58410
최적해 Xafna	0
최적해 Xaffe	6106
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	46904
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YMeu	0
최적해 YMna	0
최적해 YMfe	0
최적해 YPeu	19210
최적해 YPna	6104
최적해 YPfe	0
Overall profit : 3,960,163,092	

계산실험 결과, 시장수요를 충족시키기 위하여 West Africa의 1개, Gulf of Mexico의 2개, Middle East의 2개를 제외한 모든 production well 을 가동하였다. Crude oil의 수송은 West Africa에서 Europe으로 59,410,000 배럴, Far East로 6,106,000 배럴, Gulf of Mexico에서 North America로 46,904,000 배럴 그리고 Middle East에서 Far East로 39,894,000 배럴이다. 재고량은 없으며 Europe의 시장수요에서 19,210,000 배럴 초과하며, North America의 시장수요에서 6,104,000 배럴 초과하였다. 수출된 원유 가격에서 well cost와 수송비 그리고 초과 수송된 석유 보관비용을 제한 순이익은 \$ 3,960,163,092이다.

확정적 모형 선형계획법에서 경제상황이 fair일 때, 시장수요는 Europe 24,500,000 배럴, North America 25,500,000 배럴, Far East 28,750,000 배럴이며, West Africa산 석유가격은 배럴당 67.5달러, 서부텍사스유(WTD)는



배럴당 67.08달러, 두바이유는 66.78달러이다.

Yaf1-1	Yaf2-1	Yaf3-1	Yaf4-1	Yaf5-1
Yus1-0	Yus2-0	Yus3-0	Yus4-0	
Yme1-1	Yme2-1	Yme3-1		

Fig.15 Field selection(fair market demand)

Waf11-1	Waf12-1	Waf13-1	Waf14-0	Waf15-1	Waf16-1				
Waf21-1	Waf22-1	Waf23-1	Waf24-1	Waf25-1	Waf26-1	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	Waf510-1
Wus11-0	Wus12-0	Wus13-0	Wus14-0	Wus15-0	Wus16-0				
Wus21-0	Wus22-0	Wus23-0	Wus24-0	Wus25-0					
Wus31-0	Wus32-0	Wus33-0	Wus34-0						
Wus41-0	Wus42-0	Wus43-0	Wus44-0	Wus45-0	Wus46-0	Wus47-0	Wus48-0		
Wme11-1	Wme12-1	Wme13-1	Wme14-1	Wme15-1	Wme16-1	Wme17-1	Wme18-0		
Wme21-1	Wme22-1	Wme23-1	Wme24-1	Wme25-0	Wme26-1	Wme27-1			
Wme31-1	Wme32-1	Wme33-1	Wme34-1						

Fig.16 Well selection (fair market demand)

목표 셀 (최대값)										
셀	이름	계산 값								
\$DFS3	최적해	최적합수	658.228392							
제한 조건										
셀	이름	셀의 값	수식	상태	조건과의 차					
\$DFS18	계약조건13	최적합수	24500	\$DFS18=\$DHS18	만족	0				
\$DFS19	계약조건14	최적합수	25500	\$DFS19=\$DHS19	만족	0				
\$DFS20	계약조건15	최적합수	28750	\$DFS20=\$DHS20	만족	0				
\$DFS21	계약조건16	최적합수	0	\$DFS21<=\$DHS21	부족	만족	5000			
\$DFS22	계약조건17	최적합수	0	\$DFS22<=\$DHS22	부족	만족	5000			
\$DFS23	계약조건18	최적합수	0	\$DFS23<=\$DHS23	부족	만족	5000			
\$DFS24	계약조건19	최적합수	-1.45519E-11	\$DFS24=\$DHS24	만족	0				
\$DFS25	계약조건20	최적합수	-5.11146E-12	\$DFS25=\$DHS25	만족	0				
\$DFS26	계약조건21	최적합수	7.27596E-12	\$DFS26=\$DHS26	만족	0				
\$DFS6	계약조건1	최적합수	-0.238095238	\$DFS6<=\$DHS6	부족	만족	0.238095238			
\$DFS7	계약조건2	최적합수	-0.363636364	\$DFS7<=\$DHS7	부족	만족	0.363636364			
\$DFS8	계약조건3	최적합수	0	\$DFS8<=\$DHS8	만족	0				
\$DFS9	계약조건4	최적합수	-1676.956522	\$DFS9<=\$DHS9	부족	만족	1676.956522			
\$DFS10	계약조건5	최적합수	0	\$DFS10<=\$DHS10	만족	0				
\$DFS11	계약조건6	최적합수	0	\$DFS11<=\$DHS11	만족	0				
\$DFS12	계약조건7	최적합수	0	\$DFS12<=\$DHS12	만족	0				
\$DFS13	계약조건8	최적합수	0	\$DFS13<=\$DHS13	만족	0				
\$DFS14	계약조건9	최적합수	0	\$DFS14<=\$DHS14	만족	0				
\$DFS15	계약조건10	최적합수	-1639.666667	\$DFS15<=\$DHS15	부족	만족	1639.666667			
\$DFS16	계약조건11	최적합수	-2001.545455	\$DFS16<=\$DHS16	부족	만족	2001.545455			
\$DFS17	계약조건12	최적합수	-0.473684211	\$DFS17<=\$DHS17	부족	만족	0.473684211			
\$CTS3:\$DES3=2진수										
\$KS3:\$CS3=2진수										

Fig.17 Microsoft office excel solver solution report (fair market)

**Table 6** Optimal Solution Based on fair market

이름	계산 값
최적해 Xafeu	39016
최적해 Xafna	25500
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	0
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YMeu	0
최적해 YMna	0
최적해 YMfe	0
최적해 YPeu	14516
최적해 YPna	0
최적해 YPfe	11144
Overall profit : 658,228,392	

계산실험 결과, 시장수요를 충족시키기 위하여 West Africa에서 1개, Gulf of Mexico에서 전체 well의 수, Middle East의 2개의 production well을 가동하지 않았다. Crude oil의 수송은 West Africa에서 Europe으로 39,016,000 배럴, North America로 25,500,000 배럴 그리고 Middle East에서 Far East로 39,894,000 배럴이다. 재고는 발생하지 않았고, Europe의 시장수요에서 14,516,000 배럴 초과하며, Far East의 시장수요에서 11,144,000 배럴 초과하였다. 수출된 원유 가격에서 well cost와 수송비 그리고 초과 수송된 석유 보관비용을 제한 순이익은 \$ 658,228,392이다.

확정적 모형 선형계획법에서 경제상황이 poor일 때, 시장수요는 Europe 14,700,000 배럴, North America 15,300,000 배럴, Far East 17,250,000 배럴이며, West Africa산 석유가격은 배럴당 33.75달러, 서부

텍사스유(WTI)는 배럴당 33.54달러, 두바이유는 33.39달러이다.

Yaf1-0	Yaf2-0	Yaf3-0	Yaf4-0	Yaf5-0
Yus1-0	Yus2-0	Yus3-0	Yus4-0	
Yme1-0	Yme2-0	Yme3-0		

Fig.18 Field selection(poor market demand)

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

Fig.19 Well selection (poor market demand)

표 셀 (최대값)						
셀	이름	계산 값				
\$DFS3	최적해 목적함수	9,514,260				
제한 조건						
셀	이름	셀의 값	수식	상태	조건과의 차	
\$DFS18	제약조건13 목적함수	14700	\$DFS18=\$DHS18	만족	0	
\$DFS19	제약조건14 목적함수	15300	\$DFS19=\$DHS19	만족	0	
\$DFS20	제약조건15 목적함수	17250	\$DFS20=\$DHS20	만족	0	
\$DFS21	제약조건16 목적함수	0	\$DFS21<=\$DHS21	부분적 만족	5000	
\$DFS22	제약조건17 목적함수	0	\$DFS22<=\$DHS22	부분적 만족	5000	
\$DFS23	제약조건18 목적함수	0	\$DFS23<=\$DHS23	부분적 만족	5000	
\$DFS24	제약조건19 목적함수	-6.82121E-13	\$DFS24=\$DHS24	만족	0	
\$DFS25	제약조건20 목적함수	0	\$DFS25=\$DHS25	만족	0	
\$DFS26	제약조건21 목적함수	-2.27374E-12	\$DFS26=\$DHS26	만족	0	
\$DFS6	제약조건1 목적함수	0	\$DFS6<=\$DHS6	만족	0	
\$DFS7	제약조건2 목적함수	0	\$DFS7<=\$DHS7	만족	0	
\$DFS8	제약조건3 목적함수	0	\$DFS8<=\$DHS8	만족	0	
\$DFS9	제약조건4 목적함수	0	\$DFS9<=\$DHS9	만족	0	
\$DFS10	제약조건5 목적함수	0	\$DFS10<=\$DHS10	만족	0	
\$DFS11	제약조건6 목적함수	0	\$DFS11<=\$DHS11	만족	0	
\$DFS12	제약조건7 목적함수	0	\$DFS12<=\$DHS12	만족	0	
\$DFS13	제약조건8 목적함수	0	\$DFS13<=\$DHS13	만족	0	
\$DFS14	제약조건9 목적함수	0	\$DFS14<=\$DHS14	만족	0	
\$DFS15	제약조건10 목적함수	0	\$DFS15<=\$DHS15	만족	0	
\$DFS16	제약조건11 목적함수	0	\$DFS16<=\$DHS16	만족	0	
\$DFS17	제약조건12 목적함수	0	\$DFS17<=\$DHS17	만족	0	
\$CTS3:\$DES3=2진수						
\$KS3:\$CS3=2진수						

Fig.20 Microsoft office excel solver solution report (poor market)

Table 7 Optimal Solution Based on poor market

이름	계산 값
최적해 Xafeu	0
최적해 Xafna	0
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	0
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	0
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YMeu	14700
최적해 YMna	15300
최적해 YMfe	17250
최적해 YPeu	0
최적해 YPna	0
최적해 YPfe	0
Overall profit : -9,514,260	

계산실험 결과, 유가가 well cost보다 더 하락하여 West Africa, Gulf of Mexico, Middle East의 해양유전에서 유정의 가동을 모두 중지시키는 의사결정이 나왔다. 시장수요만큼의 수요부족분이 발생하여 외주비용을 지불해서 시장수요를 충족시켜야 한다. 유가의 급격한 하락으로 해양 E&P의 프로젝트들이 중단되고, 해양유정 가동을 중지시켜 rig수도 감소하고 있는 현재 시점과 비슷한 경우이다. 따라서 외주비용을 주고 시장수요를 만족시키는 경우, 외주비용만 발생하기 때문에 순이익은 \$ -9,514,260이다.

#### 4.2.2 추계적 모형

확정적 모형에서 경제 상황을 정확히 예측하기가 어려워 시나리오 기반의 경제 상황 boom일 때 확률 0.1, good일 때 확률 0.35, fair일 때 확



를 0.43, poor일 때 확률 0.12에 상응하는 확률을 가정하여 정식화한  
 추계적 모형이다.

Yaf1-1	Yaf2-1	Yaf3-1	Yaf4-1	Yaf5-1
Yus1-1	Yus2-1	Yus3-0	Yus4-1	
Yme1-1	Yme2-1	Yme3-1		

Fig.21 Field selection(stochastic model based on scenarios)

Waf11-1	Waf12-1	Waf13-1	Waf14-0	Waf15-1	Waf16-1				
Waf21-1	Waf22-1	Waf23-1	Waf24-1	Waf25-1	Waf26-1	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	Waf510-1
Wus11-1	Wus12-1	Wus13-1	Wus14-1	Wus15-1	Wus16-1				
Wus21-1	Wus22-1	Wus23-1	Wus24-1	Wus25-1					
Wus31-0	Wus32-0	Wus33-0	Wus34-0						
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	Wme18-0		
Wme21-1	Wme22-1	Wme23-1	Wme24-1	Wme25-0	Wme26-1	Wme27-1			
Wme31-1	Wme32-1	Wme33-1	Wme34-1						

Fig.22 Well selection (stochastic model based on scenarios)

목적 함수 (최대값)		이름		계산 값			
\$DX\$3	셀	최적해 목적함수		1,710,165,441			
제한 조건	셀	이름	수식	상태	조건과의 차		
\$DX\$18		제약조건13 목적함수	49000 \$DX\$18=\$DZ\$18	만족	0		
\$DX\$19		제약조건14 목적함수	39200 \$DX\$19=\$DZ\$19	만족	0		
\$DX\$20		제약조건15 목적함수	24500 \$DX\$20=\$DZ\$20	만족	0		
\$DX\$21		제약조건16 목적함수	14700 \$DX\$21=\$DZ\$21	만족	0		
\$DX\$22		제약조건17 목적함수	51000 \$DX\$22=\$DZ\$22	만족	0		
\$DX\$23		제약조건18 목적함수	40800 \$DX\$23=\$DZ\$23	만족	0		
\$DX\$24		제약조건19 목적함수	25500 \$DX\$24=\$DZ\$24	만족	0		
\$DX\$25		제약조건20 목적함수	15300 \$DX\$25=\$DZ\$25	만족	0		
\$DX\$26		제약조건21 목적함수	57500 \$DX\$26=\$DZ\$26	만족	0		
\$DX\$27		제약조건22 목적함수	46000 \$DX\$27=\$DZ\$27	만족	0		
\$DX\$28		제약조건23 목적함수	26750 \$DX\$28=\$DZ\$28	만족	0		
\$DX\$29		제약조건24 목적함수	17250 \$DX\$29=\$DZ\$29	만족	0		
\$DX\$30		제약조건25 목적함수	0 \$DX\$30<=\$DZ\$30	부분적 만족	5000		
\$DX\$31		제약조건26 목적함수	0 \$DX\$31<=\$DZ\$31	부분적 만족	5000		
\$DX\$32		제약조건27 목적함수	0 \$DX\$32<=\$DZ\$32	부분적 만족	5000		
\$DX\$33		제약조건28 목적함수	7.27596E-12 \$DX\$33=\$DZ\$33	만족	0		
\$DX\$34		제약조건29 목적함수	-1.45519E-11 \$DX\$34=\$DZ\$34	만족	0		
\$DX\$35		제약조건30 목적함수	-7.27596E-12 \$DX\$35=\$DZ\$35	만족	0		
\$DX\$6		제약조건1 목적함수	-0.238095238 \$DX\$6<=\$DZ\$6	부분적 만족	0.238095238		
\$DX\$7		제약조건2 목적함수	-0.363636364 \$DX\$7<=\$DZ\$7	부분적 만족	0.363636364		
\$DX\$8		제약조건3 목적함수	0 \$DX\$8<=\$DZ\$8	만족	0		
\$DX\$9		제약조건4 목적함수	-1676.956522 \$DX\$9<=\$DZ\$9	부분적 만족	1676.956522		
\$DX\$10		제약조건5 목적함수	0 \$DX\$10<=\$DZ\$10	만족	0		
\$DX\$11		제약조건6 목적함수	0 \$DX\$11<=\$DZ\$11	만족	0		
\$DX\$12		제약조건7 목적함수	0 \$DX\$12<=\$DZ\$12	만족	0		
\$DX\$13		제약조건8 목적함수	0 \$DX\$13<=\$DZ\$13	만족	0		
\$DX\$14		제약조건9 목적함수	-0.47826087 \$DX\$14<=\$DZ\$14	부분적 만족	0.47826087		
\$DX\$15		제약조건10 목적함수	-1639.666667 \$DX\$15<=\$DZ\$15	부분적 만족	1639.666667		
\$DX\$16		제약조건11 목적함수	-2001.545455 \$DX\$16<=\$DZ\$16	부분적 만족	2001.545455		
\$DX\$17		제약조건12 목적함수	-0.473684211 \$DX\$17<=\$DZ\$17	부분적 만족	0.473684211		
\$DL\$3:\$DWS\$3=2진수							
\$K\$3:\$CJ\$3=2진수							

Fig.23 Microsoft office excel solver solution report (stochastic model)

**Table 8** Optimal Solution Based on the Stochastic Model

이름	계산 값
최적해 Xafeu	49000
최적해 Xafna	9410
최적해 Xaffe	6106
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	38043
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YM1eu	0
최적해 YM1na	3547
최적해 YM1fe	11500
최적해 YM2eu	0
최적해 YM2na	0
최적해 YM2fe	0
최적해 YM3eu	0
최적해 YM3na	0
최적해 YM3fe	0
최적해 YM4eu	0
최적해 YM4na	0
최적해 YM4fe	0
최적해 YP1eu	0
최적해 YP1na	0
최적해 YP1fe	0
최적해 YP2eu	9800
최적해 YP2na	6653
최적해 YP2fe	0
최적해 YP3eu	24500
최적해 YP3na	21953
최적해 YP3fe	17250
최적해 YP4eu	34300
최적해 YP4na	32153
최적해 YP4fe	28750
Overall profit : 1,710,165,441	

계산실험 결과, 시나리오별 시장수요와 유가를 고려하여 시장수요를 충족시키기 위하여 West Africa에서 1개, Gulf of Mexico에서 4개, Middle East의 2개의 production well을 가동하지 않았다. Crude oil의 수송은 West Africa에서 Europe으로 49,000,000 배럴, North America로 9,410,000 배럴, Far East로 6,106,000 배럴, Gulf of Mexico에서 North America로 38,043,000 배럴, 그리고 Middle East에서 Far East로 39,894,000 배럴이다. 재고는 발생하지 않았으며, 수송된 Crude oil의 양은 시나리오가 boom일 때, North America 시장수요의 3,547,000 배럴, Far East 시장수요의 11,500,000 배럴만큼 만족시키지 못하였다. 또한 시나리오가 good일 때 수송된 Crude oil의 양은 Europe 시장수요의 9,800,000 배럴, North America 시장수요의 6,653,000 배럴만큼 시장수용 초과분이 발생하였다. 시나리오가 fair일 때 Europe 시장수요의 24,500,000 배럴, North America 시장수요의 21,953,000 배럴, Far East 시장수요의 17,250,000 배럴만큼 초과분이 발생하였다. 시나리오가 poor일 때 Europe 시장수요의 34,300,000 배럴, North America 시장수요의 32,153,000 배럴, Far East 시장수요의 28,750,000 배럴만큼 초과분이 발생하였다. 추계적 모형에서 네 가지 시나리오를 고려한 이때의 최대 기대이익은 \$ 1,710,165,441이다.

#### 4.2.3 완전정보의 기대가치(The Expected Value of Perfect Information)

Birge et al.(1997)이 제시한 추계학적 모형의 해와 정보의 가치(The Value of Information and the Stochastic Solution)를 기준으로 결과를 분석하여보았다.

완전정보의 기대가치(EVPD)는 미래의 수요와 유가를 정확히 알 때의 결과와 추계학적 모형을 적용하였을 때 얻은 결과의 차이로 나타난다. 의사결정자가 사전에 유가와 수요에 관한 완전정보를 입수한다면, 입수

한 완전정보에 따라 Table 4, 5, 6, 7에 나타나 있는 최적해를 바탕으로 해양유전 가동여부에 관한 의사결정을 내릴 것이다. 장기적으로 경기상황이 boom일 때 0.1, good일 때 0.35, fair일 때 0.43, poor일 때 0.12의 확률로 나타난다고 가정하면, 의사결정자는  $\$2,405,772,738 \{(7378191590 * 0.1) + (3960163092 * 0.35) + (658228392 * 0.43) + (-9514260 * 0.12) = 8,221,640,531\}$ 의 기대이익을 얻게 될 것이다.

하지만 수요와 유가에 관한 완전한 사전 정보를 얻을 수가 없다. 따라서 최선의 의사결정은 미래의 수요와 유가를 시나리오 형태로 추계학적 모형을 적용하였을 때 기대이익인 \$ 1,710, 165,441이다. 이 두 기대이익의 차이인 \$695,607,298 (2,405,772,738- 1,710,165,441)를 완전정보의 기대가치[EVPI]라고 한다. 정확한 예측 정보를 통해 얻을 수 있는 효과로서 실질적으로 구현하기는 불가능하지만 추계학적 모형을 적용하더라도 극복할 수 없는 한계 값을 의미한다.

#### 4.2.4 확률적 변동을 고려하지 않은 평균값

확정적 모형에서 확률이 제일 높고, 유가가 현시점과 비슷한 시나리오가 fair일 때의 해양유전 및 유전선택을 시나리오별로 적용하였다.

**Table 9** Expected Profit based on Expected Production

이름	계산 값
최적해 Xafeu	49000
최적해 Xafna	15516
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	0
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894

최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YM1eu	0
최적해 YM1na	35484
최적해 YM1fe	17606
최적해 YP1eu	0
최적해 YP1na	0
최적해 YP1fe	0
Profit P1	5,342,693,810
최적해 Xafeu	49000
최적해 Xafna	15516
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	0
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 YM2eu	0
최적해 YM2na	35484
최적해 YM2fe	17606
최적해 YP2eu	0
최적해 YP2na	0
최적해 YP2fe	0
Profit P2	2,949,592,358
최적해 Xafeu	39016
최적해 Xafna	25500
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	0
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YM3eu	0
최적해 YM3na	0

최적해 YM3fe	0
최적해 YP3eu	14516
최적해 YP3na	0
최적해 YP3fe	11144
Profit P3	658,228,392
최적해 Xafeu	49216
최적해 Xafna	15300
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	0
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YM4eu	0
최적해 YM4na	0
최적해 YM4fe	0
최적해 YP4eu	34516
최적해 YP4na	0
최적해 YP4fe	22644
Profit P4	-2,827,810,886
Overall Expected profit : $(P1*0.1+P2*0.35+P3*0.43+P4*0.12)=$ \$ 1,510,327,608	

#### 4.2.5 추계적 해의 가치(The Value of Stochastic solution[VSS])

추계적 해의 가치는 추계적 모형을 적용하였을 때 얻은 결과와 가정된 시나리오 fair일 때 값을 통한 실제 기대이익 평균을 적용하여 얻는 결과를 그대로 적용할 때의 효과의 차이로써, 확률적 변동을 고려하지 않음으로 발생한 손실이다. Table 8 추계적 모형의 기대이익과 Table 9의 기대이익의 차이 \$199,837,832 (\$1,710,165,441-\$1,510,327,608=199,837,832)를 추계적 해의 가치(Value of Stochastic solution[VSSI])라고 한다. 미래 수요와 유가를 정확히 알지는 못하지만 현실적으로 추계학적 접근을 하였을 때 얻을 수 있는 실질적 효과이다.



#### 4.2.6 하위부분평균 강인한 최적화 모형

하위부분평균 강인한 최적화 모형구조에서는 추계적 모형에서 하위부분평균에 가중치  $\rho$ 를 곱한 값은 빼주어 기대치와 하위부분평균값의 변동간의 절충을 가늠하게 한다. 본 논문에서는 가중치  $\rho$ 값을 1으로 주었다.

Yaf1-1	Yaf2-1	Yaf3-1	Yaf4-1	Yaf5-1
Yus1-0	Yus2-0	Yus3-0	Yus4-0	
Yme1-1	Yme2-1	Yme3-1		

Fig.24 Field selection( RO-LPM)

Waf11-1	Waf12-1	Waf13-1	Waf14-0	Waf15-1	Waf16-1					
Waf21-1	Waf22-1	Waf23-1	Waf24-1	Waf25-1	Waf26-1	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	Waf510-1	
Wus11-0	Wus12-0	Wus13-0	Wus14-0	Wus15-0	Wus16-0					
Wus21-0	Wus22-0	Wus23-0	Wus24-0	Wus25-0						
Wus31-0	Wus32-0	Wus33-0	Wus34-0							
Wus41-0	Wus42-0	Wus43-0	Wus44-0	Wus45-0	Wus46-0	Wus47-0	Wus48-0			
Wme11-1	Wme12-1	Wme13-1	Wme14-1	Wme15-1	Wme16-1	Wme17-1	Wme18-0			
Wme21-1	Wme22-1	Wme23-1	Wme24-1	Wme25-0	Wme26-1	Wme27-1				
Wme31-1	Wme32-1	Wme33-1	Wme34-1							

Fig.25 Well selection (RO-LPM)

목표 셀 (최대값)		이름		계산값		
\$B\$3		최적해 목적함수(Max)		567,489,432		
제약 조건	셀	이름	셀의 값	수식	상태	조건과의 차
\$B\$22		제약조건17 좌변항 합계	49000	\$B\$22=\$E\$22	만족	0
\$B\$23		제약조건18 좌변항 합계	39200	\$B\$23=\$E\$23	만족	0
\$B\$24		제약조건19 좌변항 합계	24500	\$B\$24=\$E\$24	만족	0
\$B\$25		제약조건20 좌변항 합계	14700	\$B\$25=\$E\$25	만족	0
\$B\$26		제약조건21 좌변항 합계	51000	\$B\$26=\$E\$26	만족	0
\$B\$27		제약조건22 좌변항 합계	40800	\$B\$27=\$E\$27	만족	0
\$B\$28		제약조건23 좌변항 합계	25500	\$B\$28=\$E\$28	만족	0
\$B\$29		제약조건24 좌변항 합계	15300	\$B\$29=\$E\$29	만족	0
\$B\$30		제약조건25 좌변항 합계	27500	\$B\$30=\$E\$30	만족	0
\$B\$31		제약조건26 좌변항 합계	46000	\$B\$31=\$E\$31	만족	0
\$B\$32		제약조건27 좌변항 합계	28750	\$B\$32=\$E\$32	만족	0
\$B\$33		제약조건28 좌변항 합계	17250	\$B\$33=\$E\$33	만족	0
\$B\$34		제약조건29 좌변항 합계	0	\$B\$34<=\$E\$34	부불적 만족	5000
\$B\$35		제약조건30 좌변항 합계	0	\$B\$35<=\$E\$35	부불적 만족	5000
\$B\$36		제약조건31 좌변항 합계	0	\$B\$36<=\$E\$36	부불적 만족	5000
\$B\$37		제약조건32 좌변항 합계	8.00355E-11	\$B\$37=\$E\$37	만족	0
\$B\$38		제약조건33 좌변항 합계	0	\$B\$38=\$E\$38	만족	0
\$B\$39		제약조건34 좌변항 합계	2.91766E-09	\$B\$39=\$E\$39	만족	0
\$B\$6		제약조건1 좌변항 합계	-0.238095238	\$B\$6<=\$E\$6	부불적 만족	0.238095238
\$B\$7		제약조건2 좌변항 합계	-0.363636364	\$B\$7<=\$E\$7	부불적 만족	0.363636364
\$B\$8		제약조건3 좌변항 합계	0	\$B\$8<=\$E\$8	만족	0
\$B\$9		제약조건4 좌변항 합계	-1676.956522	\$B\$9<=\$E\$9	부불적 만족	1676.956522
\$B\$10		제약조건5 좌변항 합계	0	\$B\$10<=\$E\$10	만족	0
\$B\$11		제약조건6 좌변항 합계	0	\$B\$11<=\$E\$11	만족	0
\$B\$12		제약조건7 좌변항 합계	0	\$B\$12<=\$E\$12	만족	0
\$B\$13		제약조건8 좌변항 합계	0	\$B\$13<=\$E\$13	만족	0
\$B\$14		제약조건9 좌변항 합계	0	\$B\$14<=\$E\$14	만족	0
\$B\$15		제약조건10 좌변항 합계	-1639.666667	\$B\$15<=\$E\$15	부불적 만족	1639.666667
\$B\$16		제약조건11 좌변항 합계	-2001.345455	\$B\$16<=\$E\$16	부불적 만족	2001.345455
\$B\$17		제약조건12 좌변항 합계	-0.473684211	\$B\$17<=\$E\$17	부불적 만족	0.473684211
\$B\$18		제약조건13 좌변항 합계	-3622555574	\$B\$18<=\$E\$18	부불적 만족	3622555574
\$B\$19		제약조건14 좌변항 합계	-1483247147	\$B\$19<=\$E\$19	부불적 만족	1483247147
\$B\$20		제약조건15 좌변항 합계	-2.08989E-06	\$B\$20<=\$E\$20	부불적 만족	2.08989E-06
\$B\$21		제약조건16 좌변항 합계	-1.05314E-05	\$B\$21<=\$E\$21	부불적 만족	1.05314E-05
SC\$3:\$EA\$3=2진수						
K\$3:\$CJ\$3=2진수						

Fig.26 Microsoft office excel solver solution report(RO-LPM)

**Table 10** Robust Optimization with Lower partial mean

이름	계산 값
최적해 Xafeu	39016
최적해 Xafna	25500
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	0
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 D1	0
최적해 D2	0
최적해 D3	831,557,706
최적해 D4	4,365,185,379
최적해 YM1eu	9984
최적해 YM1na	25500
최적해 YM1fe	17606
최적해 YM2eu	184
최적해 YM2na	15300
최적해 YM2fe	6106
최적해 YM3eu	0
최적해 YM3na	0
최적해 YM3fe	0
최적해 YM4eu	0
최적해 YM4na	0
최적해 YM4fe	0
최적해 YP1eu	0
최적해 YP1na	0
최적해 YP1fe	0
최적해 YP2eu	0
최적해 YP2na	0
최적해 YP2fe	0
최적해 YP3eu	14516
최적해 YP3na	0
최적해 YP3fe	11144
최적해 YP4eu	24316
최적해 YP4na	10200



최적해 YP4fe	22644
Overall profit : 567,489,432	

네 가지 시나리오에 대해 West Africa의 생산유정 1개, Gulf of Mexico의 전체 생산유정, Middle East의 생산유정 2개를 가동하지 않았다. 석유의 수송은 West Africa에서 Europe으로 39,016,000 배럴, North America로 25,500,000 배럴, 그리고 Middle East에서 Far East로 39,894,000 배럴이다. 재고는 없으며, 시나리오 fair일 때 평균 기대이익보다 \$ 831,557,706 시나리오 poor일 때 평균 기대이익보다 \$ 4,365,185,379 낮은 실제이익이 발생한다. 시나리오가 boom일 때의 Europe 시장수요의 9,984,000배럴, North America 시장수요의 25,500,000 배럴, Far East 시장수요의 17,606,000 배럴 부족분이 발생한다. 시나리오가 good일 때의 Europe 시장수요의 184,000 배럴, North America 시장수요의 15,300,000 배럴, Far East 시장수요의 6,106,000 배럴 부족분이 발생한다. 시나리오가 fair일 때 Europe 시장수요의 14,516,000 배럴, Far East 시장수요의 11,144,000 배럴 초과분이 발생한다. 시나리오가 poor일 때 Europe 시장수요의 24,316,000 배럴, North America 시장수요의 10,200,000 배럴, Far East 시장수요의 22,644,000 배럴 초과분이 발생한다. 시장수요를 충족시키지 못한 부분은 외주비용을 지불하고 초과하는 부분은 보관비용을 지불하여 해양유정을 가동시키는 비용 등을 고려했을 때 위험을 줄일 수 있는 의사결정이다. 생산-수송된 석유가격에서 유정당 생산비용과 수송비, 재고비용 그리고 외주비용과 보관비용을 제한 순이익 \$567,489,432이다.

#### 4.2.7 하위부분평균 리코스 제한 최적화 모형

하위부분평균 리코스 제한 최적화 모형구조에서는  $\epsilon$ 값을 주면서 2단계 변수에 관한 한계를 조정한다. 여기서  $\epsilon$ 의 값은 881,392,059이다. 이는 위 식의 하위부분평균 강인한 최적화 모형에서 나온 값 D1, D2, D3, D4에 각각 시나리오별 확률을 곱하여 합한 값이다.

Yaf1-1	Yaf2-1	Yaf3-1	Yaf4-1	Yaf5-1
Yus1-0	Yus2-0	Yus3-0	Yus4-0	
Yme1-1	Yme2-1	Yme3-1		

Fig.27 Field selection( RR-LPM)

Waf11-1	Waf12-1	Waf13-1	Waf14-0	Waf15-1	Waf16-1				
Waf21-1	Waf22-1	Waf23-1	Waf24-1	Waf25-1	Waf26-1	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	Waf510-1
Wus11-0	Wus12-0	Wus13-0	Wus14-0	Wus15-0	Wus16-0				
Wus21-0	Wus22-0	Wus23-0	Wus24-0	Wus25-0					
Wus31-0	Wus32-0	Wus33-0	Wus34-0						
Wus41-0	Wus42-0	Wus43-0	Wus44-0	Wus45-0	Wus46-0	Wus47-0	Wus48-0		
Wme11-1	Wme12-1	Wme13-1	Wme14-1	Wme15-1	Wme16-1	Wme17-1	Wme18-0		
Wme21-1	Wme22-1	Wme23-1	Wme24-1	Wme25-0	Wme26-1	Wme27-1			
Wme31-1	Wme32-1	Wme33-1	Wme34-1						

Fig.28 Well selection (RR-LPM)

Table 11 Restricted Recourse with Lower partial mean

이름	계산 값
최적해 Xafeu	39016
최적해 Xafna	25500
최적해 Xaffe	0
최적해 Xuseu	0
최적해 Xusna	0
최적해 Xusfe	0
최적해 Xmeeu	0
최적해 Xmena	0
최적해 Xmefe	39894
최적해 Iaf	0
최적해 Ius	0
최적해 Ime	0
최적해 YM1eu	9984
최적해 YM1na	25500
최적해 YM1fe	17606

최적해 YM2eu	184
최적해 YM2na	15300
최적해 YM2fe	6106
최적해 YM3eu	0
최적해 YM3na	0
최적해 YM3fe	0
최적해 YM4eu	0
최적해 YM4na	0
최적해 YM4fe	0
최적해 YP1eu	0
최적해 YP1na	0
최적해 YP1fe	0
최적해 YP2eu	0
최적해 YP2na	0
최적해 YP2fe	0
최적해 YP3eu	14516
최적해 YP3na	0
최적해 YP3fe	11144
최적해 YP4eu	24316
최적해 YP4na	10200
최적해 YP4fe	22644
최적해 D1	0
최적해 D2	0
최적해 D3	831,557,706
최적해 D4	4,365,185,379
Overall profit : 1,448,881,491	

여기서  $\epsilon$ 의 값은 하위부분평균 강인한 최적화 모형에서 나온 값 D1, D2, D3, D4에 각각 시나리오별 확률을 곱하여 합한 값을 한계 값으로 설정하여 이는 하위부분평균 강인한 최적화 모형의 최적해와 일치하는 값을 가진다. 하위부분평균 리코스 제한 최적화 모형의 목적함수 최대값은 \$ 1,448,881,491으로  $\epsilon$ 의 값 \$ 881,392,059을 차감하면 하위부분평균 강인한 최적화 모형의 목적함수 최대값인 \$567,489,432와 일치한다. 2단계 변수에 관한 한계 값  $\epsilon$ 을 조정함으로써 최대값의 값은 달라질 수 있으며 이는 반드시 리코스 제한 모형의 최적해가 아닐 수 있다.

또한 하위부분평균 강인한 리코스 제한 최적화 모형은 한계 값 $\epsilon$ 에 대한 제약식을 추가함으로써 엑셀의 해 찾기 프로그램에서 하위부분평균 강인한 최적화 모형보다 해 찾기 시간이 더 오래 걸리고 반복횟수가 더 증가하여 해 찾기 프로그램에 부담이 증가한다.



## 제 5장 결론

### 5.1 결론

오늘날 해운경제는 과거보다 훨씬 복잡하고 그 예측이 점점 어려워지고 있다. 갑작스런 저유가의 시대가 찾아왔고 이는 2010년도부터 유가가 고공행진을 할 때 투기적 성격으로 해양플랜트 산업에 뛰어들어 많은 업체들과 국가들은 그 여파로 아직까지 위기에서 벗어나지 못하고 있다. 미래의 불확실성을 인지하지 못하고 지속적인 아둔한 선택으로 공급과잉과 부족이라는 사이클이 생성되고 있다.

이 논문은 예측하기 어려운 유가와 수요의 변화에서 위험에 견디는 강인성을 가진 해양 석유 생산계획을 수립하는 문제를 다루었다. 연구를 위해 해양 석유 생산 및 수송 최적화 문제에 관한 선행 연구를 살펴보았다. 기존의 해양 석유 생산 최적화 문제는 유가가 정해진 상태에서 시장 수요가 높을 때와 낮을 때의 두 가지 상황으로 나누어서 혼합정수계획모형을 이용하여 정식화되어 있음을 확인할 수 있었다. 그런데 국제 경기의 흐름을 반영하는 유가와 수요의 변화에 대해서 해양 석유 생산 최적화계획을 수립하는 연구가 부족하였다.

기존 연구의 이러한 한계점을 해결하기 위해 추계적 모형(stochastic program)을 사용하여, 경제 상황에 따른 시나리오를 기반으로 강인한 최적화 모형과 리코스 제한 최적화 모형을 사용하고 리코스 이익의 변동 척도로 하위부분평균을 사용한 모형을 제안하였다. 해양 유전을 선택하는 문제에 대해서는 0-1 정수변수계획법을 사용하였다. 계산실험에는 Ms Office Excel에는 'Frontline System'이 개발한 해 찾기(solver)라는 프로그램을 사용하였다.

계산실험 결과 제안된 최적화모형은 불확실한 유가와 수요의 변동에 견디는 강인한 해양 석유 생산 계획을 도출해 주었고, 위험에 견디는 안정성과 수익성을 고려한 의사결정을 내릴 수 있음을 입증하였다. 이러한 추계적 최적화 모형을 통해 고유가의 시대일 때, 여러 경제 상황을 고려하여 해양플랜트 광구개발에 투자를 하였다면 위험을 줄이고 미래를 대비할 수 있었으리라 사료된다.

본 연구에서는 불확실성을 고려한 해양석유생산 최적화를 위한 추계적 모형을 소개하였다. 본 연구를 통해 얻을 수 있는 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 해양 석유 생산에 관한 유정의 가동여부는 수요와 유가의 불확실성을 고려하지 않고는 현실적인 대안을 도출하기에 어려움이 있다. 이를 효과적으로 대처하기 위해서는 폭넓은 이해와 식견을 갖고 문제의 특성에 맞는 모형을 수립하고 현실에 맞게 적용하여야 할 것이다. 이를 위해서는 해양플랜트 산업의 해양 석유 생산시스템 모델링에 관련된 여러 전문가의 학제적인 연구를 활성화하여 불확실성을 고려한 다양한 모델링 기법들을 수립하고 이해의 폭을 넓혀야 한다.

둘째, 문제의 특성에 맞는 추계적 모형을 개발하기 위한 노력이 요구된다. 추계적 해의 가치는 추계학적 모형에서 확정적 모형보다 정보의 가치를 효과적으로 활용할 수 있음을 보여 주었다. 이와 같은 노력은 해양 플랜트의 개발과 운영계획 문제에도 적용하기 위한 노력이 요구된다.

셋째, 유가 변동의 예측 정확도의 증대 및 활용기반을 구축하여야 한다. 추계적 모형은 시나리오의 구성 및 예측에 그 효과가 상당부분 차지한다. 따라서 해양플랜트 산업의 변화와 경제 상황 예측 정보를 활용하여 정확한 유가의 변동을 예측하기 위한 지속적인 연구와 검증체계를 구축하여야 한다.



## 5.2 향후 과제

에너지 부족 문제가 전혀 해소되지 않았음에도 불구하고 국제유가의 하락으로 수익을 남길 수 없기 때문에 해양플랜트 설비 제작 발주가 없고, 해양 E&P의 프로젝트 발주량도 하락하고 있다. 또한 해양유정의 가동도 멈추고 rig들도 cold-stacked 상태나 dead-stacked 상태 그리고 해체가 되어 rig의 가동률이 하락세를 보이고 있다.

하지만 2016년 현재 화석연료(석탄, 석유, 천연가스)가 전 세계 에너지 자원의 약 80%를 차지하고 있고, 석탄자원의 활용 제한으로 화석연료의 비중이 감소하겠지만 나머지 화석연료의 비중은 전체 60% 이상으로 여전히 주종을 이룰 것이고 2050년 이후까지도 에너지 자원의 주종을 이룰 석유, 천연가스 등 화석연료의 충분한 확보가 필수적이다.

석유, 천연가스뿐만 아니라 가스하이드레이트(Gas Hydrate) 등 자원이 풍부한 심해저의 해양플랜트 산업은 에너지 부족 문제 해소에 필수 핵심 산업이다. 따라서 현재 저유가 시대에 수익을 남길 수 없다는 이유 하나로 의사결정을 내리는 것이 아니라 불확실한 여러 요소를 고려한 경영 과학적 접근 또한 필수이다.

본 논문에서는 불확실한 요소로 유가와 수요만 고려하였지만 향후 연구방향으로는 유가와 수요뿐 아니라 해양석유생산에 영향을 미치는 다양한 불확실성을 고려한 추계적 모형의 개발과 해양 석유 생산-수송의 관계에서 정제단계를 추가한 모형에 대한 연구도 제안 할 수 있다. 또한 불확실성과 함께 여러 상충되는 목적 및 구성 요소들 간의 타협, 조정을 위한 다목적 특성을 고려한 최적화 기법을 통해 의사결정을 내릴 수 있다면 더욱 의미 있는 연구가 될 것이다.



## 참고문헌

### [국내문헌]

김시화, 부정기선 해운의 해사수송 문제에 대한 최적화 기반 의사결정 지원시스템. 박사학위논문. 부산:부산대학교(1999)

김시화, *살림경영경제수학*, 세종출판사.(2013)

김세헌, *현대경영과학*, 무역경영사.(2008)

김창수, *해양 석유 생산 및 최적화 문제에 관한 연구* 석사학위논문, 부산:한국해양대학교(2015)

박나래, *평균-분산 최적화 모형을 이용한 로버스트 선박운항일정계획*. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.(2014)

### [국외문헌]

Birge, J.R. 1982. The value of the stochastic solution in stochastic linear programs with fixed recourse, *Mathematical Programming* 24 314-325

Dantzig, G.B. 1995, Linear programming under uncertainty, *Management Science* 1 197-206.

Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J., Zenios, S.A. 1995. Robust optimization of large-scale systems, *Operation Research* 43(2) 264-281.

Mulvey, J.M., Ruszczyński, A. 1995. A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization, *Operation Research* 43(3) 477-490.

Vladimirou, H., Zenios, S.A. 1997. A stochastic linear programs with restricted recourse, *Eur.J.Opre.Res.* 101-177

Sahinidis, N.V. 1998. Robust process planning under uncertainty, *Ind. Eng.*

Chem. Res. 37 1883-1892

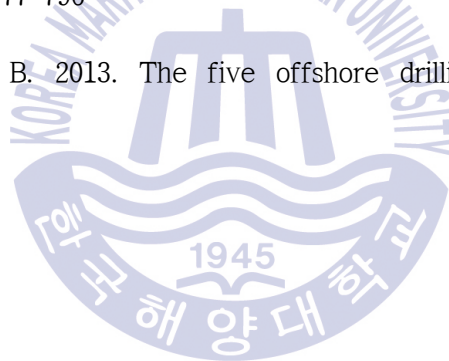
Barnes, R. J., Kokossis, A. 2007. A mathematical programming approach to the analysis, design and scheduling of offshore oilfields. *17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering-ESCAPE17*

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

Yu, Chian-son., Li, Han-Lin. 2000. A robust optimization model for stochastic logistic problems, *Int. J. Production Economics* 64 385-397

Ribas, G. P., Hamacher, S. & Street, A. 2010. Optimization under uncertainty of the integrated oil supply chain using stochastic and robust programming, *Intl. Trans. in Op. Res.* 17 777-796

Kaiser, M. J., Snyder, B. 2013. The five offshore drilling rig markets, *Marine Policy* 39 201-214



## 감사의 글

먼저 석사 과정 동안 넓은 아량으로 부족한 저를 연구생으로 받아주시고, 연구방향을 제시해 주신 김시화 교수님께 이 지면을 통해 감사와 존경을 표합니다. 경영과학 분야에 대해 아는 것이 없었던 저에게 흥미를 가질 수 있도록 하나부터 열까지 가르쳐 주시고 힘들어 하던 저를 다시 일어설 수 있게 용기와 위로를 아끼지 않으셨던 교수님은 저의 인생의 참된 스승이셨습니다. 그 가르침을 잊지 않도록 노력하겠습니다. 그리고 논문 심사를 맡아주셔서 소중한 충고와 조언을 해주셨던 조성철 교수님, 김태균 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

해양플랜트 분야에 대한 지식과 경험이 없던 저에게 많은 가르침과 도움을 주신 김창수 선배님께도 감사드립니다. 멀리 타국에 나가계셔도 저의 질문에 항상 대답해주시고 아낌없이 조언을 해 주셔서 감사드립니다. 또한 동문수학하며 석사과정 처음부터 도와주신 임상섭, 박나래, 김정민 선배님께도 감사드립니다. 대학교시절부터 늘 함께 길을 같이 걸어온 사랑하는 친구 문주에게도 감사하며 지금처럼 서로에게 힘이 되어주고 기대면서 소중한 인연의 끈을 이어가고 싶습니다.

처음에는 석사과정 2년이 길게 느껴져 시간이 많이 남아있다고 생각을 했지만, 일과 병행하면서 공부를 하다 보니 공부에 더 집중하지 못한 점이 많이 아쉬웠습니다. 하지만 석사과정 중 대학교 졸업 후 다시 시작한 공부에 흥미를 느끼게 되었고, 계속 공부를 해 보고 싶은 마음이 들게 되었습니다. 하나의 작은 시작이 여러 다른 길의 문을 열어볼 기회를 만들어 주었다고 생각합니다. 이 소중한 기회를 붙잡아 한 곳에 머물지 않고 한걸음씩 나아가겠습니다.

성실함을 아버지로부터 배웠고, 남을 배려하는 마음과 이해심을 어머니로부터 배웠습니다. 자식들에게 항상 좋은 것만 주시고 사랑으로 키우신 부모님께 항상 감사드립니다. 장녀로서 책임감을 느끼면서 지냈을 사랑하는 언니에게도 미안하면서 감사합니다. 또한 운동선수로서 하루하루 훈련하고 시합 나가면서 고된 삶을 살고 있지만 꿈을 향해서 노력하는 사랑하는 우리 동생 주영에게도 늘 고맙고 잘 챙겨주지 못해 미안합니다. 흘린 땀의 노력은 배신을 하지 않기에 좋은 결실을 맺을 수 있을 때까지 좀 더 힘을 다 같이 냅시다.

사랑하는 예비신랑 James Flowers에게도 감사드립니다. 늘 옆에서 응원해 주고 같이 고민을 나눌 수 있어서 큰 힘이 되었습니다. 이제는 서로에게 없어서는 안 될 존재로 서로 부족하고 다른 부분을 보듬어주고 이해하면서 지금처럼 행복하게 서로를 아끼고 사랑합시다.

마지막으로 제일 중요한 하나님의 은혜에 감사드립니다. 여기까지 올 수 있었던 건 혼자 힘 아닌 하나님께서 늘 보호하여 주시고 이끌어 주신 은혜였습니다. 지금도 살아계신 하나님 아버지께 모든 영광을 올려드립니다. 감사합니다.