



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

석유물류네트워크의 로버스트 추계적 최적화 모형

A Robust Stochastic Optimization Model for Petroleum Logistic Network



지도교수 김 시 화

2018년 8월

한국해양대학교 대학원

해운경영학부

김 문 주

본 논문을 김문주의 경영학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 조성철 (인)

위원 김태균 (인)

위원 김시화 (인)

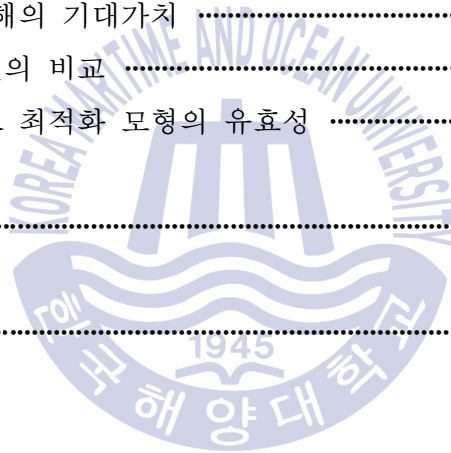
2018년 6월

한국해양대학교 대학원

목 차

| | |
|---------------------------|------|
| List of Tables | iii |
| List of Figures | vii |
| Abstract | viii |
| | |
| 1. 서론 | 1 |
| 2. 석유물류네트워크 문제 | |
| 2.1 정유산업의 이해 | 3 |
| 2.2 석유물류네트워크 | 7 |
| 2.3 선행연구 | 9 |
| 3. 문제의 정식화 | |
| 3.1 확정적 모형의 정식화 | 10 |
| 3.2 2단계 추계적 모형의 정식화 | 12 |
| 3.3 로버스트 최적화 모형 | 16 |
| 3.3.1 RO 모형 | 16 |
| 3.3.2 RR 모형 | 20 |

| | |
|------------------------|----|
| 4. 계산실험 및 결과 검토 | |
| 4.1 자료 준비 | 22 |
| 4.2 계산실험 | 23 |
| 4.2.1 확정적 모형 | 23 |
| 4.2.2 2단계 추계적 모형 | 34 |
| 4.2.3 로버스트 최적화 모형 | 41 |
| 4.3 실험결과 검토 | 53 |
| 4.3.1 민감도 분석 | 53 |
| 4.3.2 완전정보의 기대가치 | 58 |
| 4.3.3 추계적 해의 기대가치 | 59 |
| 4.3.4 정제마진의 비교 | 61 |
| 4.3.5 로버스트 최적화 모형의 유효성 | 62 |
| 5. 결론 | 64 |
| 참고문헌 | 66 |



List of Tables

| | | |
|-----------------|--|----|
| Table 1 | World' s largest refineries | 5 |
| Table 2 | World' s Conversion Capacity | 6 |
| Table 3 | Constraint of Crude supply(B/D) | 23 |
| Table 4 | Maximum throughput at refinery(B/D) | 23 |
| Table 5 | Product costs(\$/B)_S1 | 24 |
| Table 6 | Distribution costs(\$/B)_S1 | 24 |
| Table 7 | Demand of market_S1 | 24 |
| Table 8 | Demand of hinterland | 24 |
| Table 9 | MS Excel Solver Optimal Solution_S1 | 24 |
| Table 10 | Optimal Solution : Crude supply_S1 | 25 |
| Table 11 | Optimal Solution : Refining process_S1 | 26 |
| Table 12 | Optimal Solution : Distribution amount_S1 | 26 |
| Table 13 | Optimal Solution : Short of demand_S1 | 27 |
| Table 14 | Optimal Solution : Inventory of product_S1 | 27 |
| Table 15 | Product costs(\$/B)_S2 | 27 |
| Table 16 | Distribution costs(\$/B)_S2 | 27 |
| Table 17 | Demand of market_S2 | 28 |
| Table 18 | MS Excel Solver Optimal Solution_S2 | 28 |
| Table 19 | Optimal Solution : Crude supply_S2 | 29 |
| Table 20 | Optimal Solution : Refining process_S2 | 29 |

List of Tables

| | | |
|-----------------|---|----|
| Table 21 | Optimal Solution : Distribution amount_S2 | 30 |
| Table 22 | Optimal Solution : Short of demand_S2 | 30 |
| Table 23 | Optimal Solution : Inventory of product_S2 | 30 |
| Table 24 | Product costs(\$/B)_S3 | 31 |
| Table 25 | Distribution costs(\$/B)_S3 | 31 |
| Table 26 | Demand of market_S3 | 31 |
| Table 27 | MS Excel Solver Optimal Solution_S3 | 31 |
| Table 28 | Optimal Solution : Crude supply_S3 | 32 |
| Table 29 | Optimal Solution : Refining process_S3 | 33 |
| Table 30 | Optimal Solution : Distribution amount_S3 | 33 |
| Table 31 | Optimal Solution : Short of demand_S3 | 34 |
| Table 32 | Optimal Solution : Inventory of product_S3 | 34 |
| Table 33 | MS Excel Solver Optimal Solution_Stochastic | 34 |
| Table 34 | Optimal Solution : Crude supply_Stochastic | 36 |
| Table 35 | Optimal Solution : Refining process_Stochastic | 37 |
| Table 36 | Optimal Solution : Distribution amount_Stochastic_S1 | 37 |
| Table 37 | Optimal Solution : Short of demand_Stochastic_S1 | 38 |
| Table 38 | Optimal Solution : Inventory of product_Stochastic_S1 | 38 |
| Table 39 | Optimal Solution : Distribution amount_Stochastic_S2 | 39 |
| Table 40 | Optimal Solution : Short of demand_Stochastic_S2 | 39 |

List of Tables

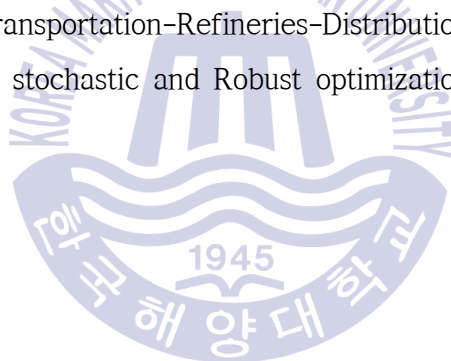
| | | |
|-----------------|---|----|
| Table 41 | Optimal Solution : Inventory of product_Stochastic_S2 | 39 |
| Table 42 | Optimal Solution : Distribution amount_Stochastic_S3 | 40 |
| Table 43 | Optimal Solution : Short of demand_Stochastic_S3 | 40 |
| Table 44 | Optimal Solution : Inventory of product_Stochastic_S3 | 40 |
| Table 45 | Solution of Robust optimization with upper partial mean($\rho=0.5$) | 41 |
| Table 46 | Solution of Robust optimization with upper partial mean($\rho=1.0$) | 43 |
| Table 47 | Solution of Robust optimization with upper partial mean($\rho=2.0$) | 44 |
| Table 48 | Comparison of Robust optimization model with differential weight | 46 |
| Table 49 | Solution of restricted recourse with upper partial mean($\epsilon=1,874,164$) | 47 |
| Table 50 | Optimal Solution : Crude supply_RO, RR | 49 |
| Table 51 | Optimal Solution : Refining process_RO, RR | 50 |
| Table 52 | Optimal Solution : Distribution amount_RO, RR(S1) | 50 |
| Table 53 | Optimal Solution : Short of demand_RO, RR(S1) | 51 |
| Table 54 | Optimal Solution : Inventory of product_RO, RR(S1) | 51 |
| Table 55 | Optimal Solution : Distribution amount_RO, RR(S2) | 51 |
| Table 56 | Optimal Solution : Short of demand_RO, RR(S2) | 52 |
| Table 57 | Optimal Solution : Inventory of product_RO, RR(S2) | 52 |
| Table 58 | Optimal Solution : Distribution amount_RO, RR(S3) | 52 |
| Table 59 | Optimal Solution : Short of demand_RO, RR(S3) | 53 |
| Table 60 | Optimal Solution : Inventory of product_RO, RR(S3) | 53 |

List of Tables

| | | |
|-----------------|---|----|
| Table 61 | Range of Optimality : Crude supply | 54 |
| Table 62 | Range of Optimality : Refining process | 55 |
| Table 63 | Range of Optimality : Distribution amount | 55 |
| Table 64 | Range of Optimality : Inventory of product | 56 |
| Table 65 | Range of Feasibility : Crude supply | 56 |
| Table 66 | Range of Feasibility : Maximum throughput at refinery | 57 |
| Table 67 | Range of Feasibility : Demand of market | 57 |
| Table 68 | Range of Feasibility : Demand of hinterland | 58 |
| Table 69 | Optimal Solution_using mean value on 1st stage solution | 59 |
| Table 70 | Refining margins : Deterministic | 61 |
| Table 71 | Refining margins : Stochastic | 62 |
| Table 72 | Refining margins : Randomness | 62 |
| Table 73 | Comparison of stochastic model and Robust optimization model | 63 |

List of Figures

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Data of Crude oil, Gasoline, Complex margin (\$/B) | 1 |
| Fig. 2 Refined oil products production (Source : Enerdata) | 3 |
| Fig. 3 Basic Refining Concepts (Source : Valero) | 4 |
| Fig. 4 High Conversion (Source : Valero) | 5 |
| Fig. 5 Regional refining margins(\$/barrel/quarter) (Source : BP) | 7 |
| Fig. 6 Network of Transportation-Refineries-Distribution | 8 |
| Fig. 7 Comparison of stochastic and Robust optimization model | 63 |



<국문초록>

석유물류네트워크의 로버스트 추계적 최적화 모형

김 문 주

해운경영학과
한국해양대학교 대학원

초록

다수의 원유 선적항으로부터 여러 정유공장으로 수송된 원유를 정제하여 생산한 제품유를 글로벌 수요시장으로 배분하는 석유물류네트워크의 최적화는 글로벌 석유 메이저의 중요한 의사결정문제이다. 이 논문은 제품유 시장의 가격, 수송비 및 수요 변동의 영향을 반영하여 원유 수송, 정제 및 제품유 배분을 최적화하기 위한 석유물류네트워크의 로버스트 추계적 모형을 제시한다. 계산실험은 제품유 시장의 가격, 수송비 및 수요 변동에 관한 시나리오 기반의 데이터를 사용하여 최적화 모형에 적용하였으며, 그 결과를 바탕으로 제시한 최적화 모형의 유용성과 타당성을 검증하여 보고하였다.

KEY WORDS: Global major oil company 글로벌 석유 메이저; Petroleum logistic network 석유물류네트워크; Refinery plants 정유 공장; Stochastic model 추계적 모형; Robust optimization model 로버스트 최적화 모형

<영문초록>

A robust stochastic optimization model for petroleum logistic network

Moonjoo Kim

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

Abstract

It is important for major oil companies to make decisions about the optimization of two-stage petroleum logistic networks which transport crude oil from loading sources to various other refineries and distribute them to the global market to satisfy demand. In this paper, a robust stochastic model of the petroleum logistics network is presented for optimized transportation refining distribution reflecting the effects of price, cost and demand fluctuations in the product market. Calculation experiments were applied to the optimization model using scenario-based data on price, cost and demand fluctuations in the product market. Based on the results, the validity of the proposed optimization model is verified and reported.

KEY WORDS: Global major oil company 글로벌 석유 메이저; Petroleum logistic network 석유물류네트워크; Refinery plants 정유 공장; Stochastic model 추계적 모형; Robust optimization model 로버스트 최적화 모형

제 1 장 서 론

오래전부터 국제적으로 정유업계는 많은 수익성 변동의 위험에 직면해왔다. 원유의 공급, 제품유의 지역별, 계절별, 경제적 요인으로 인한 수요 등의 변동에 따라 정유회사의 정확한 이익 예측은 어려운 실정이다.

정유회사의 이익은 석유 제품 가격에서 원유 가격과 수송, 정제, 운영, 원자재비용 등의 차이인 정제마진에 의해 결정되는데 그림 Fig.1의 5년간 두바이 유 가격, 가솔린 가격, 싱가포르 복합정제마진의 스프레드 추이를 바라보면 원유가와 제품유가의 상관관계는 존재하지만 이와 다르게 정제 마진은 변동이 많은 것을 확인 할 수 있다.

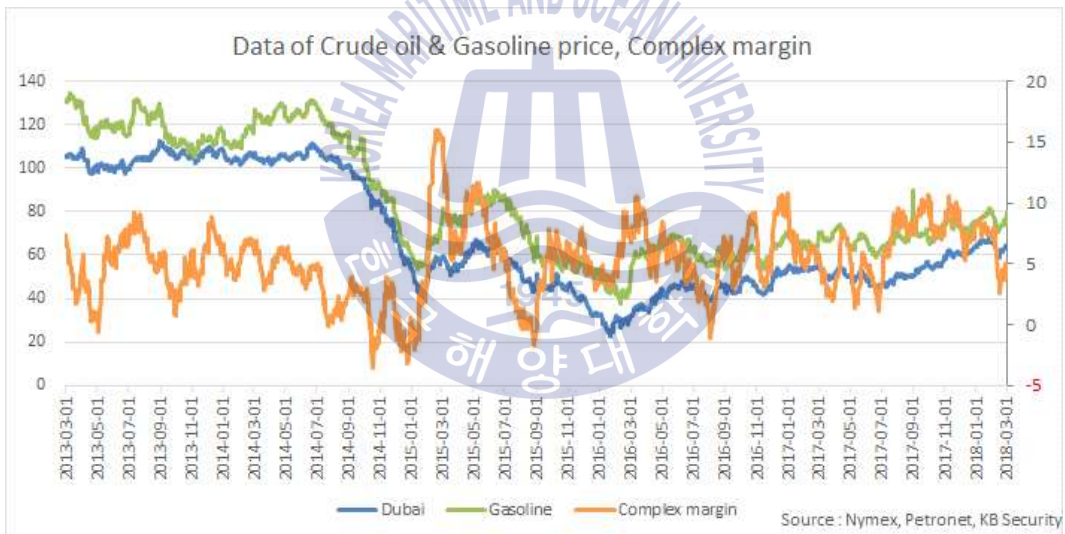


Fig. 1 Data of Crude oil & Gasoline price (\$), Complex margin (\$/B)

국내 정유회사의 영업실적을 살펴보면 정제마진의 예측이 어려움을 알 수 있다. 2014년 당시 배럴당 100달러였던 유가가 불과 석달 사이 50달러 선으로 추락하면서 정유업계는 급격한 수익하락에 직면하여 고유가에 들어온 원유를 정제한 석유제품들을 낮은 가격에 매도하는 등 영업적자를 나타냈다. 그러나 2015년 국내 정유사는 유가하락에 따른 매출액 감소에도 불구하고 수요의 증가로 인해 정제마진이 확대되며 흑자 영업이익을 실현했다. 한편, 기존 병커유의

황산화물(SOx)함유 기준을 낮게 강화하는 국제해사기구(IMO)의 정책변화로 선박 연료를 대체하여 액화천연가스(LNG)를 사용하는 선박이 증가한 추세도 영향을 미쳤다. 전기자동차, 태양광 자동차, 연료전지 자동차 등 친환경 자동차의 수요 증가 기대감 때문에 전 세계적으로 정제설비 확충이 미진한 가운데 제품 공급이 수요를 따라가지 못한 점도 정제마진의 확대에 기여했다.

또한, 원유는 지역별, 나라별 등에 따라 여러 종류로 구분되며 유종별 색깔, 점도, 황 함유량 등이 다양하기 때문에 각 원유를 정제하면 제품유의 생산비율도 다양하게 나타난다. 생산된 제품유가 각 나라별 수요에 알맞게 판매, 공급되려면 의사결정의 최적화는 필수이다.

이처럼 석유회사의 이익은 여러 요인들의 변화와 수요에 민감하다. 급변하는 시장 속에서 석유회사는 변동에 대한 지속적인 최적의 의사결정을 내릴 수 있어야 한다. 따라서, 석유물류네트워크의 로버스트 추계적 최적화 모형의 필요성을 제기한다.

본 논문에서는 제품유 시장 가격 및 수송비용과 수요 변동의 시나리오 기반의 데이터를 이용하여 원유 수송, 정제 후 제품유 분배의 최적화를 위한 석유물류네트워크의 로버스트 추계적 모형을 제시해 보고자 한다.

제2장에서는 정유산업의 이해, 석유물류네트워크에 대해 소개하며 선행연구에 대하여 살펴보았다. 제3장에서는 석유물류 네트워크 문제의 정식화를 통해 확정적 모형, 2단계 추계적 모형, 로버스트 추계적 최적화 모형을 기술하였다. 제4장에서는 계산실험의 결과 및 분석을 시행하였고 정식화된 모형의 유효성을 입증하였다. 마지막 제5장에서는 결론과 앞으로의 연구 과제를 제시하고자 한다.

제 2 장 석유물류네트워크 문제

2.1 정유산업의 이해

에너지 정보 서비스 회사인 에너데이터(Enerdata)의 세계 에너지 통계 2017 자료에 따르면 2016년 정제석유제품에 관한 국가별 총 생산량은 다음과 같다.

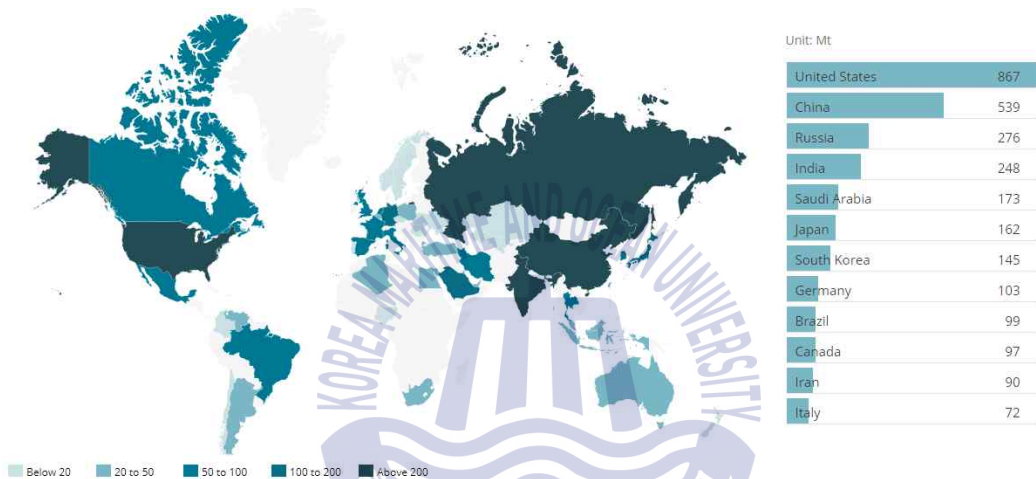


Fig. 2 Refined oil products production (Source : Enerdata)

우리나라 및 일본의 경우, 석유가 생산 되지 않는 나라임에도 불구하고 정제 석유제품 생산량이 세계적으로 상위 순위에 위치해 있다. 이는 고도화 시설을 이용하여 원유를 정제하기 때문이다.

원유를 저가에 구매하여 정제과정을 거쳐 이윤을 남겨도 산유국에서 직접 원유를 생산하고 정제하여 판매하는 것과 비교했을 때 원가경쟁력은 낮다. 하지만 고부가가치의 제품유들을 다량 생산할 수 있는 기술력을 갖춘 고도화 시설을 확보하면 원유를 정제할 때 고부가가치의 제품유를 많이 생산할 수 있다. 따라서 원유를 수입하여 고도화 공정을 통한 정제를 하게 되면 원유가 직접 생산되지 않더라도 정유산업에서 큰 경쟁력을 확보할 수 있다.

정유공정은 크게 증류공정(topping), 수첨개질공정(hydroskimming), 고도화공정

(conversion)공정으로 분류할 수 있다.

증류공정은 상압증류탑(crude distillation unit)을 거치게 되는 원유의 끓는점 차이를 이용한 단순 증류를 하는 공정이다. 단순 증류 후에 수첨개질공정의 과정을 거치게 되는데 이는 증류공정에서 나온 1차 제품들의 품질을 향상시키기 위한 공정으로 수소를 첨가하여 황과 같은 제품 속 불순물을 제거하는 수소처리공정(treating)과, 상압증류탑에서 나온 납사(naphtha)를 백금계 촉매를 이용하여 벤젠, 톨루엔 등의 화학제품을 제조하기 위한 방향족(aromatic)추출 혹은 고옥탄(high octane)의 휘발유 등의 고부가가치제품으로 전환하는 접촉개질공정(catalytic reforming)으로 구성된다.

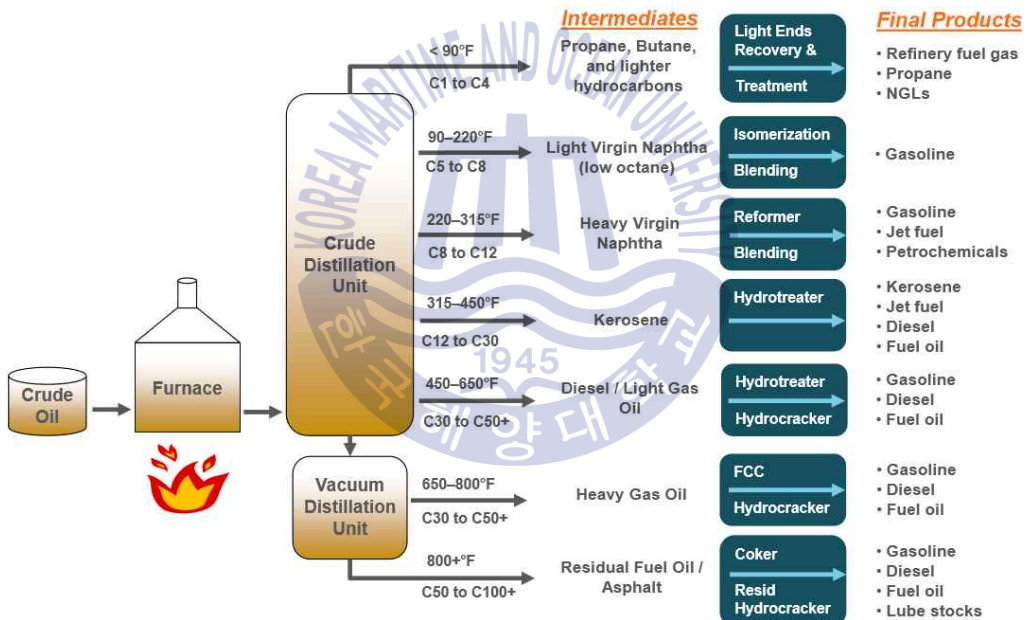


Fig. 3 Basic Refining Concepts (Source : Valero)

고도화공정은 증류공정, 수첨개질공정을 거쳤지만 가격이 낮은 중질유들의 탄소 결합을 분해하여 가격이 높은 경질유로 만드는 고부가가치의 정유공정이다. 고도화 공정의 종류로는 가장 오래된 방법인 단순 고온, 고압에서 분해하는 열분해(thermal cracking)를 이용한 중질유 분해(delayed coker), 일반적으로 제올라이트라는 촉매와 반응시켜 분해하는 접촉분해(fluid catalytic cracking), 다

량의 수소를 첨가하여 촉매층(catalyst bed)에 함께 작용하여 분해하는 수침분해 (hydrocracking)와 같은 공정이 있다.

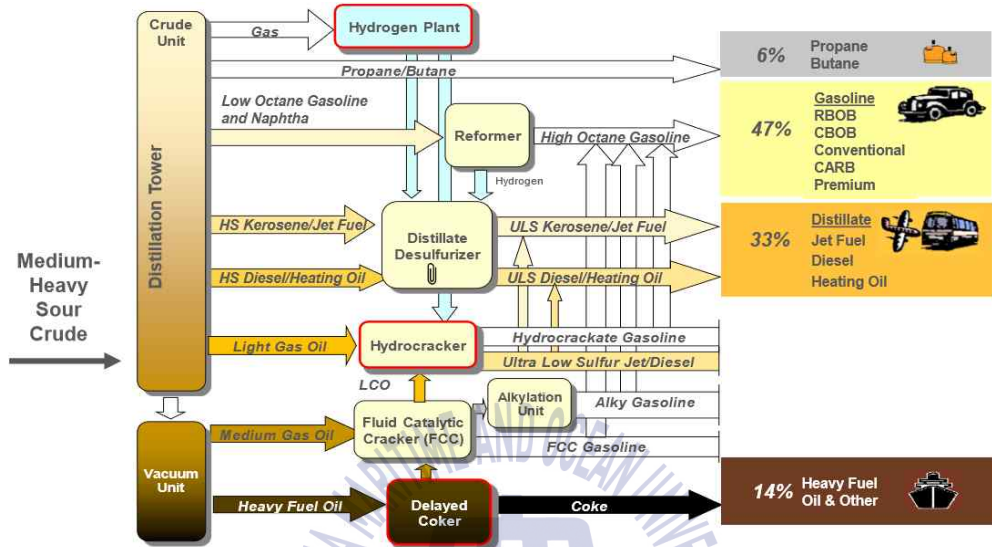


Fig. 4 High Conversion (Source : Valero)

Table 1의 전 세계적 단위 공장별 원유 정제 시설 규모를 보면 우리나라의 정제시설 규모가 전 세계적으로 상위에 위치하는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 World's largest refineries (source : Oil&Gas Journal, EIA)

| No | Name of refinery | Location | Capacity (1000B/D) |
|----|--|--------------------|--------------------|
| 1 | Jamnagar Refinery (Reliance Industries) | India | 1,240 |
| 2 | Paraguana Refinery Complex (PDVSA) | Venezuela | 940 |
| 3 | SK Energy Ulsan Refinery (SK Energy) | South Korea | 850 |
| 4 | Ruwais Refinery (Abu Dhabi National Oil Company) | UAE | 817 |
| 5 | Yeosu Refinery (GS Caltex) | South Korea | 730 |
| 6 | Onsan Refinery (S-Oil) | South Korea | 669 |
| 7 | Jurong Island Refinery (ExxonMobil) | Singapore | 605 |
| 8 | Port Arthur Refinery (Saudi Aramco) | United States | 603 |
| 9 | Galveston Bay Refinery (Marathon Petroleum) | United States | 571 |
| 10 | Baytown Refinery (ExxonMobil) | United States | 561 |

Table 2의 대한석유협회의 주요국의 고도화 시설 보유현황을 살펴보면 우리나라의 고도화 정제 비율 또한 상당한 것을 확인할 수 있다.

Table 2 World' s Conversion Capacity (source : Oil&Gas Journal)

| No | Country | Refining capacity (1000B/D) | Topping capacity (1000B/D) | Conversion capacity (1000B/D) | | | | Conversion capacity (%) |
|----------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|----------------|------------|-------------------------|
| | | | | Thermal cracking | FCC | Hydro-cracking | Total | |
| 1 | U.S.A | 28,952 | 18,458 | 2,700 | 5,509 | 2,285 | 10,494 | 56.9 |
| 2 | China | 11,700 | 9,701 | 418 | 1,031 | 550 | 1,998 | 20.6 |
| 3 | Russia | 5,994 | 5,122 | 403 | 365 | 104 | 871 | 17.0 |
| 4 | India | 5,668 | 4,751 | 242 | 508 | 166 | 916 | 19.3 |
| 5 | Japan | 4,757 | 3,817 | 96 | 773 | 71 | 940 | 24.6 |
| 6 | South korea | 3,684 | 2,959 | 19 | 367 | 339 | 725 | 24.5 |
| 7 | Saudi Arabia | 3,337 | 2,907 | 191 | 104 | 135 | 430 | 14.8 |
| 8 | Germany | 3,091 | 2,189 | 363 | 348 | 191 | 902 | 41.2 |
| 9 | Canada | 2,969 | 2,058 | 182 | 492 | 237 | 911 | 44.3 |
| 10 | Italy | 2,968 | 2,117 | 233 | 242 | 375 | 850 | 40.2 |

정유회사의 이익지표는 정제마진이다. 정제마진의 종류는 단순정제마진과 복합정제마진이 있다. 단순정제마진은 상압증류탑의 정유제품 생산비율에 따라 가장 평균한 제품유 가격과 원유, 기타 원가와와의 차이를 말하며, 복합정제마진은 최종적으로 판매되는 정유제품의 비율로 가장 평균한 제품가격과 원유, 기타 원가와와의 차이를 말한다. 일반적으로 복합정제마진은 고도화공정이 반영되었기 때문에 단순정제마진보다 높게 형성된다.

정제마진의 특성은 영국의 석유회사인 BP의 지역별 석유정제마진 자료인 Fig. 5를 통해 살펴볼 수 있다. BP의 지역별 석유 정제마진은 미국 동부 연안(USCG), 북서유럽(NWE)의 기준인 네덜란드 로테르담, 싱가포르에 위치해있는 3 종류의 정유공장을 대표로 한 자료이다. 자료의 기준은 지역적 특성을 반영한 단일의 원유를 투입하며, 각 원유에 최적화된 정제방법(coking, cracking,

hydrocracking)을 사용하였다. 이를 살펴보면 정제마진이 지역별로 다양한 특성에 의해서도 변동이 많은 것을 확인할 수 있다.

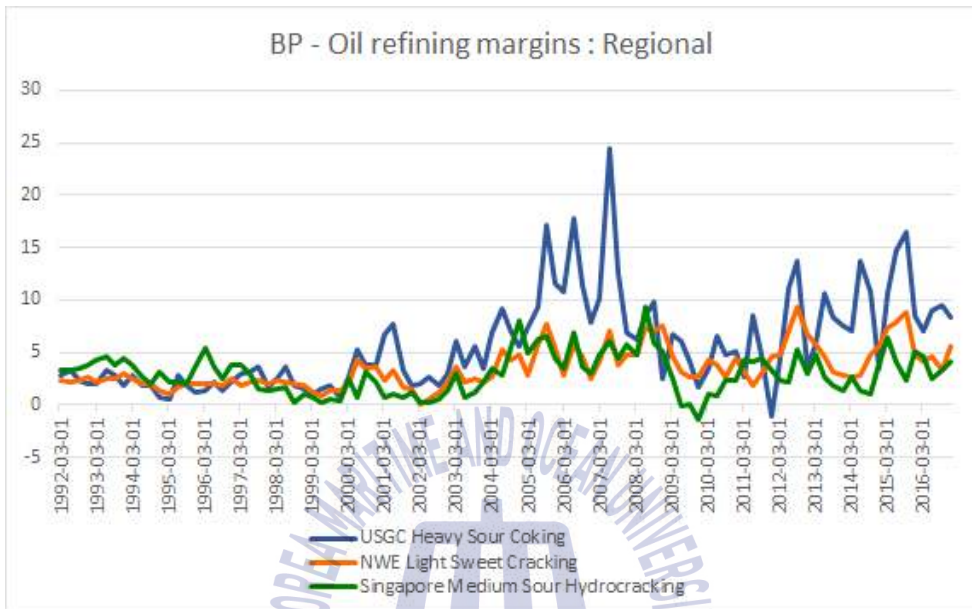


Fig. 5 Regional refining margins(\$/barrel/quarter) (Source : BP)

2.2 석유물류네트워크

석유회사는 매월, 단기, 중기 마다 원유와 석유의 정제 및 수출입 계획을 세워 제품유를 공급한다. 중기계획은 주로 국내외 석유제품의 수요전망과 원유종류, 가격 및 생산량, 고도화 정제설비 이용, 제품판매 전망 등을 고려하여 계획한다. 월간 및 단기계획은 각 연도별 수요 자료를 참고하여 예상치를 확정하고 재고량 조정, 비축량 등을 고려하여 직접적인 생산계획을 세운다. 또한 원유의 수입과 석유제품의 수입 및 수출에 있어서 제품 수요의 계절적, 경제적 요인이 있기에 수입량이 일정하지 않으므로 연간 운항계획을 작성하는데 있어서 운송량 변동을 고려한 수송 선박의 계약형태를 여러 각도에서 검토하게 된다.

따라서, 글로벌 메이저 석유회사는 원유를 수입하여 정제공장에서 각 제품유를 생산하고 이를 해당 국가 내 제품유의 수요전망과 제품유 해외시장의 수요

변동을 고려하여 공급하기 위하여 장·단기별 운영계획을 수립하게 된다. 이때 회사는 수요를 고려한 원유수송비용, 정제공정비용, 제품유 수송비용, 보관비용, 제품유 부족분 비용 등 여러 물류운영비용의 최적화를 위하여 적절한 정책을 필요로 한다.

본 논문에서는 하나의 글로벌 메이저 석유회사를 가정하여 제품유 가격과 각 수요의 변동을 고려하여 수송, 정제, 배분의 운영 네트워크 최적화에 관한 연구이다. 아래 그림은 본 연구의 수송-정제-분배의 최적화 네트워크이다.

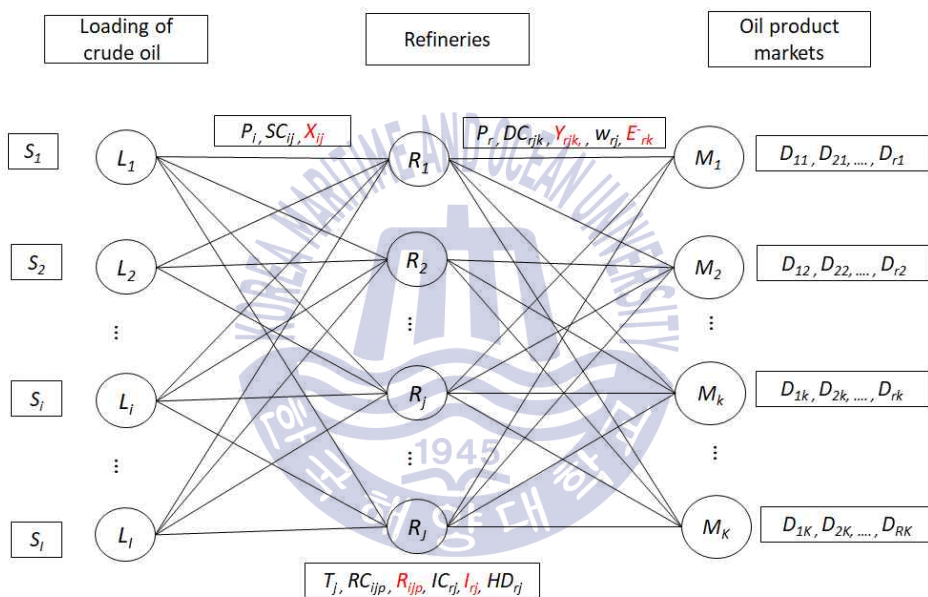


Fig. 6 Network of Transportation-Refineries-Distribution

원유는 국제유가시장의 유가지표인 브렌트유(brent oil), 서부텍사스유(west texas intermediate), 두바이유(dubai oil) 제품들을 대표로 하여 이들의 선적지인 영국 북해(north sea), 멕시코 만(gulf of mexico), 중동(middle east)을 모델로 삼았다. 정제공장은 벨기에의 앤트워프(antwerp), 미국 텍사스(texas), 싱가포르(singapore)로 설정하였으며 제품유 시장은 유럽(europe), 아메리카(america), 극동지방(far east) 및 오스트레일리아(australia)로 대표하였다.

2.3 선행연구

해운 의사결정자가 한정된 환경 속에서 어떤 선택을 하는 것이 가장 효율적인지 판단하는 해사수송에 관한 선형 계획법과 불확실한 상황 하에서의 의사결정과정을 논하는 추계적 계획법의 연구는 오래전부터 이어 왔다.

이 논문은 불확실성의 경제상황 아래 원유의 공급, 각 제품유의 생산과 수요의 변화 아래에서 다양한 수요시장에 생산된 제품유를 공급하는 석유물류네트워크의 추계적 최적화 모형을 발전시켜 변동성을 줄이는 로버스트 최적화 모형을 구현하였다.

추계적 계획법의 선행연구로 Mulvey 등(1995)은 추계적 계획법을 발전시켜 목적함수에 가중변동을 추가하여 고려함으로써 변동에 견고한 로버스트 최적화 모형을 정식화하였다. Vladimirov 및 Zenios(1997)은 로버스트 최적화 모형구조를 발전시켜 리코스 제한 접근법을 소개하였으며, 이는 2단계 변수에 관한 한계를 조정함으로써 변동성을 줄이는 방법이다.

석유물류네트워크에 관한 선행 연구로 김시화(1999)는 메이저 석유회사의 원유 도입비용, 수송비용, 정제비용, 제품 수송비용, 재고 비용 등의 총합을 최소화하는 문제에 대하여 목표계획모형을 적용하였으며, 김창수(2015)는 혼합정수 계획모형을 이용하여 해양 원유생산-수송의 최적화 문제를 다루었고, 구지혜(2017)는 해양원유생산-수송의 최적화 문제에 대하여 시나리오 기반의 로버스트 최적화 모형을 연구하였다.

본 논문은 원유수송-정제-분배의 3단계 석유물류 네트워크를 최적화하는 문제에 적용할 수 있는 로버스트 추계적 최적화모형을 제안하고, 불확실한 석유물류 시장 시나리오 하에서 제안된 최적화모형의 타당성과 유용성을 검증하는 문제를 다루고자 한다.

제 3 장 문제의 정식화

3.1 확정적 모형의 정식화 (Deterministic Formulation)

본 석유물류네트워크를 정식화한 확정적 모형의 기호는 다음과 같다.

[Index]

i : Loading source of crude ($i=1,2,3$: North sea, Gulf of mexico, Middle east)

j : Refinery plant ($j=1,2,3$: Antwerp, Texas, Singapore)

k : Product market overseas ($k=1,2,3$: Europe, America, Far east)

r : Type of product ($r=1,2,3$: Gasoline, Distillate, Fuel oil)

p : Level of process intensity ($p=1,2$: Low, High)

[Data]

P_i : Price of crude at loading source i (\$/B)

SC_{ij} : Shipping cost from loading source i to refinery j (\$/B)

RC_{ijp} : Cost of refining crude i at refinery j on processing intensity p (\$/B)

DC_{rjk} : Distribution cost of product r from refinery j to market k (\$/B)

w_{rk}^- : Weighting penalty for short of demand about product r a market k (\$/B)

IC_{rj} : Inventory cost of product r at refinery j (\$/B/D)

S_i : Crude supply at loading source i (B/D)

T_j : Maximum throughput at refinery j (B/D)

HD_{rj} : Hinterland demand of product r at refinery j (B/D)

MD_{rk} : Demand of product r at market k (B/D)

G_{rijp} : Yields rate per barrel of product r refining crude i at refinery j
on processing intensity p

P_r : Price of product r (\$/B)

[Decision variables]

X_{ij} : The amount of shipping crude i to refinery j (B/D)

R_{ijp} : The amount of crude i refined at j on processing intensity p (B/D)

Y_{rjk} : The distribution amount of product r from refinery j to market k (B/D)

E_{rk}^- : The amount of product r falling short of demand at market k (B/D)

I_{rj} : Inventory of product r at refinery j (B/D)

H_{rj} : The distribution amount of product r at refinery j (B/D)

RM^+ : Surplus of refinery margin (\$)

RM^- : Deficit of refinery margin (\$)

확정적 모형에서 목적함수(1)은 원유의 공급 및 수송비용, 원유의 정제비용, 정제된 제품유의 분배비용, 해외시장에서 만일의 수요 부족분에 대한 외주비용, 보관비용의 총합을 최소화 시키는 것을 목적으로 한다. 수요 부족분에 대해서는 별점 w_{rk}^- 을 부과하였다.

식(2)은 원유공급의 제약, 식(3)은 정유공장 최대처리량, 식(4)은 공급된 원유를 전부 정제한다. 식(5)은 정유공장 배후지의 수요를 만족시키는 식, 식(6)은 해외시장의 수요는 각 시장의 수송량과 만일의 수요 부족의 합, 식(7)은 각 정제공장에서 생산물에 따른 제품유 총 생산량은 제품유 해외 분배량과 정유공장 배후지 수요량과 재고의 보관량을 합한 것과 같음을 나타낸다. 식(8)에서는 정

유회사의 이익지표인 정제마진 정의에 관한 제약식이며 이는 제품유를 판매한 이익에서 원유가격, 원유 수송비용, 제품유 분배비용, 정제비용을 감해준다. 식 (9)은 비음조건이다.

[Formulation]

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_i \sum_j (P_i + SC_{ij})X_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_p RC_{ijp}R_{ijp} + \sum_r \sum_j \sum_k DC_{rjk}Y_{rjk} \\ & + \sum_r \sum_k w_{rk}^- E_{rk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj}I_{rj} \end{aligned} \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_j X_{ij} \leq S_i \quad (\text{for all } i) \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_p R_{ijp} \leq T_j \quad (\text{for all } j) \quad (3)$$

$$\sum_p R_{ijp} - X_{ij} = 0 \quad (\text{for all } i \text{ and } j) \quad (4)$$

$$H_{rj} = HD_{rj} \quad (\text{for all } r \text{ and } j) \quad (5)$$

$$\sum_j Y_{rjk} + E_{rk}^- = MD_{rk} \quad (\text{for all } r \text{ and } k) \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_p G_{rijp}R_{ijp} - \sum_k Y_{rjk} - H_{rj} - I_{rj} = 0 \quad (\text{for all } r \text{ and } j) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_r \sum_j P_r H_{rj} + \sum_r \sum_j \sum_k (P_r - DC_{rjk})Y_{rjk} - \sum_i \sum_j (P_i + SC_{ij})X_{ij} \\ & - \sum_i \sum_j \sum_p RC_{ijp}R_{ijp} - RM^+ + RM^- = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$X_{ij}, R_{ijp}, Y_{rjk}, E_{rk}^-, I_{rj}, H_{rj}, RM^+, RM^- \geq 0 \quad (\text{for all } i, j, p, r, k) \quad (9)$$

3.2 2단계 추계적 모형의 정식화 (2-stage Stochastic Formulation)

2단계 추계적 모형에서 의사결정 변수는 2가지로 분류할 수 있다. 먼저, 1단계 변수(first-stage variables)는 설계변수(design variables)라고도 하며 시나리오에 영향을 받지 않는 공통변수이다. 2단계 변수(second-stage variables)는 제어

혹은 운영변수(control or operating variable)라고도 하며 각각의 시나리오에서 변화하는 파라미터들을 일컫는다. 시나리오 변동의 모형화를 위해 유한한 개수의 시나리오를 가정하여 제약식 우변항에 변화하는 파라미터도 갖는다.

1단계 변수의 설정 후에 2단계 변수의 값을 선택하면서 기대비용을 개선하는 보정 조치를 리코스(recourse)라 하며, 이 비용은 확률변수(random variable)이다. 2단계 추계적 모형의 목적은 불확실한 상황에서 1단계 설계비용과 2단계 리코스 비용의 기대값이 최소화 되도록 하는 것이다.

본 석유물류네트워크를 정식화한 2단계 추계적 모형에서 사용된 기호는 다음과 같다.

[Index]

i : Loading source of crude ($i=1,2,3$: North sea, Gulf of mexico, Middle east)

j : Refinery plant ($j=1,2,3$: Antwerp, Texas, Singapore)

k : Product market overseas ($k=1,2,3$: Europe, America, Far east)

r : Type of product ($r=1,2,3$: Gasoline, Distillate, Fuel oil)

p : Level of process intensity ($p=1,2$: Low, High)

s : Scenario ($s=1,2,3$: Good, Fair, Poor)

[Data]

P_i : Price of crude at loading source i (\$/B)

SC_{ij} : Shipping cost from loading source i to refinery j (\$/B)

RC_{ijp} : Cost of refining crude i at refinery j on processing intensity p (\$/B)

DC_{srjk} : Distribution cost of product r in scenario s from refinery j to market k (\$/B)

w_{srk}^- : Weighting penalty for short of demand about product r in scenario s at market k (\$/B)

IC_{rj} : Inventory cost of product r at refinery j (\$/B/D)

S_i : Crude supply at loading source i (B/D)

T_j : Maximum throughput at refinery j (B/D)

HD_{rj} : Hinterland demand of product r at refinery j (B/D)

MD_{srk} : Demand of product r in scenario s at market k (B/D)

$G_{r,ijp}$: Yields rate per barrel of product r refining crude i at refinery j on processing intensity p

P_{sr} : Price of product r in scenario s (\$/B)

[Decision Variables]

X_{ij} : The amount of shipping crude i to refinery j (B/D)

R_{ijp} : The amount of crude i refined at j on processing intensity p (B/D)

Y_{srjk} : The distribution amount of product r in scenario s from refinery j to market k (B/D)

E_{srk}^- : The amount of product r in scenario s falling short of demand at market k (B/D)

I_{srj} : Inventory of product r in scenario s at refinery j (B/D)

H_{rj} : The distribution amount of product r at refinery j (B/D)

RM_s^+ : Surplus of refining margin in scenario s (\$)

RM_s^- : Deficit of refining margin in scenario s (\$)

2단계 추계적 모형의 목적함수(1)에서 원유의 공급 및 수송비용, 원유의 정제 비용은 1단계 변수들의 비용이며 시나리오 별로 변동하는 제품유의 분배비용, 해외시장에서 만일의 수요 부족분에 대한 외주비용, 보관비용은 2단계 변수들의 비용이다. 이들의 총 합을 최소화 시키는 것을 목적으로 한다.

식(2)은 원유공급의 제약, 식(3)은 정유공장 최대처리량, 식(4)은 공급된 원유는 전부 정제시킴을 나타낸다. 식(5)은 정유공장 배후지의 수요를 만족시키는 식, 식(6)은 각 시나리오 별 해외시장 수요량은 각 시나리오 별 해외 시장의 수송량과 만일의 수요 부족분의 합을 나타낸다. 식(7)은 각 정유공장에서의 생산에 따른 제품유 총 생산량은 제품유의 정유공장 배후지 수요량과 각 시나리오별 해외 시장 분배량 그리고 각 시나리오별 재고의 보관량을 합한 양과 같음을 나타낸다. 식(8)에서는 정제마진 정의의 제약식이며 시나리오별로 정제마진이 산출된다. 식(9)은 비음조건이다.

[Formulation]

$$Min \quad Z = \sum_i \sum_j (P_i + SC_{ij}) X_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_p RC_{ijp} R_{ijp} + \sum_s p_s [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{srjk} Y_{srjk} + \sum_r \sum_k w_{srk} E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj} I_{srj}] \quad (1)$$

$$\sum_j X_{ij} \leq S_i \quad (for \ all \ i) \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_p R_{ijp} \leq T_j \quad (for \ all \ j) \quad (3)$$

$$\sum_p R_{ijp} - X_{ij} = 0 \quad (for \ all \ i \ and \ j) \quad (4)$$

$$H_{rj} = HD_{rj} \quad (for \ all \ r \ and \ j) \quad (5)$$

$$\sum_j Y_{srjk} + E_{srk}^- = MD_{srk} \quad (\text{for all } r \text{ and } k) \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_p G_{rijp} R_{ijp} - \sum_k Y_{srjk} - H_{rj} - I_{srj} = 0 \quad (\text{for all } r \text{ and } j) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_r \sum_j P_{sr} H_{rj} + \sum_r \sum_j \sum_k P_{sr} Y_{srjk} - \sum_i \sum_j (P_i + SC_{ij}) X_{ij} \\ & - \sum_i \sum_j \sum_p RC_{ijp} R_{ijp} - RM_s^+ + RM_s^- = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$X_{ij}, R_{ijp}, Y_{srjk}, E_{srk}^-, I_{srj}, H_{rj}, RM_s^+, RM_s^- \geq 0 \quad (\text{for all } i, j, p, r, k, s) \quad (9)$$

3.3 로버스트 최적화 모형 (Robust Optimization Formulation)

로버스트 최적화 모형은 추계적 모형에서 2단계 리코스 비용의 변동에 관한 내용을 반영한 모형이다. 기존 추계적 모형의 한계는 2단계 리코스 비용의 기대값만 고려하고 시나리오 간 리코스 비용의 변동에 관하여는 다루지 않는다. 이 경우, 낮은 2단계 리코스 비용을 갖지만 막대한 운영비용을 지불하는 불확실한 상황이 초래될 수 있다. 따라서 의사결정자에게 최적의 기대비용과 함께 리코스 변동의 통제를 고려하는 것은 대단히 중요한 문제이다.

3.3.1 RO 모형

본 RO모형은 리코스 비용의 변동의 척도로 상위부분평균(Upper partial mean)을 사용하며 이를 편의상 간략하게 RO-UPM 모형이라 칭하겠다. 이는 일반적인 정식화에서의 분산의 사용은 비선형계획모형을 초래하여 선형계획모형보다 해를 구하는 것이 어려우며 문제의 전체 최적화를 달성하지 못할 위험도 내포하고 있다. 따라서 RO-UPM 모형에서는 기대 리코스 비용에서 초과하는 리코스 비용을 갖는 시나리오에만 별점을 부과하는 상위부분평균의 방법으로 일반적 분산 사용을 대체한다. Δ_s 는 기대 리코스 비용으로부터의 각 시나리오 별 비용의 양의 편차를 말한다. 목적함수에서는 가중치 ρ 를 이용하여 변동의 가중을 고려하였다.

본 석유물류네트워크를 정식화한 RO-UPM 모형의 기호는 다음과 같다.

[Index]

i : Loading source of crude ($i=1,2,3$: North sea, Gulf of mexico, Middle east)

j : Refinery plant ($j=1,2,3$: Antwerp, Texas, Singapore)

k : Product market overseas ($k=1,2,3$: Europe, America, Far east)

r : Type of product ($r=1,2,3$: Gasoline, Distillate, Fuel oil)

p : Level of process intensity ($p=1,2$: Low, High)

s : Scenario ($s=1,2,3$: Good, Fair, Poor)

[Data]

P_i : Price of crude at loading source i (\$/B)

SC_{ij} : Shipping cost from loading source i to refinery j (\$/B)

RC_{ijp} : Cost of refining crude i at refinery j on processing intensity p (\$/B)

DC_{srjk} : Distribution cost of product r in scenario s from refinery j to market k (\$/B)

w_{srk}^- : Weighting penalty for short of demand about product r in scenario s at market k (\$/B)

IC_{rj} : Inventory cost of product r at refinery j (\$/B/D)

S_i : Crude supply at loading source i (B/D)

T_j : Maximum throughput at refinery j (B/D)

HD_{rj} : Hinterland demand of product r at refinery j (B/D)

MD_{srk} : Demand of product r in scenario s at market k (B/D)

G_{rijp} : Yields rate per barrel of product r refining crude i at refinery j on processing intensity p

ρ : Penalty function

p_s : Probability of each scenario s

[Decision Variables]

X_{ij} : The amount of shipping crude i to refinery j (B/D)

R_{ijp} : The amount of crude i refined at j on processing intensity p (B/D)

Y_{srjk} : The distribution amount of product r in scenario s from refinery j to market k (B/D)

E_{srk}^- : The amount of product r in scenario s falling short of demand at market k (B/D)

I_{srj} : Inventory of product r in scenario s at refinery j (B/D)

H_{rj} : The distribution amount of product r at refinery j (B/D)

$$\Delta_s : \text{Max}(0, [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{srjk} Y_{srjk} + \sum_r \sum_k \bar{w}_{srk} E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj} I_{srj}]) - \sum_s p_s [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{srjk} Y_{srjk} + \sum_r \sum_k \bar{w}_{srk} E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj} I_{srj}] - \Delta_s)$$

RO-UPM 모형에서 목적함수(1)는 원유의 공급 및 수송비용, 원유의 정제비용의 1단계 변수들의 비용과 제품유의 분배비용, 해외시장에서 만일의 수요 부족분에 대한 외주비용, 보관비용은 시나리오 별로 변동하는 2단계 변수들의 비용, 그리고 가중치 ρ 를 곱한 변동의 기여도들을 모두 합한 값을 최소화 시키는 것을 목적으로 한다.

식(2)은 원유공급의 제약, 식(3)은 정유공장 최대처리량, 식(4)은 공급된 원유를 전부 정제시킴을 나타낸다. 식(5)은 평균 리코스 비용보다 큰 값을 가지는 리코스 비용들의 변동을 반영한 상위부분평균에 관한 식이며, 식(6)은 정유공장 배후지의 수요를 만족시킴을 나타내고, 식(7)은 각 시나리오 별 해외시장 수요량은 각 시나리오 별 해외시장의 수송량과 만일의 수요 부족분의 합을 나타낸

다. 식(8)은 각 정제공장에서 생산에 따른 제품유 총 생산량은 정유공장 배후지의 수요량과 각 시나리오별 해외 시장 분배량과 각 시나리오별 재고의 보관량을 합한 양과 같음을 나타낸다. 식(9)은 비음제약이다.

[Formulation]

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_i \sum_j (P_i + SC_{ij})X_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_p RC_{ijp}R_{ijp} + \sum_s p_s [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{srjk} Y_{srjk} \\ & + \sum_r \sum_k w_{srk}^- E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj} I_{srj}] + \rho \sum_s p_s \Delta_s \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_j X_{ij} \leq S_i \quad (\text{for all } i) \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_p R_{ijp} \leq T_j \quad (\text{for all } j) \quad (3)$$

$$\sum_p R_{ijp} - X_{ij} = 0 \quad (\text{for all } i \text{ and } j) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{srjk} Y_{srjk} + \sum_r \sum_k w_{srk}^- E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj} I_{srj}] \\ & - \sum_s p_s [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{srjk} Y_{srjk} + \sum_r \sum_k w_{srk}^- E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj} I_{srj}] \\ & - \Delta_s \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$H_{rj} = HD_{rj} \quad (\text{for all } r \text{ and } j) \quad (6)$$

$$\sum_j Y_{srjk} + E_{srk}^- = MD_{srk} \quad (\text{for all } s, r, k) \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_p G_{rijp} R_{ijp} - \sum_k Y_{srjk} - H_{rj} - I_{srj} = 0 \quad (\text{for all } s, r, j) \quad (8)$$

$$X_{ij}, R_{ijp}, Y_{srjk}, E_{srk}^-, I_{srj}, H_{rj} \geq 0, \Delta_s \geq 0 \quad (9)$$

3.3.2 RR 모형

RR모형은 2단계 변수의 변동을 줄이기 위해 제약식에서 2단계 변수에 관한 한계(Bound)를 조정한다. ϵ 는 미리 정해진 2단계 비용 변동의 허용수준이다. 본 RR모형에서는 리코스 비용의 변동의 척도로 상위부분평균을 사용하며 이를 편의상 간략하게 RR-UPM 모형이라 칭하겠다.

본 석유물류네트워크를 정식화한 RR-UPM 모형의 기호는 RO-UPM와 동일하며 데이터에서 비용 변동에 대한 허용 수준인 ϵ 이 추가가 된다.

ϵ : *Restricted recourse cost that trade off recourse stability with expected cost*

RR-UPM 모형에서 목적함수 (1)은 원유의 공급 및 수송비용, 원유의 정제비용은 1단계 변수들의 비용과 제품유의 분배비용, 해외시장에서 만일의 수요 부족분에 대한 외주비용, 보관비용은 시나리오 별로 변동하는 2단계 변수들의 비용의 합을 최소화 한다.

식(2)은 원유공급의 제약, 식(3)은 정유공장 최대처리량, 식(4)은 공급된 원유를 전부 정제시킴을 나타낸다. 식(5)은 평균 리코스 비용보다 큰 값을 가지는 리코스 비용들의 변동을 반영한 상위부분평균에 관한 식이며, 식(6)은 2단계 비용의 변동에 대한 허용수준의 제약식이다. 식(7)은 정유공장 배후지의 수요를 만족시킴을 나타내고, 식(8)은 각 시나리오 별 해외시장 수요량은 각 시나리오 별 해외시장의 수송량과 만일의 수요 부족분의 합을 나타낸다. 식(9)은 각 정제 공장에서의 생산율에 따른 제품유 총 생산량은 정유공장 배후지의 수요량과 각 시나리오별 해외 시장 분배량과 각 시나리오별 재고의 보관량을 합한 양과 같음을 나타낸다. 식(10)은 비음제약이다.

[Formulation]

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_i \sum_j (P_i + SC_{ij})X_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_p RC_{ijp}R_{ijp} + \sum_s p_s [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{rjk}Y_{srjk} \\ & + \sum_r \sum_k w_{srk}^- E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj}I_{srj}] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_j X_{ij} \leq S_i, \text{ (for all } i) \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_p R_{ijp} \leq T_j \text{ (for all } j) \quad (3)$$

$$\sum_p R_{ijp} - X_{ij} = 0 \text{ (for all } i \text{ and } j) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{srjk}Y_{srjk} + \sum_r \sum_k w_{srk}^- E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj}I_{srj}] \\ & - \sum_s p_s [\sum_r \sum_j \sum_k DC_{srjk}Y_{srjk} + \sum_r \sum_k w_{srk}^- E_{srk}^- + \sum_r \sum_j IC_{rj}I_{srj}] \\ & - \Delta_s \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum_s p_s \Delta_s \leq \epsilon \quad (6)$$

$$H_{rj} = HD_{rj} \text{ (for all } r \text{ and } j) \quad (7)$$

$$\sum_j Y_{srjk} + E_{srk}^- = MD_{srk} \text{ (for all } s, r, k) \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_p G_{rijp}R_{ijp} - \sum_k Y_{srjk} - H_{rj} - I_{srj} = 0 \text{ (for all } s, r, j) \quad (9)$$

$$X_{ij}, R_{ijp}, Y_{srjk}, E_{srk}^-, I_{srj} \geq 0, \Delta_s \geq 0 \quad (10)$$

제 4 장 계산실험 및 결과 검토

4.1 자료 준비

본 연구는 선형계획법(linear programming) 심플렉스(simplex method)의 알고리즘을 이용하였다. 실험 프로그램은 마이크로소프트사 엑셀 프로그램(microsoft office excel)의 해찾기 기능을 이용해 글로벌 메이저 석유회사의 운영기대비용을 최소화하였고 그에 따른 각 의사결정변수의 최적해를 구하였다.

원유가격(S_i)은 한국석유공사 오피넷에서 제공하는 2017년 평균 국제유가를 참고하여 브렌트유, 서부텍사스유, 그리고 두바이유 가격을 산정하였다. (\$/B)

제품유 가격(P_r)은 미국 에너지 정보청(EIA)의 제품유 가격을 참고하여 가솔린(gasoline), 증류유(distillate), 중유(fuel oil)로 구분해 가격을 산정하였다. 시나리오별 제품유 가격은(P_{sr}) 경제상황이 보통(fair)일 때의 가격을 기준으로 시나리오 호황(good)일 때의 가격은 보통상황의 1.3배, 불황(poor)일 때의 가격은 보통상황의 0.7배를 적용하였다. (\$/B)

원유 수송비용(SC_{ij})과 제품유 분배비용(DC_{rjk})은 항해용선(voyage charter)의 계약형태로 유조선 운임 지수인 월드스케일(world scale)를 이용하여 계산된 배럴(barrel) 당 운임으로 환산하여 적용하였다. (\$/B)

보관 비용(IC_{rj})은 경제상황이 호황일 때 제품유 가격의 5%로 설정하였다. (\$/B/D)

정제 비용(RC_{ijp})은 미국 에너지 정보청의 2017년 자료에 따르면 제품유 판매가격 중 약 14~17%비율이 정제 비용과 정제 이윤을 합한 가격을 참고하였다. 이 비율은 각 정유회사의 기술력, 계절별, 지역별, 원유종류의 차이 등에 영향을 받으며 본 논문에서는 계산결과를 통해 합리적으로 비용을 추정하였다. 고부가가치 제품유의 생산비율이 낮은(low) 일반정제시설과 고부가가치유 비율이 높은(high) 고도화정제시설로 구분하여 각 정유공장별 및 원유종류의 차이로 정

제비용을 설정하였다. (\$/B)

원유공급량(S_i), 정유공장 최대처리량(T_j)는 다국적 석유기업인 엑슨모빌(exxonmobil) 여러 정유공장의 하루단위 배럴(barrels per day) 자료를 바탕으로 추정치로 설정하였다.

Table 3 Constraint of Crude supply (B/D)

| North sea | Gulf of mexico | Middle east |
|-----------|----------------|-------------|
| 400,000 | 300,000 | 600,000 |

Table 4 Maximum throughput at refinery (B/D)

| Antwerp | Texas | Singapore |
|---------|---------|-----------|
| 400,000 | 300,000 | 500,000 |

정제공장지의 수요량(HD_{rj}), 해외시장의 수요량(MD_{rk})은 원유공급량(S_i)과 정유공장 최대처리량(T_j)을 반영하여 설정하였다. 시나리오별 해외시장의 수요량(MD_{srk})은 호황일 때는 보통 경제상황 수요량의 125%, 불황일 때는 보통 경제상황 수요량의 70%를 적용하였다.

4.2 계산실험

실험은 경제상황 시나리오별(S1:호황, S2:보통, S3:불황) 확정적 모형, 시나리오별 확률을 반영한 2단계 추계적 모형, 확률적 변동을 고려하지 않은 평균값을 1단계 변수에 반영한 선형계획의 모형을 이용하였다. 이후, 상위부분평균을 사용한 로버스트 최적화 모형의 RO 모형과 RR 모형을 이용하여 계산하였다.

4.2.1 확정적 모형

확정적 모형에서 경제상황이 호황일 때 제품유 가격과 분배비용, 해외수요량 및 정제공장 배후지의 수요는 다음과 같다.

Table 5 Product costs(\$/B)_S1

| Gasoline | Distillate | Fuel |
|----------|------------|-------|
| 83.92 | 82.47 | 76.65 |

Table 6 Distribution costs(\$/B)_S1

| From \ To | Europe | America | Far East |
|-----------|--------|---------|----------|
| Antwerp | 0.99 | 2.43 | 3.52 |
| Texas | 2.01 | 1.77 | 3.72 |
| Singapore | 2.53 | 3.09 | 1.12 |

Table 7 Demand of market_S1

| Market | Product | | |
|----------|----------|------------|--------|
| | Gasoline | Distillate | Fuel |
| Europe | 75,000 | 56,250 | 56,250 |
| America | 50,000 | 43,750 | 31,250 |
| Far East | 55,500 | 52,500 | 42,000 |

Table 8 Demand of hinterland

| Hinterland | Product | | |
|------------|----------|------------|--------|
| | Gasoline | Distillate | Fuel |
| Antwerp | 120,000 | 40,000 | 30,000 |
| Texas | 110,000 | 52,500 | 67,500 |
| Singapore | 70,000 | 60,000 | 50,000 |

다음은 경제상황이 호황일 때 MS Excel 해 찾기 프로그램을 이용하여 구한 최적해 이다.

Table 9 MS Excel Solver Optimal Solution_S1

| Name | Value | Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|------|--------|------|-------|------|-------|------|-------|
| X11 | 118259 | R222 | 18259 | Y211 | 56250 | E-11 | 0 |
| X12 | 181741 | R231 | 0 | Y212 | 0 | E-12 | 13764 |
| X13 | 0 | R232 | 0 | Y213 | 0 | E-13 | 0 |
| X21 | 281741 | R311 | 0 | Y221 | 0 | E-21 | 0 |

| | | | | | | | |
|------|----------|------|--------|--------------|-------|------------|-------|
| X22 | 18259 | R312 | 0 | Y222 | 43750 | E-22 | 0 |
| X23 | 0 | R321 | 11043 | Y223 | 0 | E-23 | 0 |
| X31 | 0 | R322 | 88957 | Y231 | 0 | E-31 | 0 |
| X32 | 100000 | R331 | 179086 | Y232 | 0 | E-32 | 0 |
| X33 | 500000 | R332 | 320914 | Y233 | 52500 | E-33 | 0 |
| R111 | 0 | Y111 | 55583 | Y311 | 32386 | I11 | 0 |
| R112 | 118259 | Y112 | 0 | Y312 | 0 | I12 | 0 |
| R121 | 0 | Y113 | 0 | Y313 | 0 | I13 | 0 |
| R122 | 181741 | Y121 | 0 | Y321 | 0 | I21 | 41545 |
| R131 | 0 | Y122 | 0 | Y322 | 0 | I22 | 6228 |
| R132 | 0 | Y123 | 0 | Y323 | 0 | I23 | 30695 |
| R211 | 0 | Y131 | 19417 | Y331 | 23864 | I31 | 0 |
| R212 | 281741 | Y132 | 36236 | Y332 | 31250 | I32 | 0 |
| R221 | 0 | Y133 | 55500 | Y333 | 42000 | I33 | 0 |
| RM+ | 13161651 | RM- | 0 | Overall Cost | | 74,798,581 | |

실험 결과, 기대비용의 최소화 및 정제공장지 수요량 및 해외 시장 수요를 충족시키기 위해서 원유는 북해에서 엔트워프 정제공장으로 118,259배럴, 텍사스 정제공장으로 181,741배럴, 멕시코 만에서 엔트워프 정제공장으로 281,741배럴, 텍사스 정제공장으로 18,259배럴, 중동에서 텍사스 정제공장으로 100,000배럴, 싱가포르 정제공장으로 500,000배럴을 수송한다.

Table 10 Optimal Solution : Crude supply_S1

| Loading source | Refinery plants | | |
|----------------|-----------------|---------|-----------|
| | Antwerp | Texas | Singapore |
| North sea | 118,259 | 181,741 | 0 |
| Gulf of mexico | 281,741 | 18,259 | 0 |
| Middle east | 0 | 100,000 | 500,000 |

엔트워프 정제공장에서는 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 118,259배럴, 멕시코 만에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 281,741배럴, 텍사스 정제공장에서는 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 181,741배럴,

멕시코 만에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 18,259배럴, 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 11,043배럴, 고도화공정과정으로 88,957배럴, 싱가포르 정제공장에서는 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 179,086배럴, 고도화공정과정으로 320,914배럴을 정제한다.

Table 11 Optimal Solution : Refining process_S1

| Process Intensity | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-------------------|---------|---------|-------|---------|--------|--------|-----------|-----|---------|
| | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai |
| Low | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11,043 | 0 | 0 | 179,086 |
| High | 118,259 | 281,741 | 0 | 181,741 | 18,259 | 88,957 | 0 | 0 | 320,914 |

정제과정을 거쳐 탄생된 제품유들은 각 정제공장지의 수요를 모두 만족시켰으며 또한 해외 수요지로 분배되었다. 앤트워프 정제공장에서 생산된 제품유들은 유럽시장으로 가솔린 55,583배럴, 증류유 56,250배럴, 중유 32,386배럴을, 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 아메리카대륙시장으로 43,750배럴을, 싱가포르 정제공장에서 생산된 제품유들은 유럽시장으로 가솔린 19,417배럴, 중유 23,864배럴, 아메리카대륙시장으로 가솔린 36,236배럴, 중유 31,250배럴을, 극동 시장으로는 가솔린 55,500배럴, 증류유 52,500배럴, 중유 42,000배럴을 수송해야 한다.

Table 12 Optimal Solution : Distribution amount_S1

| From | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| To Product | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 55,583 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19,417 | 36,236 | 55,500 |
| Distillate | 56,250 | 0 | 0 | 0 | 43,750 | 0 | 0 | 0 | 52,500 |
| Fuel | 32,386 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23,864 | 31,250 | 42,000 |

이때 해외수요지 아메리카대륙시장에서는 가솔린이 13,764배럴이 부족하였다. 이때 정제공정지의 재고는 앤트워프 정제공장에 증류유가 41,545배럴, 텍사스

정제공장에 증류유가 6,228배럴, 싱가포르 정제공장에 증류유가 30,695배럴이 발생했다. 이때 총 운영비용은 \$74,798,581이며, 정제마진은 \$13,161,651이다.

Table 13 Optimal Solution : Short of demand_S1

| Product \ Market | Europe | America | Far E. |
|------------------|--------|---------|--------|
| Gasoline | 0 | 13,764 | 0 |
| Distillate | 0 | 0 | 0 |
| Fuel | 0 | 0 | 0 |

Table 14 Optimal Solution : Inventory of product_S1

| Product \ Refinery | Antwerp | Texas | Singapore |
|--------------------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 41,545 | 6,228 | 30,695 |
| Fuel | 0 | 0 | 0 |

다음은 경제상황이 보통일 때 제품유 가격과 해외수요량은 다음 표와 같다. 정제공장 배후지의 수요량은 경제상황이 호황일 때와 같이 일정하다.

Table 15 Product costs(\$/B)_S2

| Gasoline | Distillate | Fuel oil |
|----------|------------|----------|
| 76.29 | 74.97 | 69.68 |

Table 16 Distribution costs(\$/B)_S2

| From \ To | Europe | America | Far East |
|-----------|--------|---------|----------|
| Antwerp | 0.90 | 2.21 | 3.20 |
| Texas | 1.83 | 1.61 | 3.38 |
| Singapore | 2.30 | 2.81 | 1.02 |

Table 17 Demand of market_S2

| Market | Product | | |
|----------|----------|------------|----------|
| | Gasoline | Distillate | Fuel oil |
| Europe | 60,000 | 45,000 | 45,000 |
| America | 40,000 | 35,000 | 25,000 |
| Far East | 44,400 | 42,000 | 33,600 |

다음은 경제상황이 보통일 때 MS Excel 해찾기 프로그램을 이용하여 구한 최적해 이다.

Table 18 MS Excel Solver Optimal Solution_S2

| Name | Value | Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|------|---------|------|--------|--------------|-------|------------|-------|
| X11 | 100000 | R222 | 0 | Y211 | 45000 | E-11 | 0 |
| X12 | 119381 | R231 | 0 | Y212 | 0 | E-12 | 0 |
| X13 | 0 | R232 | 0 | Y213 | 0 | E-13 | 0 |
| X21 | 300000 | R311 | 0 | Y221 | 0 | E-21 | 0 |
| X22 | 0 | R312 | 0 | Y222 | 35000 | E-22 | 0 |
| X23 | 0 | R321 | 32810 | Y223 | 0 | E-23 | 0 |
| X31 | 0 | R322 | 140254 | Y231 | 0 | E-31 | 0 |
| X32 | 173064 | R331 | 141176 | Y232 | 0 | E-32 | 0 |
| X33 | 426936 | R332 | 285759 | Y233 | 42000 | E-33 | 0 |
| R111 | 0 | Y111 | 57500 | Y311 | 31400 | I11 | 0 |
| R112 | 100000 | Y112 | 0 | Y312 | 0 | I12 | 0 |
| R121 | 0 | Y113 | 0 | Y313 | 0 | I13 | 0 |
| R122 | 119381 | Y121 | 0 | Y321 | 0 | I21 | 51900 |
| R131 | 0 | Y122 | 0 | Y322 | 0 | I22 | 8299 |
| R132 | 0 | Y123 | 0 | Y323 | 0 | I23 | 20716 |
| R211 | 0 | Y131 | 2500 | Y331 | 13600 | I31 | 0 |
| R212 | 300000 | Y132 | 40000 | Y332 | 25000 | I32 | 0 |
| R221 | 0 | Y133 | 44400 | Y333 | 33600 | I33 | 0 |
| RM+ | 4646919 | RM- | 0 | Overall Cost | | 67,666,740 | |

실험 결과, 기대비용의 최소화 및 정제공장 배후지 수요량 및 해외 시장 수

요를 충족시키기 위해서 원유는 북해에서 엔트워프 정제공장으로 100,000배럴, 텍사스 정제공장으로 119,381배럴, 멕시코 만에서 엔트워프 정제공장으로 300,000배럴, 중동에서 텍사스 정제공장으로 173,064배럴, 싱가포르 정제공장으로 426,936배럴을 수송한다.

Table 19 Optimal Solution : Crude supply_S2

| Loading source \ Refinery plants | Antwerp | Texas | Singapore |
|----------------------------------|-----------|---------|-----------|
| | North sea | 100,000 | 119,381 |
| Gulf of mexico | 300,000 | 0 | 0 |
| Middle east | 0 | 173,064 | 426,936 |

엔트워프 정제공장에서는 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 100,000배럴, 멕시코 만에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 300,000배럴, 텍사스 정제공장에서는 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 119,381배럴, 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 32,810배럴, 고도화공정과정으로 140,254배럴, 싱가포르 정제공장에서는 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 141,176배럴, 고도화공정과정으로 285,759배럴을 정제한다.

Table 20 Optimal Solution : Refining process_S2

| Process Intensity | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-------------------|---------|---------|-------|---------|-----|---------|-----------|-----|---------|
| | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai |
| Low | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32,810 | 0 | 0 | 141,176 |
| High | 100,000 | 300,000 | 0 | 119,381 | 0 | 140,254 | 0 | 0 | 285,759 |

정제과정을 거쳐 탄생된 제품유들은 각 정제공장지의 수요를 모두 만족시켰으며 다음과 같이 해외 수요지로 분배되었다. 엔트워프 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장으로 57,500배럴, 증류유는 유럽시장으로 45,000배럴, 중유는 유럽시장으로 31,400배럴을, 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 America로 35,000배럴, 싱가포르 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장으로 2,500배럴,

아메리카대륙시장으로 40,000배럴, 극동시장으로 44,000배럴, 증류유는 극동시장으로 42,000배럴, 증유는 유럽시장으로 13,600배럴, 아메리카대륙시장으로 25,000배럴, 극동시장으로 33,600배럴을 수송해야 한다.

Table 21 Optimal Solution : Distribution amount_S2

| From To Product | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-----------------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 57,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,500 | 40,000 | 44,400 |
| Distillate | 45,000 | 0 | 0 | 0 | 35,000 | 0 | 0 | 0 | 42,000 |
| Fuel oil | 31,400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13,600 | 25,000 | 33,600 |

이때 해외수요지의 수요는 모두 충족되었으며 앤트워프 정제공장에 제품유 증류유가 51,900배럴, 텍사스 정제공장에 제품유 증류유가 8,299배럴, 싱가포르 정제공장에 제품유 증류유가 20,716배럴의 재고가 발생했다. 이때 총 운영비용은 \$67,666,740이며 정제마진은 \$4,646,919이다.

Table 22 Optimal Solution : Short of demand_S2

| Product \ Market | Europe | America | Far E. |
|------------------|--------|---------|--------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 0 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

Table 23 Optimal Solution : Inventory of product_S2

| Product \ Refinery | Antwerp | Texas | Singapore |
|--------------------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 51,900 | 8,299 | 20,716 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

다음은 경제상황이 불황일 때 제품유 가격과 해외수요량은 다음 표와 같다. 정제공장 배후지 수요량은 경제상황 호황일 때와 동일하다.

Table 24 Product costs(\$/B)_S3

| Gasoline | Distillate | Fuel oil |
|----------|------------|----------|
| 68.66 | 67.47 | 62.71 |

Table 25 Distribution costs(\$/B)_S3

| From \ To | Europe | America | Far East |
|-----------|--------|---------|----------|
| Antwerp | 0.81 | 1.99 | 2.88 |
| Texas | 1.65 | 1.45 | 3.04 |
| Singapore | 2.07 | 2.53 | 0.92 |

Table 26 Demand of market_S3

| Market | Product | | |
|----------|----------|------------|----------|
| | Gasoline | Distillate | Fuel oil |
| Europe | 42,000 | 31,500 | 31,500 |
| America | 28,000 | 24,500 | 17,500 |
| Far East | 31,080 | 29,400 | 23,520 |

다음은 경제상황이 불황일 때 MS Excel 해찾기 프로그램을 이용하여 구한 최적해이다.

Table 27 MS Excel Solver Optimal Solution_S3

| Name | Value | Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|------|--------|------|--------|------|-------|------|-------|
| X11 | 88921 | R222 | 0 | Y211 | 31500 | E-11 | 0 |
| X12 | 0 | R231 | 0 | Y212 | 0 | E-12 | 0 |
| X13 | 0 | R232 | 0 | Y213 | 0 | E-13 | 0 |
| X21 | 300000 | R311 | 0 | Y221 | 0 | E-21 | 0 |
| X22 | 0 | R312 | 10043 | Y222 | 24500 | E-22 | 0 |
| X23 | 0 | R321 | 50453 | Y223 | 0 | E-23 | 0 |
| X31 | 10043 | R322 | 227537 | Y231 | 0 | E-31 | 0 |
| X32 | 277990 | R331 | 110266 | Y232 | 0 | E-32 | 0 |

| | | | | | | | |
|------|--------|------|---------|--------------|-------|----------|-------|
| X33 | 311967 | R332 | 201701 | Y233 | 29400 | E-33 | 0 |
| R111 | 0 | Y111 | 42000 | Y311 | 31159 | I11 | 0 |
| R112 | 88921 | Y112 | 15774 | Y312 | 0 | I12 | 0 |
| R121 | 0 | Y113 | 0 | Y313 | 0 | I13 | 0 |
| R122 | 0 | Y121 | 0 | Y321 | 0 | I21 | 64214 |
| R131 | 0 | Y122 | 0 | Y322 | 0 | I22 | 4480 |
| R132 | 0 | Y123 | 0 | Y323 | 0 | I23 | 0 |
| R211 | 0 | Y131 | 0 | Y331 | 341 | I31 | 0 |
| R212 | 300000 | Y132 | 12226 | Y332 | 17500 | I32 | 0 |
| R221 | 0 | Y133 | 31080 | Y333 | 23520 | I33 | 0 |
| RM+ | 0 | RM- | 1754387 | Overall Cost | | 59426597 | |

실험 결과, 기대비용의 최소화, 정제공장 배후지 수요량 및 해외 시장 수요를 충족시키기 위해서 북해에서 엔트워프 정제공장으로 88,921배럴, 멕시코 만에서 엔트워프 정제공장으로 300,000배럴, 중동에서 엔트워프 정제공장으로 10,043배럴, 텍사스 정제공장으로 277,990배럴, 싱가포르 정제공장으로 311,967배럴을 수송한다.

Table 28 Optimal Solution : Crude supply_S3

| Refinery plants Loading source | Antwerp | Texas | Singapore |
|-----------------------------------|---------|---------|-----------|
| North sea | 88,921 | 0 | 0 |
| Gulf of mexico | 300,000 | 0 | 0 |
| Middle east | 10,043 | 277,990 | 311,967 |

엔트워프 정제공장에서는 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 88,921배럴, 멕시코 만에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 300,000배럴, 중동에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 10,043배럴을 정제하고, 텍사스 정제공장에서는 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 50,453배럴, 고도화공정과정으로 227,537배럴을 정제한다. 싱가포르 정제공장에서는 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 110,266배럴, 고도화공정과정으로 201,701배럴을 정제한다.

Table 29 Optimal Solution : Refining process_S3

| Process Intensity | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-------------------|---------|---------|--------|-------|-----|---------|-----------|-----|---------|
| | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai |
| Low | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50,453 | 0 | 0 | 110,266 |
| High | 88,921 | 300,000 | 10,043 | 0 | 0 | 227,537 | 0 | 0 | 201,701 |

정제과정을 거쳐 탄생된 제품유들은 각 정제공장 배후지의 수요를 모두 만족시켰으며 다음과 같이 해외 수요지로 분배된다.

앤트워프 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장으로 42,000배럴, 아메리카 대륙시장으로 15,774배럴, 증류유는 유럽시장으로 31,500배럴, 중유는 유럽시장으로 31,159배럴이 분배되고, 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 아메리카대륙시장으로 24,500배럴이 분배된다. 싱가포르 정제공장에서 생산된 가솔린은 아메리카대륙시장으로 12,226배럴, 극동시장에 31,080배럴을, 증류유는 극동시장으로 29,400배럴, 중유는 유럽시장으로 341배럴, 아메리카대륙시장으로 17,500배럴, 극동시장으로 23,520배럴을 분배한다.

Table 30 Optimal Solution : Distribution amount_S3

| From | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| To Product | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 42,000 | 15,774 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12,226 | 31,080 |
| Distillate | 31,500 | 0 | 0 | 0 | 24,500 | 0 | 0 | 0 | 29,400 |
| Fuel oil | 31,159 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 341 | 17,500 | 23,520 |

이때 해외시장의 수요는 모두 충족되었으며 앤트워프 정제공장에 증류유가 64,214배럴, 텍사스 정제공장에 증류유가 4,480배럴, 싱가포르 정제공장에 증류유가 30,695배럴의 재고가 발생했다. 이때 총 운영비용은 \$59,426,597이며 정제마진은 -\$1,754,387이다.

Table 31 Optimal Solution : Short of demand_S3

| Market Product | Europe | America | Far E. |
|-------------------|--------|---------|--------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 0 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

Table 32 Optimal Solution : Inventory of product_S3

| Refinery Product | Antwerp | Texas | Singapore |
|---------------------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 64,214 | 4,480 | 30,695 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

4.2.2 2단계 추계적 모형

경제상황을 정확히 예측하기가 어렵기 때문에 의사결정은 각 경제상황이 일어날 확률을 예상하여 가정하는 것이 최선이다. 따라서 본 추계적 모형에서는 경제상황이 호황일 때의 경제상황을 확률 20%, 보통일 때의 경제상황을 확률 50%, 불황일 때의 경제상황을 확률 30%로 가정하여 2단계 추계적 모형의 계산 실험을 수행했다. 다음은 경제상황의 확률을 고려한 2단계 추계적 모형의 MS Excel 해찾기 프로그램을 이용하여 구한 최적해이다.

Table 33 MS Excel Solver Optimal Solution_Stochastic

| Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X11 | 100000 | Y2111 | 57500 | E-111 | 17500 |
| X12 | 30317 | Y2112 | 0 | E-112 | 50000 |
| X13 | 0 | Y2113 | 0 | E-113 | 11920 |
| X21 | 300000 | Y2121 | 0 | E-121 | 0 |
| X22 | 0 | Y2122 | 0 | E-122 | 0 |
| X23 | 0 | Y2123 | 0 | E-123 | 0 |
| X31 | 0 | Y2131 | 0 | E-131 | 0 |
| X32 | 251344 | Y2132 | 0 | E-132 | 25900 |

| | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X33 | 348656 | Y2133 | 43580 | E-133 | 0 |
| R111 | 0 | Y2211 | 45000 | E-211 | 2500 |
| R112 | 100000 | Y2212 | 2384 | E-212 | 40000 |
| R121 | 0 | Y2213 | 4710 | E-213 | 820 |
| R122 | 30317 | Y2221 | 0 | E-221 | 0 |
| R131 | 0 | Y2222 | 32616 | E-222 | 0 |
| R132 | 0 | Y2223 | 0 | E-223 | 0 |
| R211 | 0 | Y2231 | 0 | E-231 | 0 |
| R212 | 300000 | Y2232 | 0 | E-232 | 0 |
| R221 | 0 | Y2233 | 37290 | E-233 | 0 |
| R222 | 0 | Y2311 | 31400 | E-311 | 0 |
| R231 | 0 | Y2312 | 0 | E-312 | 0 |
| R232 | 0 | Y2313 | 0 | E-313 | 0 |
| R311 | 0 | Y2321 | 0 | E-321 | 0 |
| R312 | 0 | Y2322 | 0 | E-322 | 0 |
| R321 | 45973 | Y2323 | 0 | E-323 | 0 |
| R322 | 205371 | Y2331 | 13600 | E-331 | 0 |
| R331 | 192286 | Y2332 | 25000 | E-332 | 0 |
| R332 | 156370 | Y2333 | 33600 | E-333 | 0 |
| Y1111 | 57500 | Y3111 | 42000 | I111 | 0 |
| Y1112 | 0 | Y3112 | 15500 | I112 | 0 |
| Y1113 | 0 | Y3113 | 0 | I113 | 0 |
| Y1121 | 0 | Y3121 | 0 | I121 | 14306 |
| Y1122 | 0 | Y3122 | 0 | I122 | 0 |
| Y1123 | 0 | Y3123 | 0 | I123 | 0 |
| Y1131 | 0 | Y3131 | 0 | I131 | 0 |
| Y1132 | 0 | Y3132 | 12500 | I132 | 0 |
| Y1133 | 43580 | Y3133 | 31080 | I133 | 0 |
| Y1211 | 56250 | Y3211 | 31500 | I211 | 0 |
| Y1212 | 11134 | Y3212 | 0 | I212 | 0 |
| Y1213 | 15210 | Y3213 | 0 | I213 | 0 |
| Y1221 | 0 | Y3221 | 0 | I221 | 44806 |
| Y1222 | 32616 | Y3222 | 24500 | I222 | 0 |
| Y1223 | 0 | Y3223 | 0 | I223 | 0 |

| | | | | | |
|--------------|----------|-------|---------|------------|---------|
| Y1231 | 0 | Y3231 | 0 | I231 | 0 |
| Y1232 | 0 | Y3232 | 0 | I232 | 0 |
| Y1233 | 37290 | Y3233 | 29400 | I233 | 0 |
| Y1311 | 31400 | Y3311 | 31400 | I311 | 0 |
| Y1312 | 0 | Y3312 | 0 | I312 | 0 |
| Y1313 | 0 | Y3313 | 0 | I313 | 0 |
| Y1321 | 0 | Y3321 | 0 | I321 | 65400 |
| Y1322 | 0 | Y3322 | 0 | I322 | 8116 |
| Y1323 | 0 | Y3323 | 0 | I323 | 7890 |
| Y1331 | 24850 | Y3331 | 100 | I331 | 0 |
| Y1332 | 5350 | Y3332 | 17500 | I332 | 0 |
| Y1333 | 42000 | Y3333 | 23520 | I333 | 31080 |
| RM+1 | 16475697 | RM+2 | 7180636 | RM+3 | 0 |
| RM-1 | 0 | RM-2 | 0 | RM-3 | 3998246 |
| Overall Cost | | | | 68,176,988 | |

실험결과, 시나리오별 각 제품유 비용과 해외시장의 수요를 고려한 최적해는 다음과 같다.

원유 수송은 북해에서 엔트워프 정제공장으로 100,000배럴, 텍사스 정제공장으로 30,317배럴을 수송하고, 멕시코 만에서 엔트워프 정제공장으로 300,000배럴을 수송한다. 중동에서는 텍사스 정제공장으로 251,344배럴, 싱가포르 정제공장으로 348,656배럴을 수송한다.

Table 34 Optimal Solution : Crude supply_Stochastic

| Refinery plants Loading source | Antwerp | Texas | Singapore |
|-----------------------------------|---------|---------|-----------|
| North sea | 100,000 | 30,317 | 0 |
| Gulf of mexico | 300,000 | 0 | 0 |
| Middle east | 0 | 251,344 | 348,656 |

정유공장에서의 정제량은 엔트워프 정제공장에서 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 100,000배럴을, 멕시코 만에서 수송된 원유를 고도화공정과정

으로 300,000배럴을 정제하고, 텍사스 정제공장에서 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 30,317배럴, 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 45,973배럴, 고도화공정과정으로 205,371배럴을 정제한다. 싱가포르 정제공장에서는 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 192,286배럴, 고도화공정과정으로 156,370배럴을 정제한다.

Table 35 Optimal Solution : Refining process_Stochastic

| Process Intensity | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-------------------|---------|---------|-------|--------|-----|---------|-----------|-----|---------|
| | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai |
| Low | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45,973 | 0 | 0 | 192,286 |
| High | 100,000 | 300,000 | 0 | 30,317 | 0 | 205,371 | 0 | 0 | 156,370 |

정제과정을 거쳐 탄생된 제품유들은 시나리오별 각 정제공장 배후지의 수요를 우선 모두 만족시켰으며 다음과 같이 해외 수요지로 분배되었다.

경제상황이 호황일 때 엔트워프 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장으로 57,500배럴, 증류유는 유럽시장으로 56,250배럴, 아메리카대륙시장으로 11,134배럴, 극동시장으로 15,210배럴, 중유는 유럽시장으로 31,400배럴을 수송한다. 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 아메리카대륙시장에 32,616배럴을 수송하고 싱가포르 정제공장에서 생산된 가솔린은 극동시장에 43,580배럴, 증류유는 극동시장에 37,290배럴, 중유는 유럽시장에 24,850배럴, 아메리카대륙시장에 5,350배럴, 극동시장에 42,000배럴을 수송한다.

Table 36 Optimal Solution : Distribution amount_Stochastic_S1

| From To Product | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-----------------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 57,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43,580 |
| Distillate | 56,250 | 11,134 | 15,210 | 0 | 32,616 | 0 | 0 | 0 | 37,290 |
| Fuel oil | 31,400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24,850 | 5,350 | 42,000 |

이때 해외수요지 유럽시장에서는 가솔린이 17,500배럴이 부족했고, 아메리카 대륙시장에서는 가솔린이 50,000배럴, 중유가 25,900배럴이 부족했다. 극동시장에서는 가솔린이 11,920배럴이 부족하였다. 이때 정제공장의 재고는 앤트워프 정제공장에서 증류유가 14,306배럴의 재고가 발생했다.

Table 37 Optimal Solution : Short of demand_Stochastic_S1

| Market Product | Europe | America | Far E. |
|-------------------|--------|---------|--------|
| Gasoline | 17,500 | 50,000 | 11,920 |
| Distillate | 0 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 25,900 | 0 |

Table 38 Optimal Solution : Inventory of product_Stochastic_S1

| Refinery Product | Antwerp | Texas | Singapore |
|---------------------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 14,306 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

경제상황이 보통일 때 앤트워프 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장에 57,500배럴, 증류유는 유럽시장에 45,000배럴, 아메리카대륙시장에 2,384배럴, 극동시장에 4,710배럴, 중유는 유럽시장으로 31,400배럴을 수송한다. 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 아메리카대륙시장으로 32,616배럴, 싱가포르 정제공장에서 생산된 가솔린은 극동시장으로 43,580배럴, 증류유는 극동시장으로 37,290배럴, 중유는 유럽시장에 13,600배럴, 아메리카대륙시장으로 25,000배럴, 극동시장으로 33,600배럴을 수송한다.

Table 39 Optimal Solution : Distribution amount_Stochastic_S2

| From | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|---------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| To Product | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 57,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43,580 |
| Distillate | 45,000 | 2,384 | 4,710 | 0 | 32,616 | 0 | 0 | 0 | 37,290 |
| Fuel oil | 31,400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13,600 | 25,000 | 33,600 |

이때 해외수요지 유럽시장에서는 가솔린이 2,500배럴, 아메리카대륙시장에서 가솔린이 40,000배럴, 극동시장에서는 가솔린이 820배럴이 부족하였다. 정제공장의 재고는 앤트워프 정제공장에서 증류유가 44,806배럴의 재고가 발생했다.

Table 40 Optimal Solution : Short of demand_Stochastic_S2

| Product | Market | Europe | America | Far E. |
|------------|--------|--------|---------|--------|
| Gasoline | | 2,500 | 40,000 | 820 |
| Distillate | | 0 | 0 | 0 |
| Fuel oil | | 0 | 0 | 0 |

Table 41 Optimal Solution : Inventory of product_Stochastic_S2

| Product | Refinery | Antwerp | Texas | Singapore |
|------------|----------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | | 44,806 | 0 | 0 |
| Fuel oil | | 0 | 0 | 0 |

경제상황이 불황일 때 앤트워프 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장에 42,000배럴, 아메리카대륙시장에 15,500배럴, 증류유는 유럽시장에 31,500배럴, 증류유는 유럽시장에 31,400배럴을 수송하고, 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 아메리카대륙시장에 24,500배럴을 수송한다. 싱가포르 정제공장에서 생산된 가솔린은 아메리카대륙시장에 12,500배럴, 극동시장에 31,080배럴을, 증류유는

극동시장에 29,400배럴을, 중유는 유럽시장에 100배럴, 아메리카대륙시장에 17,500배럴, 극동시장에 23,520배럴을 수송한다.

Table 42 Optimal Solution : Distribution amount_Stochastic_S3

| From To Product | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-----------------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 42,000 | 15,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12,500 | 31,080 |
| Distillate | 31,500 | 0 | 0 | 0 | 24,500 | 0 | 0 | 0 | 29,400 |
| Fuel oil | 31,400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 17,500 | 23,520 |

이때 모든 수요는 만족했으며, 정제공장에서 재고는 앤트워프 정제공장에서 증류유 65,400배럴, 텍사스 정제공장에서 증류유 8,116배럴, 싱가포르 정제공장에서 증류유 7,890배럴, 중유 31,080배럴이 발생하였다.

Table 43 Optimal Solution : Short of demand_Stochastic_S3

| Product | Market | Europe | America | Far E. |
|------------|--------|--------|---------|--------|
| Gasoline | | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | | 0 | 0 | 0 |
| Fuel oil | | 0 | 0 | 0 |

Table 44 Optimal Solution : Inventory of product_Stochastic_S3

| Product | Refinery | Antwerp | Texas | Singapore |
|------------|----------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | | 65,400 | 8,116 | 7,890 |
| Fuel oil | | 0 | 0 | 31,080 |

3가지 경제상황 시나리오를 고려한 추계적 모형의 총 운영비용은 \$68,176,988이며 정제마진은 경제상황이 호황일 때 \$16,475,697, 경제상황이 보통일 때 \$7,180,636, 경제상황이 불황일 때 -\$3,998,246이다.

4.2.3 로버스트 최적화 모형

(1) RO 모형

본 연구의 RO 모형구조에서는 리코스 비용의 변동의 척도로 상위부분평균 (upper partial mean)을 사용한다. 본 모형에서 가중치 ρ 의 값을 0.5, 1.0, 2.0로 두어 실험을 해보았다. 먼저, 가중치 ρ 의 값을 0.5로 설정한 RO 모형을 MS Excel 해찾기 프로그램을 이용하여 구한 최적해이다.

Table 45 Solution of Robust optimization with upper partial mean($\rho=0.5$)

| Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X11 | 100000 | Y2111 | 57500 | E-111 | 17500 |
| X12 | 30317 | Y2112 | 0 | E-112 | 50000 |
| X13 | 0 | Y2113 | 0 | E-113 | 11920 |
| X21 | 300000 | Y2121 | 0 | E-121 | 0 |
| X22 | 0 | Y2122 | 0 | E-122 | 0 |
| X23 | 0 | Y2123 | 0 | E-123 | 0 |
| X31 | 0 | Y2131 | 0 | E-131 | 0 |
| X32 | 251344 | Y2132 | 0 | E-132 | 25900 |
| X33 | 348656 | Y2133 | 43580 | E-133 | 0 |
| R111 | 0 | Y2211 | 45000 | E-211 | 2500 |
| R112 | 100000 | Y2212 | 2384 | E-212 | 40000 |
| R121 | 0 | Y2213 | 4710 | E-213 | 820 |
| R122 | 30317 | Y2221 | 0 | E-221 | 0 |
| R131 | 0 | Y2222 | 32616 | E-222 | 0 |
| R132 | 0 | Y2223 | 0 | E-223 | 0 |
| R211 | 0 | Y2231 | 0 | E-231 | 0 |
| R212 | 300000 | Y2232 | 0 | E-232 | 0 |
| R221 | 0 | Y2233 | 37290 | E-233 | 0 |
| R222 | 0 | Y2311 | 31400 | E-311 | 0 |
| R231 | 0 | Y2312 | 0 | E-312 | 0 |
| R232 | 0 | Y2313 | 0 | E-313 | 0 |
| R311 | 0 | Y2321 | 0 | E-321 | 0 |

| | | | | | |
|--------------|---------|-------|------------|-------|-------|
| R312 | 0 | Y2322 | 0 | E-322 | 0 |
| R321 | 45973 | Y2323 | 0 | E-323 | 0 |
| R322 | 205371 | Y2331 | 13600 | E-331 | 0 |
| R331 | 192286 | Y2332 | 25000 | E-332 | 0 |
| R332 | 156370 | Y2333 | 33600 | E-333 | 0 |
| Y1111 | 57500 | Y3111 | 42000 | I111 | 0 |
| Y1112 | 0 | Y3112 | 15500 | I112 | 0 |
| Y1113 | 0 | Y3113 | 0 | I113 | 0 |
| Y1121 | 0 | Y3121 | 0 | I121 | 14306 |
| Y1122 | 0 | Y3122 | 0 | I122 | 0 |
| Y1123 | 0 | Y3123 | 0 | I123 | 0 |
| Y1131 | 0 | Y3131 | 0 | I131 | 0 |
| Y1132 | 0 | Y3132 | 12500 | I132 | 0 |
| Y1133 | 43580 | Y3133 | 31080 | I133 | 0 |
| Y1211 | 56250 | Y3211 | 31500 | I211 | 0 |
| Y1212 | 11134 | Y3212 | 0 | I212 | 0 |
| Y1213 | 15210 | Y3213 | 0 | I213 | 0 |
| Y1221 | 0 | Y3221 | 0 | I221 | 44806 |
| Y1222 | 32616 | Y3222 | 24500 | I222 | 0 |
| Y1223 | 0 | Y3223 | 0 | I223 | 0 |
| Y1231 | 0 | Y3231 | 0 | I231 | 0 |
| Y1232 | 0 | Y3232 | 0 | I232 | 0 |
| Y1233 | 37290 | Y3233 | 29400 | I233 | 0 |
| Y1311 | 31400 | Y3311 | 31400 | I311 | 0 |
| Y1312 | 0 | Y3312 | 0 | I312 | 0 |
| Y1313 | 0 | Y3313 | 0 | I313 | 0 |
| Y1321 | 0 | Y3321 | 0 | I321 | 65400 |
| Y1322 | 0 | Y3322 | 0 | I322 | 8116 |
| Y1323 | 0 | Y3323 | 0 | I323 | 7890 |
| Y1331 | 24850 | Y3331 | 100 | I331 | 0 |
| Y1332 | 5350 | Y3332 | 17500 | I332 | 0 |
| Y1333 | 42000 | Y3333 | 23520 | I333 | 31080 |
| D1 | 9408776 | D2 | 37494 | D3 | 0 |
| Overall Cost | | | 69,127,240 | | |

다음은, 가중치 ρ 의 값을 1.0로 설정한 RO 모형을 MS Excel 해찾기 프로그램을 이용하여 구한 최적해이다.

Table 46 Solution of Robust optimization with upper partial mean($\rho=1.0$)

| Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X11 | 100000 | Y2111 | 57500 | E-111 | 17500 |
| X12 | 31974 | Y2112 | 0 | E-112 | 50000 |
| X13 | 0 | Y2113 | 0 | E-113 | 11114 |
| X21 | 300000 | Y2121 | 0 | E-121 | 0 |
| X22 | 0 | Y2122 | 0 | E-122 | 0 |
| X23 | 0 | Y2123 | 0 | E-123 | 0 |
| X31 | 0 | Y2131 | 0 | E-131 | 0 |
| X32 | 249888 | Y2132 | 0 | E-132 | 25900 |
| X33 | 350112 | Y2133 | 44386 | E-133 | 0 |
| R111 | 0 | Y2211 | 45000 | E-211 | 2500 |
| R112 | 100000 | Y2212 | 2185 | E-212 | 40000 |
| R121 | 0 | Y2213 | 4237 | E-213 | 14 |
| R122 | 31974 | Y2221 | 0 | E-221 | 0 |
| R131 | 0 | Y2222 | 32815 | E-222 | 0 |
| R132 | 0 | Y2223 | 0 | E-223 | 0 |
| R211 | 0 | Y2231 | 0 | E-231 | 0 |
| R212 | 300000 | Y2232 | 0 | E-232 | 0 |
| R221 | 0 | Y2233 | 37763 | E-233 | 0 |
| R222 | 0 | Y2311 | 31400 | E-311 | 0 |
| R231 | 0 | Y2312 | 0 | E-312 | 0 |
| R232 | 0 | Y2313 | 0 | E-313 | 0 |
| R311 | 0 | Y2321 | 0 | E-321 | 0 |
| R312 | 0 | Y2322 | 0 | E-322 | 0 |
| R321 | 45728 | Y2323 | 0 | E-323 | 0 |
| R322 | 204160 | Y2331 | 13600 | E-331 | 0 |
| R331 | 191336 | Y2332 | 25000 | E-332 | 0 |
| R332 | 158777 | Y2333 | 33600 | E-333 | 0 |
| Y1111 | 57500 | Y3111 | 42000 | I111 | 0 |
| Y1112 | 0 | Y3112 | 15500 | I112 | 0 |

| | | | | | |
|--------------|---------|-------|------------|------|-------|
| Y1113 | 0 | Y3113 | 0 | I113 | 0 |
| Y1121 | 0 | Y3121 | 0 | I121 | 14978 |
| Y1122 | 0 | Y3122 | 0 | I122 | 0 |
| Y1123 | 0 | Y3123 | 0 | I123 | 0 |
| Y1131 | 0 | Y3131 | 0 | I131 | 0 |
| Y1132 | 0 | Y3132 | 12500 | I132 | 0 |
| Y1133 | 44386 | Y3133 | 31080 | I133 | 0 |
| Y1211 | 56250 | Y3211 | 31500 | I211 | 0 |
| Y1212 | 10935 | Y3212 | 0 | I212 | 0 |
| Y1213 | 14737 | Y3213 | 0 | I213 | 0 |
| Y1221 | 0 | Y3221 | 0 | I221 | 45478 |
| Y1222 | 32815 | Y3222 | 24500 | I222 | 0 |
| Y1223 | 0 | Y3223 | 0 | I223 | 0 |
| Y1231 | 0 | Y3231 | 0 | I231 | 0 |
| Y1232 | 0 | Y3232 | 0 | I232 | 0 |
| Y1233 | 37763 | Y3233 | 29400 | I233 | 0 |
| Y1311 | 31400 | Y3311 | 31400 | I311 | 0 |
| Y1312 | 0 | Y3312 | 0 | I312 | 0 |
| Y1313 | 0 | Y3313 | 0 | I313 | 806 |
| Y1321 | 0 | Y3321 | 0 | I321 | 65400 |
| Y1322 | 0 | Y3322 | 0 | I322 | 8315 |
| Y1323 | 0 | Y3323 | 0 | I323 | 8363 |
| Y1331 | 24850 | Y3331 | 100 | I331 | 0 |
| Y1332 | 5350 | Y3332 | 17500 | I332 | 0 |
| Y1333 | 42000 | Y3333 | 23520 | I333 | 31080 |
| D1 | 9370822 | D2 | 0 | D3 | 0 |
| Overall Cost | | | 70,076,133 | | |

다음은, 가중치 ρ 의 값을 2.0으로 설정한 RO 모형을 MS Excel 해찾기 프로그램
램을 이용하여 구한 최적해이다.

Table 47 Solution of Robust optimization with upper partial mean($\rho=2.0$)

| Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X11 | 100000 | Y2111 | 57500 | E-111 | 17500 |

| | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X12 | 31974 | Y2112 | 0 | E-112 | 50000 |
| X13 | 0 | Y2113 | 0 | E-113 | 11114 |
| X21 | 300000 | Y2121 | 0 | E-121 | 0 |
| X22 | 0 | Y2122 | 0 | E-122 | 0 |
| X23 | 0 | Y2123 | 0 | E-123 | 0 |
| X31 | 0 | Y2131 | 0 | E-131 | 0 |
| X32 | 249888 | Y2132 | 0 | E-132 | 25900 |
| X33 | 350112 | Y2133 | 44386 | E-133 | 0 |
| R111 | 0 | Y2211 | 45000 | E-211 | 2500 |
| R112 | 100000 | Y2212 | 2185 | E-212 | 40000 |
| R121 | 0 | Y2213 | 4237 | E-213 | 14 |
| R122 | 31974 | Y2221 | 0 | E-221 | 0 |
| R131 | 0 | Y2222 | 32815 | E-222 | 0 |
| R132 | 0 | Y2223 | 0 | E-223 | 0 |
| R211 | 0 | Y2231 | 0 | E-231 | 0 |
| R212 | 300000 | Y2232 | 0 | E-232 | 0 |
| R221 | 0 | Y2233 | 37763 | E-233 | 0 |
| R222 | 0 | Y2311 | 31400 | E-311 | 0 |
| R231 | 0 | Y2312 | 0 | E-312 | 0 |
| R232 | 0 | Y2313 | 0 | E-313 | 0 |
| R311 | 0 | Y2321 | 0 | E-321 | 0 |
| R312 | 0 | Y2322 | 0 | E-322 | 0 |
| R321 | 45728 | Y2323 | 0 | E-323 | 0 |
| R322 | 204160 | Y2331 | 13600 | E-331 | 0 |
| R331 | 191336 | Y2332 | 25000 | E-332 | 0 |
| R332 | 158777 | Y2333 | 33600 | E-333 | 0 |
| Y1111 | 57500 | Y3111 | 42000 | I111 | 0 |
| Y1112 | 0 | Y3112 | 15500 | I112 | 0 |
| Y1113 | 0 | Y3113 | 0 | I113 | 0 |
| Y1121 | 0 | Y3121 | 0 | I121 | 14978 |
| Y1122 | 0 | Y3122 | 0 | I122 | 0 |
| Y1123 | 0 | Y3123 | 0 | I123 | 0 |
| Y1131 | 0 | Y3131 | 0 | I131 | 0 |
| Y1132 | 0 | Y3132 | 12500 | I132 | 0 |

| | | | | | |
|--------------|---------|-------|------------|------|-------|
| Y1133 | 44386 | Y3133 | 31080 | I133 | 0 |
| Y1211 | 56250 | Y3211 | 31500 | I211 | 0 |
| Y1212 | 10935 | Y3212 | 0 | I212 | 0 |
| Y1213 | 14737 | Y3213 | 0 | I213 | 0 |
| Y1221 | 0 | Y3221 | 0 | I221 | 45478 |
| Y1222 | 32815 | Y3222 | 24500 | I222 | 0 |
| Y1223 | 0 | Y3223 | 0 | I223 | 0 |
| Y1231 | 0 | Y3231 | 0 | I231 | 0 |
| Y1232 | 0 | Y3232 | 0 | I232 | 0 |
| Y1233 | 37763 | Y3233 | 29400 | I233 | 0 |
| Y1311 | 31400 | Y3311 | 31400 | I311 | 0 |
| Y1312 | 0 | Y3312 | 0 | I312 | 0 |
| Y1313 | 0 | Y3313 | 0 | I313 | 806 |
| Y1321 | 0 | Y3321 | 0 | I321 | 65400 |
| Y1322 | 0 | Y3322 | 0 | I322 | 8315 |
| Y1323 | 0 | Y3323 | 0 | I323 | 8363 |
| Y1331 | 24850 | Y3331 | 100 | I331 | 0 |
| Y1332 | 5350 | Y3332 | 17500 | I332 | 0 |
| Y1333 | 42000 | Y3333 | 23520 | I333 | 31080 |
| D1 | 9370822 | D2 | 0 | D3 | 0 |
| Overall Cost | | | 71,950,297 | | |

가중치 ρ 의 값을 높일수록 기대비용은 증가하나 변동을 회피하는 리코스 비용은 줄어드는 결과가 나온다.

Table 48 Comparison of Robust optimization model with differential weight

| | Case1($\rho=0.5$) | Case2($\rho=1.0$) | Case3($\rho=2.0$) |
|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Expected cost | 68,176,988 | 68,201,969 | 68,201,969 |
| Recourse cost with upper partial mean | 1,900,502 | 1,874,164 | 1,874,164 |
| Weight | 0.5 | 1 | 2 |
| Overall cost | 69,127,240 | 70,076,133 | 71,950,297 |

(2) RR 모형

본 연구의 RR 모형에서도 리코스 비용의 변동의 척도로 상위부분평균을 사용한다. 이 모형에서는 2단계 변수에 관한 한계(bound)를 ϵ 값으로 조정한다. ϵ 값은 로버스트 최적화 모형($\rho=1$)에서 도출되는 상위부분 평균의 리코스 비용인 D1, D2, D3의 값에 각각 시나리오별 확률을 곱하여 더한 값 1,874,164을 한계값으로 설정하였다. 다음은 $\epsilon=1,874,164$ 일 때 MS Excel 해찾기 프로그램을 이용하여 구한 최적해이다.

Table 49 Solution of restricted recourse with upper partial mean ($\epsilon=1,874,164$)

| Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X11 | 100000 | Y2111 | 57500 | E-111 | 17500 |
| X12 | 31974 | Y2112 | 0 | E-112 | 50000 |
| X13 | 0 | Y2113 | 0 | E-113 | 11114 |
| X21 | 300000 | Y2121 | 0 | E-121 | 0 |
| X22 | 0 | Y2122 | 0 | E-122 | 0 |
| X23 | 0 | Y2123 | 0 | E-123 | 0 |
| X31 | 0 | Y2131 | 0 | E-131 | 0 |
| X32 | 249888 | Y2132 | 0 | E-132 | 25900 |
| X33 | 350112 | Y2133 | 44386 | E-133 | 0 |
| R111 | 0 | Y2211 | 45000 | E-211 | 2500 |
| R112 | 100000 | Y2212 | 2185 | E-212 | 40000 |
| R121 | 0 | Y2213 | 4237 | E-213 | 14 |
| R122 | 31974 | Y2221 | 0 | E-221 | 0 |
| R131 | 0 | Y2222 | 32815 | E-222 | 0 |
| R132 | 0 | Y2223 | 0 | E-223 | 0 |
| R211 | 0 | Y2231 | 0 | E-231 | 0 |
| R212 | 300000 | Y2232 | 0 | E-232 | 0 |
| R221 | 0 | Y2233 | 37763 | E-233 | 0 |
| R222 | 0 | Y2311 | 31400 | E-311 | 0 |
| R231 | 0 | Y2312 | 0 | E-312 | 0 |
| R232 | 0 | Y2313 | 0 | E-313 | 0 |
| R311 | 0 | Y2321 | 0 | E-321 | 0 |

| | | | | | |
|--------------|---------|-------|------------|-------|-------|
| R312 | 0 | Y2322 | 0 | E-322 | 0 |
| R321 | 45728 | Y2323 | 0 | E-323 | 0 |
| R322 | 204160 | Y2331 | 13600 | E-331 | 0 |
| R331 | 191336 | Y2332 | 25000 | E-332 | 0 |
| R332 | 158777 | Y2333 | 33600 | E-333 | 0 |
| Y1111 | 57500 | Y3111 | 42000 | I111 | 0 |
| Y1112 | 0 | Y3112 | 15500 | I112 | 0 |
| Y1113 | 0 | Y3113 | 0 | I113 | 0 |
| Y1121 | 0 | Y3121 | 0 | I121 | 14978 |
| Y1122 | 0 | Y3122 | 0 | I122 | 0 |
| Y1123 | 0 | Y3123 | 0 | I123 | 0 |
| Y1131 | 0 | Y3131 | 0 | I131 | 0 |
| Y1132 | 0 | Y3132 | 12500 | I132 | 0 |
| Y1133 | 44386 | Y3133 | 31080 | I133 | 0 |
| Y1211 | 56250 | Y3211 | 31500 | I211 | 0 |
| Y1212 | 10935 | Y3212 | 0 | I212 | 0 |
| Y1213 | 14737 | Y3213 | 0 | I213 | 0 |
| Y1221 | 0 | Y3221 | 0 | I221 | 45478 |
| Y1222 | 32815 | Y3222 | 24500 | I222 | 0 |
| Y1223 | 0 | Y3223 | 0 | I223 | 0 |
| Y1231 | 0 | Y3231 | 0 | I231 | 0 |
| Y1232 | 0 | Y3232 | 0 | I232 | 0 |
| Y1233 | 37763 | Y3233 | 29400 | I233 | 0 |
| Y1311 | 31400 | Y3311 | 31400 | I311 | 0 |
| Y1312 | 0 | Y3312 | 0 | I312 | 0 |
| Y1313 | 0 | Y3313 | 0 | I313 | 806 |
| Y1321 | 0 | Y3321 | 0 | I321 | 65400 |
| Y1322 | 0 | Y3322 | 0 | I322 | 8315 |
| Y1323 | 0 | Y3323 | 0 | I323 | 8363 |
| Y1331 | 24850 | Y3331 | 100 | I331 | 0 |
| Y1332 | 5350 | Y3332 | 17500 | I332 | 0 |
| Y1333 | 42000 | Y3333 | 23520 | I333 | 31080 |
| D1 | 9370822 | D2 | 0 | D3 | 0 |
| Overall Cost | | | 68,201,969 | | |

따라서 로버스트 최적화 모형($\rho=1$)의 최적해와 일치하는 값을 확인할 수 있다.

(3) RO 모형($\rho=1$), RR($\epsilon=1,874,164$) 모형 정리

RO 모형에서 $\rho=1$ 일 때, RR 모형에서 $\epsilon=1,874,164$ 일 때 두 모형의 최적해는 동일한 값을 가진다. 실험 결과, 기대비용의 최소화 및 정제공장지 수요량 및 해외 시장 수요를 충족시키기 위해서 원유는 북해에서 엔트워프 정제공장으로 100,000배럴, 텍사스 정제공장으로 31,974배럴, 멕시코 만에서 엔트워프 정제공장으로 300,000배럴, 중동에서 텍사스 정제공장으로 249,888배럴, 싱가포르 정제공장으로 350,112배럴을 수송한다.

Table 50 Optimal Solution : Crude supply_RO, RR

| Loading source | Refinery plants | | |
|----------------|-----------------|---------|-----------|
| | Antwerp | Texas | Singapore |
| North sea | 100,000 | 31,974 | 0 |
| Gulf of mexico | 300,000 | 0 | 0 |
| Middle east | 0 | 249,888 | 350,112 |

엔트워프 정제공장에서는 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 100,000배럴, 멕시코 만에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 300,000배럴을 정제하고, 텍사스 정제공장에서는 북해에서 수송된 원유를 고도화공정과정으로 31,974배럴, 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 45,728배럴, 고도화공정과정으로 204,160배럴을 정제한다. 싱가포르 정제공장에서는 중동에서 수송된 원유를 일반 정제공정과정으로 191,336배럴, 고도화공정과정으로 158,777배럴을 정제한다.

Table 51 Optimal Solution : Refining process_RO, RR

| Process Intensity | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-------------------|---------|---------|-------|--------|-----|---------|-----------|-----|---------|
| | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai |
| Low | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45,728 | 0 | 0 | 191,336 |
| High | 100,000 | 300,000 | 0 | 31,974 | 0 | 204,160 | 0 | 0 | 158,777 |

경제상황이 호황일 때 앤트워프 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장으로 57,500배럴, 증류유는 유럽시장으로 56,250배럴, 아메리카대륙시장으로 10,935배럴, 극동시장으로 14,737배럴, 증유는 유럽시장에 31,400배럴을 수송한다. 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 아메리카대륙시장에 32,815배럴을 수송하고 싱가포르 정제공장에서 생산된 가솔린은 극동시장에 44,386배럴, 증류유는 극동시장에 37,763배럴, 증유는 유럽시장에 24,850배럴, 아메리카대륙시장에 5,350배럴, 극동시장에 42,000배럴을 수송한다.

Table 52 Optimal Solution : Distribution amount_RO, RR(S1)

| From | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| To Product | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 57,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44,386 |
| Distillate | 56,250 | 10,935 | 14,737 | 0 | 32,815 | 0 | 0 | 0 | 37,763 |
| Fuel oil | 31,400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24,850 | 5,350 | 42,000 |

이때 해외수요지 유럽시장에서는 가솔린이 17,500배럴 부족했고, 아메리카대륙시장에서는 가솔린이 50,000배럴, 증유가 25,900배럴이 부족했다. 극동시장에서는 가솔린이 11,114배럴이 부족하였다. 이때 정제공장의 재고는 앤트워프 정제공장에서 증류유가 14,978배럴의 재고가 발생했다.

Table 53 Optimal Solution : Short of demand_RO, RR(S1)

| Market Product | Europe | America | Far E. |
|-------------------|--------|---------|--------|
| Gasoline | 17,500 | 50,000 | 11,114 |
| Distillate | 0 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 25,900 | 0 |

Table 54 Optimal Solution : Inventory of product_RO, RR(S1)

| Refinery Product | Antwerp | Texas | Singapore |
|---------------------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 14,978 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

경제상황이 보통일 때 엔트워프 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장에 57,500배럴, 증류유는 유럽시장에 45,000배럴, 아메리카대륙시장에 2,185배럴, 극동시장에 4,237배럴, 증유는 유럽시장으로 31,400배럴을 수송한다. 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 아메리카대륙시장으로 32,815배럴, 싱가포르 정제공장에서 생산된 가솔린은 극동시장에 44,386배럴, 증류유는 극동시장에 37,763배럴, 증유는 유럽시장에 13,600배럴, 아메리카대륙시장에 25,000배럴, 극동시장에 33,600배럴을 수송한다.

Table 55 Optimal Solution : Distribution amount_RO, RR(S2)

| From To Product | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-----------------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 57,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44,386 |
| Distillate | 45,000 | 2,185 | 4,237 | 0 | 32,815 | 0 | 0 | 0 | 37,763 |
| Fuel oil | 31,400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13,600 | 25,000 | 33,600 |

이때 해외수요지 유럽시장에서는 가솔린이 2,500배럴, 아메리카대륙시장에서 가솔린이 40,000배럴, 극동시장에서는 가솔린이 14배럴이 부족하였다. 정제공장

의 재고는 앤트워프 정제공장에 증류유가 45,478배럴의 재고가 발생했다.

Table 56 Optimal Solution : Short of demand_RO, RR(S2)

| Product \ Market | Europe | America | Far E. |
|------------------|--------|---------|--------|
| Gasoline | 2,500 | 40,000 | 14 |
| Distillate | 0 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

Table 57 Optimal Solution : Inventory of product_RO, RR(S2)

| Product \ Refinery | Antwerp | Texas | Singapore |
|--------------------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 45,478 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

경제상황이 불황일 때 앤트워프 정제공장에서 생산된 가솔린은 유럽시장에 42,000배럴, 아메리카대륙시장에 15,500배럴, 증류유는 유럽시장에 31,500배럴, 중유는 유럽시장에 31,400배럴을 수송하고, 텍사스 정제공장에서 생산된 증류유는 아메리카대륙시장에 24,500배럴을 수송한다. 싱가포르 정제공장에서 생산된 가솔린은 아메리카대륙시장에 12,500배럴, 극동시장에 31,080배럴을, 증류유는 극동시장에 29,400배럴을, 중유는 유럽시장에 100배럴, 아메리카대륙시장에 17,500배럴, 극동시장에 23,520배럴을 수송한다.

Table 58 Optimal Solution : Distribution amount_RO, RR(S3)

| From \ To Product | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-------------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | 42,000 | 15,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12,500 | 31,080 |
| Distillate | 31,500 | 0 | 0 | 0 | 24,500 | 0 | 0 | 0 | 29,400 |
| Fuel oil | 31,400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 17,500 | 23,520 |

이때 모든 수요는 만족했으며, 정제공장에서는 재고가 앤트워프 정제공장에서 증류유 65,400배럴, 텍사스 정제공장에서 증류유 8,315배럴, 싱가포르 정제공장에서 가솔린 806배럴, 증류유 8,363배럴, 중유 31,080배럴이 발생하였다.

Table 59 Optimal Solution : Short of demand_RO, RR(S3)

| Product \ Market | Europe | America | Far E. |
|------------------|--------|---------|--------|
| Gasoline | 0 | 0 | 0 |
| Distillate | 0 | 0 | 0 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 0 |

Table 60 Optimal Solution : Inventory of product_RO, RR(S3)

| Product \ Refinery | Antwerp | Texas | Singapore |
|--------------------|---------|-------|-----------|
| Gasoline | 0 | 0 | 806 |
| Distillate | 65,400 | 8,315 | 8,363 |
| Fuel oil | 0 | 0 | 31,080 |

4.3 실험결과 검토

4.3.1 민감도 분석 (Sensitivity Analysis)

민감도 분석은 두가지 방법으로 나뉜다. 하나는 의사결정변수와 목적함수 계수의 변화에 따른 최적해의 변화 분석과, 다른 하나는 제약식 우변항의 변화에 따른 최적해 변화 분석이다. 본 모형에서는 정확한 경제상황 예측을 가정한 완전한 정보를 바탕으로 확정적 모형의 경제상황 보통 시나리오로 민감도 분석을 시행했다.

(1) 의사결정변수와 목적함수계수의 민감도 분석 (Range of Optimality for each Objective function' s Coefficient)

의사결정변수와 목적함수계수의 민감도 분석의 종류로는 수정비용(reduced

cost)과 허용 가능 증가치(allowable increase) 및 허용 가능 감소치(allowable decrease)가 있다. 수정비용은(reduced cost)은 의사결정변수의 현 최적해 값이 최적의 수준 임에도 불구하고 한 단위를 더 생산하게 되면 발생하는 패널티이며 이는 목적함수에 반영된다. 비용의 최소화 문제에서는 지불해야 하는 패널티는 목적함수의 증가로 이어진다. 허용 가능 증가치 및 허용 가능 감소치는 현재의 최적해를 변화시키지 않는 목적함수계수의 증가 및 감소의 상한치이다. 목적함수계수에서 허용가능 증가치 및 허용가능 감소치를 가감하면 최적해가 유지되는 그 범위를 구할 수 있다.

경제상황이 보통일 때 확정적 모형의 원유 공급에 대한 민감도 분석을 살펴 보면 수정비용은 북해에서 싱가포르 정제공장으로 원유를 현재 최적해가 0임에도 불구하고 1단위를 더 수송하게 되면 2.56(\$)의 목적함수 비용이 발생한다. 또한, 북해에서 엔트워프 정제공장으로 원유를 수송할 때 허용가능 증가치 및 감소치가 각각 0.86, 1.82이므로 현 목적함수 계수는 55.66이며 최적해가 변하지 않는 목적함수계수의 범위는 53.84에서 56.52이다.

Table 61 Range of Optimality : Crude supply

| Loading source \ Refinery plants | | Antwerp | Texas | Singapore |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | North sea | Reduced cost | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | 0.86 / 1.82 | 1.83 / 0.85 | ∞ / 2.56 |
| Gulf of mexico | Reduced cost | 0 | 1.82 | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | 1.82 / ∞ | ∞ / 1.82 | ∞ / 6.31 |
| Middle east | Reduced cost | 0.86 | 0 | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | ∞ / 0.86 | 0.97 / 0.91 | 0.91 / 0.81 |

경제상황이 보통일 때 확정적 모형의 정제과정 민감도 분석이다. 일반정제공정과정에서 수정비용이 다수 존재하는 것을 볼 수 있다.

Table 62 Range of Optimality : Refining process

| Process Intensity | | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|
| | | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai | brent | wti | dubai |
| Low | Reduced cost | 1.83 | 0.28 | 0.21 | 0.84 | 2.72 | 0 | 0.8 | 9.17 | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | $\infty / 1.83$ | $\infty / 0.28$ | $\infty / 0.21$ | $\infty / 0.84$ | $\infty / 2.72$ | $2.10 / 0.40$ | $\infty / 0.80$ | $\infty / 9.17$ | $0.21 / 3.52$ |
| High | Reduced cost | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.31 | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | $0.86 / 1.82$ | $0.28 / \infty$ | $0.21 / 0.86$ | $0.88 / 0.85$ | $2.72 / 1.82$ | $1.71 / 1.39$ | $0.80 / 2.56$ | $\infty / 6.31$ | $1.39 / 0.21$ |

경제상황이 보통일 때 확정적 모형의 해외시장으로 수송에 관한 민감도 분석이다. 주로, 텍사스 정제공장에서 각 시장으로 수송할 때 수정비용이 높은 것을 확인 할 수 있다.

Table 63 Range of Optimality : Distribution amount

| From \ To Product | | Antwerp | | | Texas | | | Singapore | | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. | Europe | America | Far E. |
| Gasoline | Reduced cost | 0 | 0.8 | 3.58 | 4.89 | 4.16 | 7.72 | 0 | 0 | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | $0.8 / 13.18$ | $\infty / 0.8$ | $\infty / 3.58$ | $\infty / 4.89$ | $\infty / 4.16$ | $\infty / 7.72$ | $4.89 / 0.8$ | $0.8 / \infty$ | $3.58 / \infty$ |
| Distillate | Reduced cost | 0 | 0.6 | 2.18 | 0.93 | 0 | 2.36 | 1.4 | 1.2 | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | $0.93 / \infty$ | $\infty / 0.6$ | $\infty / 2.18$ | $\infty / 0.93$ | $0.6 / \infty$ | $\infty / 2.36$ | $\infty / 1.4$ | $\infty / 1.2$ | $2.18 / \infty$ |
| Fuel oil | Reduced cost | 0 | 0.8 | 3.58 | 1.80 | 1.07 | 4.63 | 0 | 0 | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | $0.8 / 0.72$ | $\infty / 0.8$ | $\infty / 3.58$ | $\infty / 1.80$ | $\infty / 1.07$ | $\infty / 4.63$ | $0.72 / 0.8$ | $0.8 / \infty$ | $3.58 / \infty$ |

경제상황이 보통일 때 확정적 모형의 보관비용에 관한 민감도 분석이다. 가솔린의 보관이 1단위 증가할 때 목적함수 값을 제일 많이 증가시킨다.

Table 64 Range of Optimality : Inventory of product

| Refinery | | Antwerp | Texas | Singapore |
|------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Gasoline | Reduced cost | 141.34 | 145.30 | 139.94 |
| | Allowable Increase/decrease | ∞ / 141.34 | ∞ / 145.30 | ∞ / 139.94 |
| Distillate | Reduced cost | 0 | 0 | 0 |
| | Allowable Increase/decrease | 0.6 / 0.93 | 0.93 / 0.6 | 1.2 / 2.18 |
| Fuel oil | Reduced cost | 79.45 | 80.32 | 78.05 |
| | Allowable Increase/decrease | ∞ / 79.45 | ∞ / 80.32 | ∞ / 78.05 |

(2) 제약식 우변항의 민감도 분석 (Range of Feasibility for RHS Value of Each Constraints)

제약식 우변항의 변화에 따른 민감도 분석의 종류에는 잠재가격(shadow price)와 허용 가능 증가치(allowable increase)와 허용 가능 감소치(allowable decrease)가 있다. 잠재가격은 허용 제약식 우변항의 한 단위를 증가시킬 때 목적함수 값의 증가분을 말한다. 우변항의 민감도 분석에서의 허용 가능 증가치와 허용 가능 감소치는 최적해를 더 이상 증감시키지 않는 상·하한선이다.

원유공급 제약식 우변항에서 민감도 분석을 살펴보면 멕시코 만에서 기존 원유공급 300,000(B/D)에서 300,001(B/D)로 한 단위 증가시키면 목적함수 값은 13.13(\$)만큼 감소한다. 잠재가격은 공급량 142,084.39(B/D)에서 323,809.52(B/D)의 범위에서 -13.13으로 일정하다.

Table 65 Range of Feasibility : Crude supply

| | North sea | Gulf of mexico | Far east |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| Shadow Price | 0 | -13.13 | -11.96 |
| Allowable Increase/Decrease | ∞ / 180618.91 | 23809.52/ 157915.61 | 60810.43/ 54833.69 |

다음은, 정제공장 제약식 우변항에서 민감도 분석이다. 현 엔트워프 정제공장의 최대정유처리량이 400,000(B/D)이며 338,197.4(B/D)에서 406,849.32(B/D)까지의 범위의 경우, 1단위 상승할 때 1.61(\$)만큼 감소한다.

Table 66 Range of Feasibility : Maximum throughput at refinery

| | Antwerp | Texas | Singapore |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Shadow Price | -1.61 | 0 | 0 |
| Allowable Increase/Decrease | 6849.32/ 61802.60 | ∞ / 7554.45 | ∞ / 73064.46 |

다음은, 해외시장 수요 제약식 우변항에서 민감도 분석이다. 잠재가격을 살펴보면 가솔린 및 중유의 수요는 양의 값을 가지고 증류유 수요에 있어서는 음의 값을 가진다. 즉, 가솔린과 중유의 수요 증가는 운영비용 증가를 가져오고, 증류유의 수요 증가는 운영비용의 감소를 가져온다. 따라서, 현 문제에서는 가솔린 및 중유의 해외 수출을 증가시키는 것은 부적절한 의사결정이 될 수도 있으며, 증류유 해외 수출 실행은 고려해 볼 의사결정 문제이다.

Table 67 Range of Feasibility : Demand of market

| Market | | Product | | |
|----------|-----------------------------|----------------|-----------------|--------------------|
| | | Gasoline | Distillate | Fuel oil |
| Europe | Shadow Price | 138.04 | -3.22 | 76.52 |
| | Allowable Increase/Decrease | 0/ 2500 | 51900/ 45000 | 46721.78/ 13600 |
| America | Shadow Price | 138.55 | -2.51 | 77.03 |
| | Allowable Increase/Decrease | 0/ 33625.62 | 0/ 35000 | 0/ 18736.41 |
| Far East | Shadow Price | 136.76 | -3.10 | 75.24 |
| | Allowable Increase/Decrease | 0/ 33625.62 | 20715.97/ 0 | 46721.78/ 33600 |

다음은, 정제공장 배후지 수요 제약식의 우변항에서 민감도 분석이다. 앤드워프 정제공장 배후지에서 증류유의 현재 수요는 40000이다. 허용 가능 증가치와 허용 가능 감소치를 적용하면 수요의 범위가 0에서 91900까지일 때 잠재가격은 -4.12로 일정하다. 또한, 가솔린 및 증유의 잠재가격은 양의 값을 가지고, 증류유는 음의 값을 가지므로 의사결정자는 본 민감도 분석을 참고하여 적절한 의사결정을 해야 할 것이다.

Table 68 Range of Feasibility : Demand of hinterland

| Hinterland | | Product | | |
|------------|-----------------------------|-----------------|----------------|-------------------|
| | | Gasoline | Distillate | Fuel oil |
| Antwerp | Shadow Price | 137.14 | -4.12 | 75.62 |
| | Allowable Increase/Decrease | 0/2500 | 51900/40000 | 0/13600 |
| Texas | Shadow Price | 141.10 | -4.12 | 76.48 |
| | Allowable Increase/Decrease | 3674.42/9955.97 | 8298.61/0 | 5657.44/13268.38 |
| Singapore | Shadow Price | 135.74 | -4.12 | 74.22 |
| | Allowable Increase/Decrease | 0/33652.62 | 20715.97/60000 | 46721.78/42290.36 |

4.3.2 완전정보의 기대가치(The Expected Value of Perfect Information)

완전정보의 기대가치(EVPI)는 미래의 경제상황에 따른 제품유 가격과 시장수요를 정확히 예측할 수 있을 때의 기대비용과 추계적 모형을 적용했을 때 기대비용 값의 차이를 말한다.

정확한 경제상황의 확률을 반영해 완전정보에 따른 최적해를 바탕으로 의사결정을 내린다고 가정하면, 의사결정권자는 $\$66,621,065 [(0.2 \times 74,798,581) + (0.5 \times 67,666,740) + (0.3 \times 59,426,597)]$ 의 기대비용을 지불할 것이다.

그러나, 현실적으로는 정확한 경제상황을 예측하기 어려울뿐더러 제품유 가격과 시장수요의 완전한 정보를 얻기가 어렵다. 따라서 시나리오별 확률을 바탕으로 제품유 가격과 시장수요의 추계적 모형을 적용하였을 때 최적의 기대비용은 \$68,176,988이다. 따라서 완전정보의 가치는 두 기대비용의 차이인 \$1,555,923 (= \$68,176,988 - \$66,621,065)이다. 이는 미래의 정확한 정보를 얻을 때와 실제 예상된 상황에서의 지불할 수 있는 비용의 차이가 얼마나 합리적인지 측정한다.

4.3.3 추계적 해의 기대가치(The value of Stochastic solution)

무작위(randomness)의 상황을 대표하여 확률적 변동을 고려하지 않은 평균값을 반영한 모형을 설정한다. 이는 각 시나리오별로 경제상황 보통일 때의 최적해를 1단계 변수의 해로 입력하고, 2단계 변수를 시나리오별 확률을 반영한다.

Table 69 Optimal Solution_using mean value on 1st stage solution

| Name | Value | Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|------|--------|------|--------|------|-------|------|-------|
| X11 | 100000 | R222 | 0 | Y211 | 56250 | E-11 | 0 |
| X12 | 119381 | R231 | 0 | Y212 | 451 | E-12 | 36100 |
| X13 | 0 | R232 | 0 | Y213 | 0 | E-13 | 0 |
| X21 | 300000 | R311 | 0 | Y221 | 0 | E-21 | 0 |
| X22 | 0 | R312 | 0 | Y222 | 43299 | E-22 | 0 |
| X23 | 0 | R321 | 32810 | Y223 | 0 | E-23 | 0 |
| X31 | 0 | R322 | 140254 | Y231 | 0 | E-31 | 0 |
| X32 | 173064 | R331 | 141176 | Y232 | 0 | E-32 | 25900 |
| X33 | 426936 | R332 | 285759 | Y233 | 52500 | E-33 | 0 |
| R111 | 0 | Y111 | 57500 | Y311 | 31400 | I11 | 0 |
| R112 | 100000 | Y112 | 0 | Y312 | 0 | I12 | 0 |
| R121 | 0 | Y113 | 0 | Y313 | 0 | I13 | 0 |
| R122 | 119381 | Y121 | 0 | Y321 | 0 | I21 | 40199 |
| R131 | 0 | Y122 | 0 | Y322 | 0 | I22 | 0 |
| R132 | 0 | Y123 | 0 | Y323 | 0 | I23 | 10216 |
| R211 | 0 | Y131 | 17500 | Y331 | 24850 | I31 | 0 |
| R212 | 300000 | Y132 | 13900 | Y332 | 5350 | I32 | 0 |

| | | | | | | | |
|------|----------|------|--------|---------|-------|------------|-------|
| R221 | 0 | Y133 | 55500 | Y333 | 42000 | I33 | 0 |
| RM+ | 14322680 | RM- | 0 | Cost C1 | | 76,964,835 | |
| Name | Value | Name | Value | Name | Value | Name | Value |
| X11 | 100000 | R222 | 0 | Y211 | 45000 | E-11 | 0 |
| X12 | 119381 | R231 | 0 | Y212 | 0 | E-12 | 0 |
| X13 | 0 | R232 | 0 | Y213 | 0 | E-13 | 0 |
| X21 | 300000 | R311 | 0 | Y221 | 0 | E-21 | 0 |
| X22 | 0 | R312 | 0 | Y222 | 35000 | E-22 | 0 |
| X23 | 0 | R321 | 32810 | Y223 | 0 | E-23 | 0 |
| X31 | 0 | R322 | 140254 | Y231 | 0 | E-31 | 0 |
| X32 | 173064 | R331 | 141176 | Y232 | 0 | E-32 | 0 |
| X33 | 426936 | R332 | 285759 | Y233 | 42000 | E-33 | 0 |
| R111 | 0 | Y111 | 57500 | Y311 | 31400 | I11 | 0 |
| R112 | 100000 | Y112 | 0 | Y312 | 0 | I12 | 0 |
| R121 | 0 | Y113 | 0 | Y313 | 0 | I13 | 0 |
| R122 | 119381 | Y121 | 0 | Y321 | 0 | I21 | 51900 |
| R131 | 0 | Y122 | 0 | Y322 | 0 | I22 | 8299 |
| R132 | 0 | Y123 | 0 | Y323 | 0 | I23 | 20716 |
| R211 | 0 | Y131 | 2500 | Y331 | 13600 | I31 | 0 |
| R212 | 300000 | Y132 | 40000 | Y332 | 25000 | I32 | 0 |
| R221 | 0 | Y133 | 44400 | Y333 | 33600 | I33 | 0 |
| RM+ | 4646919 | RM- | 0 | Cost C2 | | 67,666,740 | |
| Name | Value | Name | Value | Name | Value | Name | Value |
| X11 | 100000 | R222 | 0 | Y211 | 31500 | E-11 | 0 |
| X12 | 119381 | R231 | 0 | Y212 | 0 | E-12 | 0 |
| X13 | 0 | R232 | 0 | Y213 | 0 | E-13 | 0 |
| X21 | 300000 | R311 | 0 | Y221 | 0 | E-21 | 0 |
| X22 | 0 | R312 | 0 | Y222 | 24500 | E-22 | 0 |
| X23 | 0 | R321 | 32810 | Y223 | 0 | E-23 | 0 |
| X31 | 0 | R322 | 140254 | Y231 | 0 | E-31 | 0 |
| X32 | 173064 | R331 | 141176 | Y232 | 0 | E-32 | 0 |
| X33 | 426936 | R332 | 285759 | Y233 | 29400 | E-33 | 0 |
| R111 | 0 | Y111 | 42000 | Y311 | 31400 | I11 | 0 |
| R112 | 100000 | Y112 | 15500 | Y312 | 0 | I12 | 0 |

| | | | | | | | |
|-----------------------|--------|------|---------|--|-------|------------|-------|
| R121 | 0 | Y113 | 0 | Y313 | 0 | I13 | 43320 |
| R122 | 119381 | Y121 | 0 | Y321 | 0 | I21 | 65400 |
| R131 | 0 | Y122 | 0 | Y322 | 0 | I22 | 18799 |
| R132 | 0 | Y123 | 0 | Y323 | 0 | I23 | 33316 |
| R211 | 0 | Y131 | 0 | Y331 | 100 | I31 | 0 |
| R212 | 300000 | Y132 | 12500 | Y332 | 17500 | I32 | 0 |
| R221 | 0 | Y133 | 31080 | Y333 | 23520 | I33 | 31080 |
| RM+ | 0 | RM- | 9729687 | Cost C3 | | 67,904,086 | |
| Overall Expected Cost | | | | $(0.2 \times 76,964,835) + (0.5 \times 67,666,740) + (0.3 \times 67,904,086) = \$69,597,563$ | | | |

추계적 모형의 기대비용과 확률적 변동을 고려하지 않은 평균값을 1단계 변수에 반영한 모형의 기대비용을 비교한 것이 추계적 해의 기대가치이며 값은 \$1,420,574 (= \$69,597,563 - \$68,176,988)이다. 이는 미래의 정확한 예측을 대신 하여 추계적 모형을 통해 현실적 기대이익을 측정한다.

4.3.4 정제마진의 비교

확정적 모형, 추계적 모형, 확률적 변동을 고려하지 않은 평균값을 1단계 변수에 반영한 모형 각각의 정제마진을 비교하면 추계적 모형에서 정제마진의 평균값이 가장 높음을 볼 수 있다. 또한 확정적 모형, 추계적 모형, 확률적 변동을 고려하지 않은 모형의 순으로 정제마진의 시나리오별 마진차이가 점점 커짐을 관찰할 수 있다.

Table 70 Refining margins : Deterministic

| Deterministic | Refining margins (\$) | Refining margins (\$/bbl) |
|---------------|-----------------------|---------------------------|
| Good | 13,161,651 | 10.97 |
| Fair | 4,646,919 | 4.15 |
| Poor | -1,754,387 | -1.77 |
| Average | 4,429,474 | 3.74 |

Table 71 Refining margins : Stochastic

| Stochastic | Refining margins (\$) | Refining margins (\$/bbl) |
|------------|-----------------------|---------------------------|
| Good | 16,475,697 | 15.99 |
| Fair | 7,180,636 | 6.97 |
| Poor | -3,998,246 | -3.88 |
| Average | 5,685,983 | 5.52 |

Table 72 Refining margins : Randomness

| Randomness | Refining margins (\$) | Refining margins (\$/bbl) |
|------------|-----------------------|---------------------------|
| Good | 14,322,680 | 12.80 |
| Fair | 4,646,919 | 4.15 |
| Poor | -9,729,687 | -8.69 |
| Average | 2,269,089 | 2.03 |

4.3.5 로버스트 최적화 모형의 유효성

로버스트 최적화 모형은 리코스 비용의 변동의 척도로 상위부분평균을 사용하며 변동에 대한 위험을 줄이고자 하는 모형이다. RO모형의 목적함수 기대값에서 상위부분평균의 가중치를 차감한 값과 RR모형의 목적함수 기대값은 상호 동일한 기대비용을 나타냄으로 두 모형이 상호 유효함을 검증했다. 로버스트 최적화 모형에서에서 상위부분평균의 가중치(ρ)를 증가시킬수록, 2단계 변수에 관한 한계(ϵ)를 낮출수록 기대비용은 증가하지만 리코스 비용의 변동이 감소함을 확인할 수 있다.

또한, 2단계 추계적 모형과 로버스트 최적화 모형을 비교했을 때 2단계 추계적모형의 기대비용은 작으나 시나리오 전개 값의 변동이 큰 반면 로버스트 최적화 모형은 기대비용을 더 지불하더라도 시나리오 전개의 극단적 위험상황에 대처하는데 유연한 모습을 보인다.

Table 73 Comparison of stochastic model and Robust optimization model

| | Stochastic | RO ($\rho=0.5$) | RO ($\rho=1$) | RO ($\rho=2$) | RO ($\rho=3$) | RO ($\rho=4$) |
|---------------------------------------|------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Expected cost | 68,176,988 | 68,176,988 | 68,201,969 | 68,201,969 | 69,997,047 | 70,830,994 |
| Recourse cost with upper partial mean | 1,900,502 | 1,900,502 | 1,874,164 | 1,874,164 | 1,074,339 | 842,962 |

또한, 2단계 추계적 모형과 로버스트 최적화 모형($\rho=1$)의 리코스 비용을 비교했을 때 로버스트 최적화 모형($\rho=1$)의 비용증가분(24,980)보다 리코스 비용의 감소분(26,388)이 더 크다. 따라서 기대비용 상승 대비 리코스 비용의 감소가 더 큰 값이 나오는 로버스트 최적화 모형($\rho=1$)일 때 유효한 경계임을 확인할 수 있다.

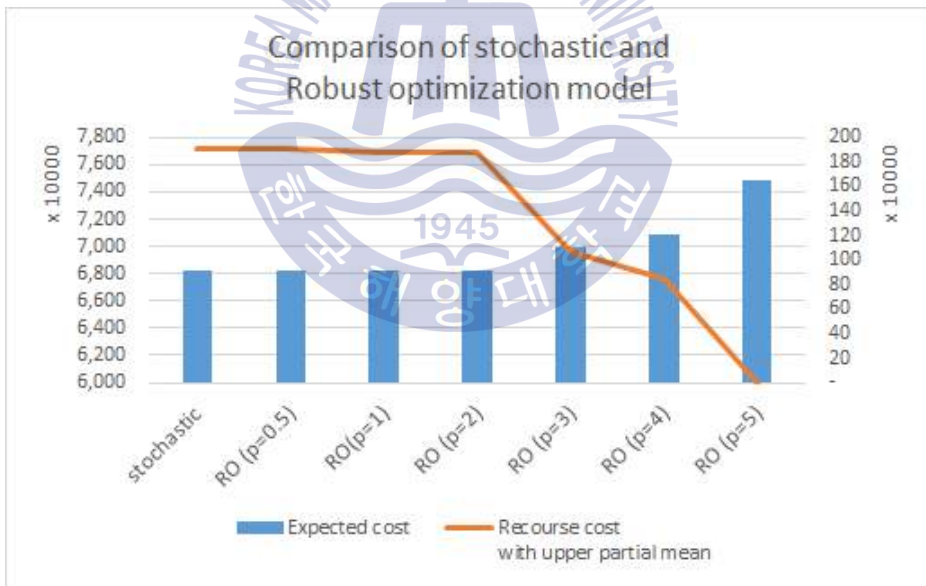


Fig. 7 Comparison of stochastic and Robust optimization model

제 5 장 결 론

오늘날 지구촌의 여러 국가 간의 복잡한 정치, 문화, 경제가 결합하여 발생할 수 있는 국제 석유시장의 가격 및 공급과 수요의 변동으로 인해 석유산업의 수익실현의 예측이 점점 어려워지고 있다. 불확실한 국제 석유시장은 정유산업과 같은 주요 석유산업뿐만 아니라 다양한 관련 산업 분야에 영향을 미치는데, 가깝게 해운산업의 경우만 해도 선박의 연료유가의 등락, 석유물류의 수송과 관련된 탱커의 수송수요와 운임의 변동 등 불확실성의 여파는 폭넓게 퍼져나간다. 이 연구는 석유시장의 불확실성 하에서 변동의 위협에 대하여 석유물류네트워크를 최적화 하는 문제를 정유산업의 운영과 관련하여 다룬 것이다.

우리나라의 경우, 원유가 전혀 생산되지 않는 나라임에도 불구하고 정유산업은 고부가가치의 정제기술력을 바탕으로 세계적으로 10위권 안에 드는 성장과 발전을 이루었지만, 불확실한 석유시장의 변동 가운데 시장의 제품유 수요를 충족시키면서 정제마진이나 원유 도입 및 제품유 수송량의 최적화를 다루는 석유물류네트워크에 관한 기존의 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 먼저 정유산업을 중심으로 하는 3단계의 수송-정제-분배 석유물류네트워크를 최적화하는 확정적 모형을 정의하였다. 그 다음에는 제품유 가격, 수송비용과 수송수요 등에 관한 불확실한 석유시장의 변화에 대하여 적용 가능한 석유물류네트워크의 추계적 최적화모형 및 로버스트 최적화모형을 제안하였다. 제안한 모형의 타당성과 유용성을 검증하기 위해 시나리오 기반의 석유시장의 변화 자료를 반영하여 계산실험을 수행하였다.

계산실험 결과, 확정적 모형과 추계적 모형의 비교를 통해 완전정보의 기대가치 및 추계적 해의 가치를 산출하였으며, 추계적 모형은 완전한 정보가 주어진 상태보다 더 나은 기대이익을 실현하기는 어렵지만, 확률적 변동을 고려하지 않은 확정적 모형의 경우보다는 더 나은 결과를 보였다. 정유회사 운영비용 최소화 모형에서 완전정보의 기대가치, 추계적 해의 가치가 양의 값이 도출되어 확정적 모형 및 추계적 모형의 유효성을 입증하였다.

또한, 확정적 모형의 민감도 분석을 통해서 관련 값들의 정보 변화가 목적함수에 미치는 영향들을 확인할 수 있었으며, 더불어 확정적 모형, 추계적 모형, 확률적 변동을 고려하지 않은 평균값을 대입한 모형들의 상호간 정제마진의 변화를 관찰할 수 있었다.

로버스트 최적화 모형에서는 리코스 비용의 변동 척도로 일반적인 분산의 척도 대신 상위부분평균을 사용함으로써 최적화모형의 비선형성의 문제를 극복하고 선형계획문제로 쉽게 접근할 수 있었다. RO모형에서는 목적함수에서 가중치 ρ 를 이용하여 가중변동을 고려하였고, RR모형에서는 2단계 기대비용의 변동의 허용수준을 ϵ 을 이용하여 통제함으로써, 전체 기대비용은 증가하지만 리코스 비용의 변동을 줄이는 효과를 나타냈다.

추계적 모형과 로버스트 최적화 모형을 비교했을 때 추계적 모형이 최소의 기댓값을 확보하나 시나리오별 편차가 크게 나타나는 반면, 로버스트 최적화 모형은 추계적 모형의 비용보다 기대비용은 다소 증가하지만 상위부분평균으로 표현된 비용은 줄어들어 변동의 대응에 유의미한 결과를 보였다. 이는 석유시황의 변동에 항상 노출되어 있는 석유물류네트워크의 최적화 문제에서, 기대비용과 리코스 비용의 절충을 고려하여 의사결정을 최적화함으로써 시황변동에 대하여 견고한 의사결정을 내릴 수 있음을 보여주었다.

향후 연구로 본 연구를 발전시켜 더 많은 의사결정변수와 제약조건들을 반영하여 4단계 이상의 네트워크로 구성된 대형 네트워크의 최적화 문제에 접목시키는 연구를 제안해 본다. 또한, 정유 산업만으로 제한하지 않고 석유화학산업 전반의 물류네트워크 최적화 문제도 연구해 볼 수 있을 것이다. 더불어, 철광산업, 기계산업, 금속 제조업 등 다양한 가공생산 산업 분야의 자재수급-가공생산-수출과 같은 3단계 물류네트워크 최적화 문제에 대하여 이 연구 결과가 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

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

오선아·허은녕, 2007, 국제시장가격변동에 따른 국내석유제품가격의 비대칭 분석. 에너지경제연구 제6권 제1호.

김시화, 2013, *살림경영경제수학*, 세종출판사.

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

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

민재형, 2015, *스마트 경영과학*, (주)생능.

오선아·최고봉·허은녕, 2015, *국내 석유제품시장의 가격 비대칭과 시장지배력 연구*. 에너지경제연구 제14권 제3호.

구지혜, 2017, *불확실성하의 해양석유생산 최적화를 위한 추계적 모형*. 석사학위논문. 부산: 한국해양대학교.

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

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

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

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

C. S. Khor, Ali E., Kumaraswamy P., Peter L. D. 2008. Two-stage stochastic programming with fixed recourse via scenario planning with economic and operational risk management for petroleum refinery planning under uncertainty, *Chemical Engineering and Processing* 47, 1744-1764.

Wafa B.E. Al-othman, Haitham M.S. Lababidi. 2008. Imad M. Alatiqi, Khawla Al-Shayji, Supply chain optimization of petroleum organization under uncertainty in market demands and prices, *European Journal of Operational Research* 189, 822-840.

K. Al-Qahtani, A. Elkamel. 2010. Robust planning of multisite refinery networks: Optimization under uncertainty, *Computers and Chemical Engineering*.

Hynsoo Do, B.ECO. 2014. Risk Management of Oil Refinery, The University of Texas at Austin.

Kunlath Sukcharoen, David J. Leatham. 2017. Hedging downside risk of oil refineries: A vine copula approach. *Energy Economics* 66, 493-507.

Georgios Mavromatidis, Kristina Orehounig, Jan Carmeliet. 2018. Comparison of alternative decision-making criteria in a two-stage stochastic program for the design of distributed energy systems under uncertainty. *Energy*.