creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학전문석사 학위 연구보고서

장치산업에서의 다품종 배치생산을 위한 스케줄링에 대한 연구

2021 년 2 월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

정 상 원

장치산업에서의 다품종 배치생산을 위한 스케줄링에 대한 연구

지도 교수 박 진 우
서 은 석

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2021 년 2 월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
정 상 원

정상원의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함
2021 년 2 월

위 원 장 _____ 오 병 수 _____ (인)

위 원 _____ 박 진 우 _____ (인)

위 원 _____ 서 은 석 _____ (인)

국문 초록

국내 정유산업은 자동차, 화학 산업과 더불어 3 대 중공업으로 불리우며 한국의 경제 성장을 책임졌던 사업이다. 지형적으로 원재료의 전량을 수입에 의존하는 불리한 점이 있었지만, 공정의 고도화율을 높이고 대규모 정제시설을 바탕으로 석유 제품 수출 비중이 국내 전체 수출의 7~8% 수준 차지('18 년 기준)하며 지속적으로 성장하여 왔다. 하지만 최근 COVID-19 사태로 인한 글로벌 경기 둔화 영향으로 지속 증가 추세였던 수출 물량이 감소하고, 정제마진이 하락하여 일부 공정 가동률이 감소하는 등의 어려움을 겪고 있다. 이에 대한 대응으로 국내 정유사들은 COVID-19 이후 마진 회복 및 수출 경쟁력 우위 선점을 위해 자체 회복 탄력성을 확보하면서 장기적인 전략 준비에 노력을 기울이고 있다. 일반적인 정유 산업의 특성은 대규모 장치산업에 속하며 시장 수요 변화에 능동적 유연한 대처가 타 산업 대비 상대적으로 어려운 편이다. 또한 국내/글로벌 경기에 따라 경기 순환 주기를 가지며 원자재 가격 변동 등의 다양한 환경 변화가 산업에 영향을 미치는 경우가 많다. 최근 COVID-19 에 의한 경기둔화 영향 외에도 중국의 석유제품 수출 증가에 따른 경쟁 심화, 미국 셰일 오일 생산 증가 등도 정유산업에 영향을 미치고 있는 실정이다. 이런 환경 변화에 대응하여 국내 정유사들은 원자재 구매 단계, 공급망 관리 단계 등을 포함하여 다각도로 제품 생산 경쟁력을 확보하기 위한 노력을 지속하고 있다. 본 연구에서는 공급망 관리 마지막 단계인 정유 공장에서 생산되는 다양한 석유 제품을 효율적으로 제조하는 방법에 대한 연구를 다루고자 한다. 정유산업의 공급망 관리 단계에서는 원거리 원유 구매 소요 기간을 고려하여 수 개월 이상의 최적화된 중기 계획을 수립한다. 중기 계획 중에는 구매/생산/판매 계획이 포함되며, 석유 제품 제조는 이러한 생산 계획을 근간으로 기간이 더 짧은 단기 운영 계획을 수립하여 운영 된다. 하지만 실시간 공정 변화, 제품 수급 요인 등의 다양한 운영 환경 변화에 따라 최적으로 수립된 생산계획과 차이가 발생하기도 한다. 이러한 차이는 제품 생산 제조 단가에 영향을 미칠 수 있으며, 운영 손실로 이어지는 경우도 발생한다. 본 연구에서는 석유제품 제조 과정에서 생산 계획과의 차이 최소화하기 위한 단기 최적화 모델을 연구하는 것을 목표로 하였다. 해당 모델은 가장 최근의 현장 데이터를 수집 후 입력을 통해 단기간의 제품 운영 비용을 최소화할 수 있는 운영

가이드를 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다. 더불어 석유 제품 제조/운영 단계에서의 단기간의 수급 과/부족 점검과 운영 리스크 점검 등의 효과가 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 최적화, 제품 배합, 스케줄링, 실시간, 품질확보, 제조 경쟁력
학 번 : 2019-21553

목 차

제 1 장 서론
1.1 연구 배경 및 목적 1
1.2 연구 범위 4

제 2 장 방법론 및 관련 연구 6
2.1 경영과학(Operations Research) 6
2.2 수리계획법(Mathematical Programming) 9
2.3 수리계획법의 종류 및 관련 이론 10
2.4 장치 산업의 최적화 관련 연구 23

제 3 장 현황 및 문제 정의 26
3.1 석유산업의 특성 26
3.2 석유 제품 특성 27
3.3 석유 제품 제조 방식 30
3.4 정유산업 공급망 관리 34
3.5 스케줄링 시스템 필요성 39

제 4 장 모델 구성 42
4.1 개요 42
4.2 구성 요소 47

제 5 장 모델 구동 결과 52
5.1 구동 결과 52
5.2 모델 민감도 분석 61

제 6 장 결론 및 향후 계획 69
6.1 결론 69
6.2 정유 산업의 미래와 스마트 공장 70

참고문헌 71

Abstract 77

표 목차

[표 2-1] 산업분야의 수리계획법 활용 9
[표 2-2] 선형 계획법의 구성 요소 12
[표 2-3] 선형 계획법의 기본 가정 13
[표 2-4] 선형 계획해법의 발전 17
[표 3-1] 자동차유/선박유 경유 규격 30
[표 4-1] 모델 입력 변수 43
[표 5-1] 모델 기본 정보 52
[표 5-2] 완제품 입력 변수 예시 53
[표 5-3] 반제품 물량/재고 입력 변수 예시 54
[표 5-4] 모델 구동 결과 요약 55
[표 5-5] aAf 가격 변동에 따른 Objective 변화 62
[표 5-6] aAd 생산량 변동에 따른 Objective 변화 64
[표 5-7] 가동량 범위 완화에 따른 Objective 변화 66
[표 5-8] 완제품 성상 강화에 따른 Objective 변화 67
[표 6-1] 스마트 공장의 단계 구분 70

그림 목차

[그림 1-1] 원유 처리 증류 과정 2
[그림 1-2] 석유 제품 제조 프로세스 3
[그림 1-3] 연구 범위 선정 5
[그림 2-1] 경영과학 접근 방식 7
[그림 2-2] 경영과학 관련 분야 8
[그림 2-3] 선형계획법 예시 11
[그림 2-4] 심플렉스 법 14
[그림 2-5] 심플렉스 법 반복 절차 15
[그림 2-6] 내부점 해법 16
[그림 2-7] 정수 계획법 해 17
[그림 2-8] 분기한정법 예시 20
[그림 2-9] Multiship Shittle Tanker Scheduling 21
[그림 2-10] 절단 평면법 예시 21
[그림 2-11] COSP 네트워크 24
[그림 2-12] 일반적인 휘발유 배합 시스템 25
[그림 3-1] 분리 공정 경유 생산 31
[그림 3-2] 업그레이드 공정 처리 32

[그림 3-3] 전환 공정 경유 생산 33
[그림 3-4] 정유산업 공급망 관리 개요 35
[그림 3-5] Sales & Operation Planning 36
[그림 3-6] 공급망 생산 단계 운영 37
[그림 3-7] 스케줄링 단계 변동 요인 39
[그림 3-8] 단기 스케줄링 모델 예시 40
[그림 4-1] 최적화 모델 개요 42
[그림 4-2] 수리 모델 개략도 44
[그림 4-3] 모델 목적함수 및 제약 개요 45
[그림 5-1] 모델 기본 정보 예시 53
[그림 5-2] 기본 모델 구동 결과 55
[그림 5-3] 공정 가동량 결정 56
[그림 5-4] 반제품 A 그룹 재고 57
[그림 5-5] 최종 재고 제약 추가 Case 58
[그림 5-6] 반제품 B 그룹 재고 59
[그림 5-7] 완제품 Eae 의 배합비 결정 60
[그림 5-8] 민감도 분석-가격 변동 시나리오 63
[그림 5-9] 기본 구동 모델 aAd 재고 Trend 64
[그림 5-10] aAd 생산량 따른 사용량 및 Objective 변화 65
[그림 5-11] 공정 가동량 결정(Base 모델) 66
[그림 5-12] 가동량 허용 범위 완화 시 Objective 변화 67
[그림 5-13] 품질 규격 강화 시 Objective 및 가동량 평균 68
[그림 6-1] 최적화 모델의 역할 69

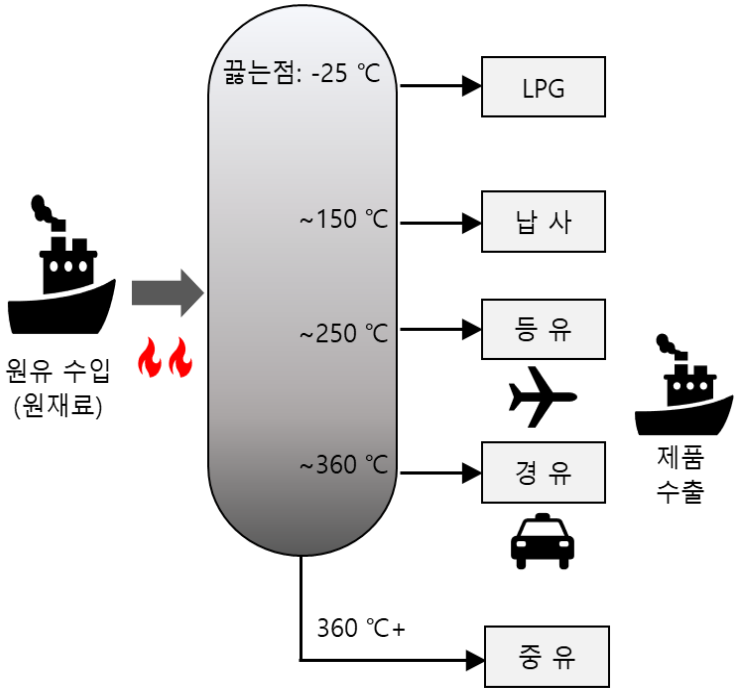
제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

정유공장의 공급망 관리 프로세스는 일반적으로 구매, 생산, 판매 단계를 거쳐 수행된다. 해외에서 전량 수입되는 원재료 (원유)를 가공하여 국내 또는 해외로 석유제품을 판매함으로 수입/수출 관련 유동 물량 규모가 큰 편이다. 이 중 가장 큰 비중을 차지하는 자동차 연료용 경유, 휘발유 등은 생산단계에서 구매자가 요구하는 품질 규격 또는 국가별 석유제품 규격을 충족하는 제품으로 완성되어 판매 단계로 넘겨진다. 이렇듯 석유제품 제조는 공급망 관리의 생산단계 마지막 과정에 속하게 되며, 제품의 제조과정은 원재료에 해당되는 원유를 상압증류탑 ① 으로 투입하여 생산되는 반제품을 기본으로 시작된다. 원유를 높은 온도로 가열 후 상압증류탑에 투입하게 되면 원유 내 포함된 다양한 유분들이 끓는점 차이에 의해 분리되며 가장 가벼운 액화석유가스 유분부터 가장 무거운 중유 유분까지 분리된다. 약간의 상압 조건에서 원유를 분리함으로 상압증류탑으로 부르며 원유 증류 장치라고 부르기도 한다[1]. 상압증류탑에서 분리된 유분들의 주요 사용처를 간략히 살펴보면, 꼭대기에서 생산되는 액화석유가스 유분은 가정의 연료나 자동차 연료로 활용되며, 납사 유분(끓는점: 70~150 도)은 주로 석유화학 공정 원료로 활용된다. 다음 상압증류탑 중간층 아래에서 생산되는 등유/경유 유분 (끓는점: 150~360 도)의 경우 항공기 연료, 가정용 연료, 자동차 연료로 주로 활용된다. 마지막으로 증류탑 바닥에서 생산되는 중유의 경우, 다음 단계의 공정을 거치면서 일부는 아스팔트로 생산되거나 상대적으로 가벼운 등/경유 유분으로 업그레이드되기도 한다. 상기에서 설명한 원유 증류 과정은 아래 [그림 1-1]과 같다.

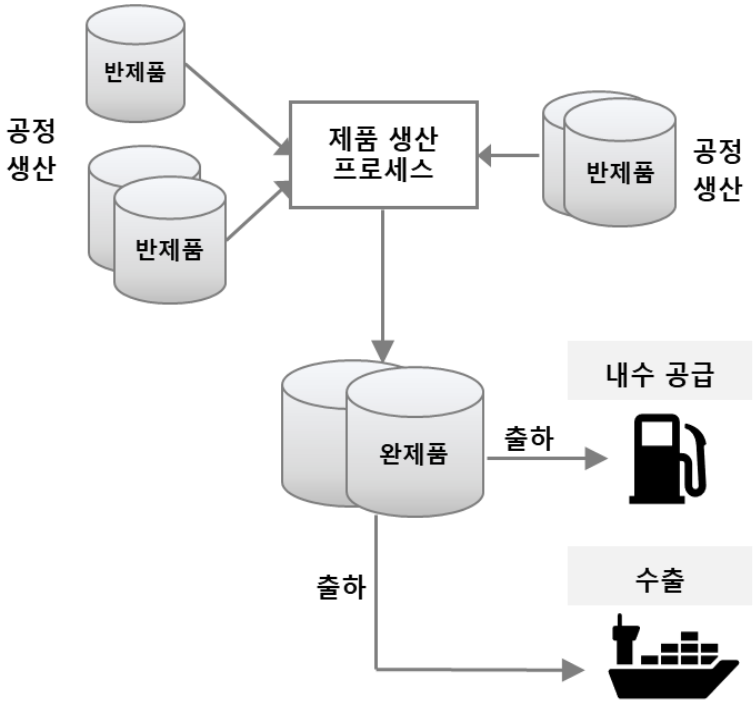
---

① 상압증류탑(Atmospheric Distillation Unit) : 원유에 포함된 다양한 석유제품을 끓는점의 차이를 이용하여 상압 조건하에서 분리하는 장치로 원유 증류 장치(Crude Distillation Unit, CDU)와 같은 의미임.



[그림 1-1] 원유 처리 증류 과정

[그림 1-1]과 같이 상압증류탑에서 끓는점 차이에 의해 분리된 유분들은 직접 석유 제품으로 활용되는 경우도 있으나, 대부분의 경우 분리된 유분 안에 불순물을 제거하기 위한 후처리 공정을 거치게 된다. 이후 규격 충족이 되면 제품으로 바로 활용할 수도 있고 각 유분 간의 배합을 통해 최종 석유 제품으로 완성된다. 이렇게 완성되는 석유 제품 제조 과정에서는 반제품과 완제품으로 용어를 구분하여 사용한다. 완제품의 경우, 고객이 요구하는 석유 제품의 규격을 만족하는 최종 생산 제품으로 정의될 수 있으며, 완제품이 만들어지기 전 단계인 후처리나 배합이 되기 전의 생산 유분을 반제품으로 정의한다. 일반적인 석유 제품(완제품)의 제조는 원유 증류 생산 반제품, 불순물이 제거된 반제품, 원유 증류 외 공정에서 생산된 반제품 등이 서로 혼합되고 필요시 첨가제가 추가되는 등의 과정을 포함하는 제품 생산 프로세스를 거친다. 해당 프로세스는 반제품 및 완제품 탱크 간의 이송/배합과 더불어 품질검사, 재고 관리, 제품 출하수단 스케줄 관리 등이 모두 포함된다. [그림 1-2]는 상기 언급한 석유 제품 제조 프로세스를 간략하게 표현하였다.



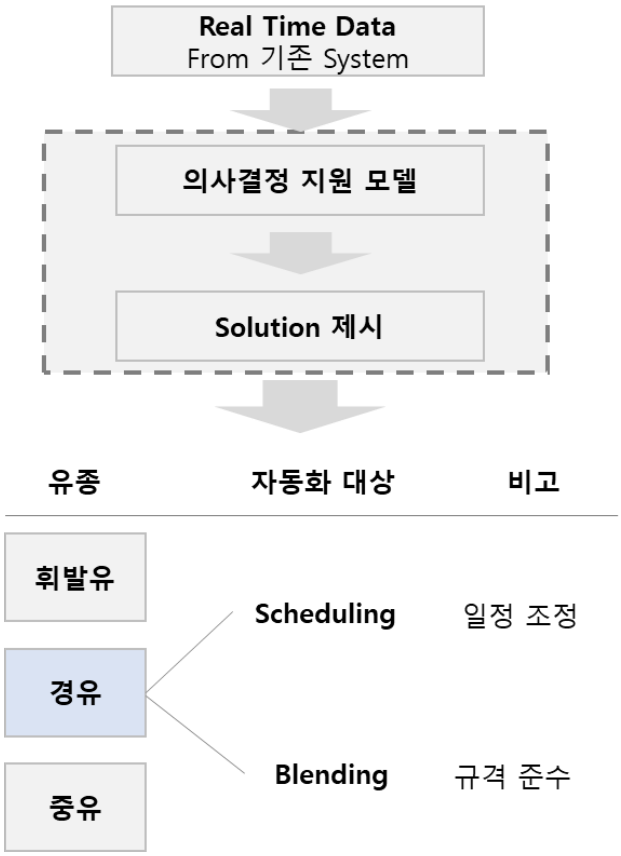
[그림 1-2] 석유 제품 제조 프로세스

대규모의 다양한 공정에서 매일 쏟아져 나오는 반제품을 앞서 언급한 석유 제품 제조 프로세스에 따라 규격을 충족하는 완제품으로 원활하게 생산하기 위해서 제조 프로세스 운영에 대한 계획이 필요하다. 일반적으로 공장 전체의 생산계획에는 원유 구매에서부터 제품 판매까지의 석유 공급망 관리 전체를 포함하는데 앞선 석유 제품 제조 프로세스는 생산 계획 상의 제품 생산부분으로 일부 포함되어 함께 수립된다. 정유공장의 생산 계획은 수립 기간에 따라 장기/중기/단기 계획으로 구분될 수 있으며 장기는 다년, 연간 계획 등을 포함하며 중기는 월간, 단기는 주간/일간 계획 등으로 구분할 수 있다. 또한 생산 계획에는 구매/판매 계획을 포함하는 공급망 전체의 수급 계획 및 공정 용량, 운영 제약 및 현황 등이 반영되어 생산계획이 수립된다. 이러한 생산 계획은 정유사 간의 경쟁 강화에 따른 생존과 높은 경쟁력 유지를 위해 최적화 접근 방식(Optimization Approach)을 활용하고 의존해 왔으며 전통적인 프로그래밍 방식을 활용하여 공급망 관리 영역을 확장하면서 지속적으로 고도화된 방식들이 연구되고 있다[2].

석유 제품 제조 프로세스(이하 석유 제품 운영)에서 보다 효과적인 완제품 생산을 위해서는 앞서 언급한 최적화(Optimization) 방식으로 수립된 생산 계획에서 제시되는 가이드를 준수하여 운영하는 것이 무엇보다 중요하다. 하지만 다양한 환경 변화 요인에 의해 생산 계획 상의 목표와 실제 제품 운영 간에 차이가 발생할 수 있다. 이는 생산 계획상의 최적화된 목표는 평균 수치를 기반으로 이상적인 목표를 제시하지만 실제 제품 운영 상에서는 위에서 언급한 바와 같이 환경 변화 요인에 의한 제약이 발생하기 때문이다. 최적화된 계획 가이드와 실제 운영 간의 차이를 최소화하기 위해서는 최신 운영 데이터와 제약을 반영한 의사결정 지원 모델을 구축하여 제품의 생산 경쟁력을 높이고 의사결정 소요 시간(Lead Time)을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

1.2 연구 범위

‘1.1 연구 배경 및 목적’에서 언급한 바와 같이 정유 공장의 석유 제품 제조 프로세스는 공정 반제품을 규격과 일정에 맞게 완제품으로 생산하는 과정을 포함한다. 일반적으로 완제품이 완성되면 탱크와 같은 저장용기에 저장되고 품질 검증 후 판매를 위해 다양한 운송 수단으로 물류 센터나 판매처로 이송되게 된다. 이러한 완제품 중 경유, 휘발유, 항공유 등 끓는점이 중간 범위에 해당하는 제품 판매 물량이 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 제품 제조 과정도 복잡한 편이다. 따라서 본 연구의 범위는 상압증류탑과 다양한 공정에서 생산되는 반제품을 배합 제조하여 효율적으로 완제품 제조하여야 하며 타제품 대비 많은 유동성을 가진 경유 제품 제조에 대해 다루고자 한다. 아래 [그림 1-3]과 같이 기존 시스템에서 생성되는 최신의 데이터를 기반으로 경유 제품의 제조 일정을 결정하고 고객의 요구 규격에 맞춘 제품을 생산할 수 있는 의사결정 가이드 솔루션을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.


Real Time Data
From 기존 System
의사결정 지원 모델
Solution 제시
유종
자동화 대상
비고
휘발유
경유
중유
Scheduling
일정 조정
Blending
규격 준수

[그림 1-3] 연구 범위 선정

제 2 장 방법론 및 관련 연구

2.1 경영과학(Operations Research, 이하 OR)

2.1.1 개요

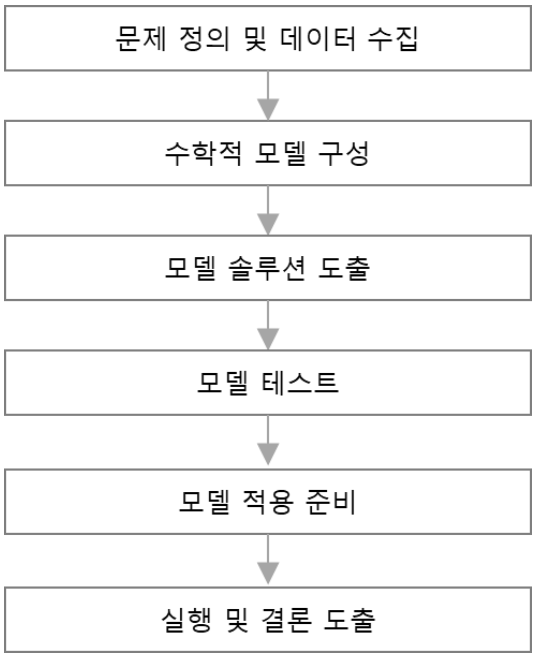
경영과학은 문제를 분석하고 수학적 모형이나 통계적 모형을 활용하여 합리적인 최적의 의사결정을 내릴 수 있도록 데이터를 활용하는 경영기법이다. 즉, 더 나은 결정을 내리는데 도움이 되는 고급 분석 방법의 적용을 다루는 학문으로 정의될 수 있다[3]. 일반적으로 제 2 차 세계 대전 당시 영국에서 시작된 것으로 알려져 있으며 당시 군사 계획 담당자들이 레이더 방어 시스템의 개발과 운영 시스템을 효율적으로 운영하는 개선 방안을 연구하게 되었고 이러한 연구가 현대 경영과학의 초석이 되었다. 이 후 경영과학은 다양한 산업의 문제를 다루면서 성과를 내고 점진적으로 발전해 왔다. 'Operations Research' 저널에서 경영과학 분야로 다루는 연구 주제들은 아래와 같다[3].

- 컴퓨팅 & 정보 기술
- 제조, 서비스 및 공급망 관리
- 의사결정 분석(Decision Analysis)
- 금융 공학(Financial Engineering)
- 마케팅 과학(Marketing Science)
- 매출 관리(Revenue Management)
- 확률적 모형(Stochastic Models)
- 최적화(Optimization)

2.1.2 접근 방식

경영과학 연구의 접근 방식[4]은 아래 [그림 2-1]과 같이 단계 별로 진행되며, 각 단계별로 명확히 이해하여 일반적인 문제에 적용할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 또한 각 단계가 진행된 후에도 지속적으로 이전 단계와 연계한 피드백이 이루어져서 전체가 개선되는 모습으로 진행되어야 한다. 대부분 학문적으로 강조되는 단계는 중간 단계 이후의 모델의 구동 및 결과 분석에 초점이 맞추어 지는 경우가 많지만 초기 단계도

매우 중요하다. 경영과학에 의한 완성된 모델이 현실에 효과적이거나 실용적이지 않는 경우는 초기 문제 정의 단계의 중요성을 간과하고 진행되었을 가능성이 높다[5]. 따라서 초기에 문제가 무엇인지 찾아내고 정의하는 단계에서는 문제의 범위와 원하는 결과가 명확히 무엇인지를 구체화할 수 있어야 한다.



[그림 2-1] 경영과학 접근방식

2.1.3 관련 이론

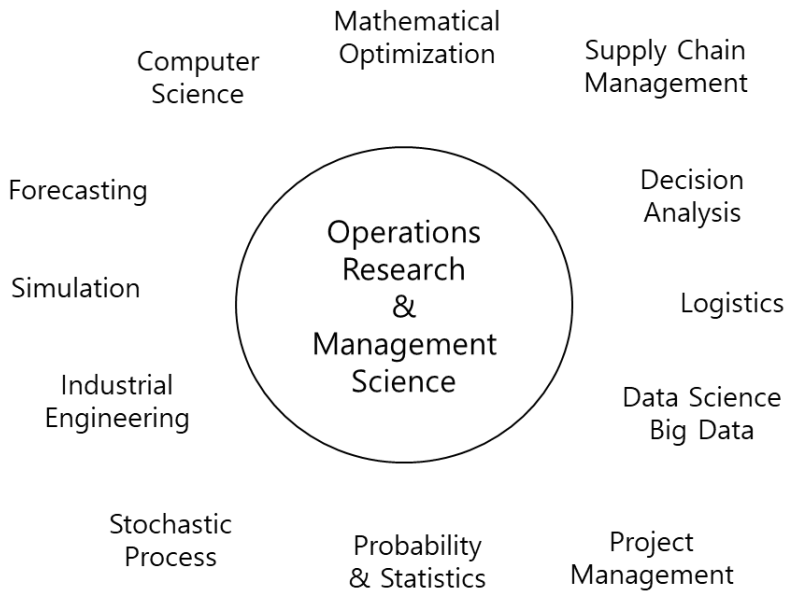
경영과학은 아래와 같은 다양한 이론을 기반으로 연구 발전해 왔다. 주요 이론은 '2.2 수리 계획법'에서 상세히 살펴볼 예정이다.

- 선형 계획법(Linear Programming)
- 정수 계획법(Integer Programming)
- 비선형 계획법(Nonlinear Programming)
- 네트워크 최적화(Network Optimization)
- 동적 계획법(Dynamic Programming)
- 게임 이론(Game Theory)
- 의사결정 분석(Decision Analysis)
- 마르코프 체인(Markov Chains)

· 대기 이론(Queuing Theory)

2.1.4 연구 분야 및 활용

경영과학(Operations Research & Management Science)는 다양한 분야와 관련되어 연구[6]되고 있으며, [그림 2-2]와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2-2] 경영과학 관련 분야

관련 연구 분야가 광범위함으로 활용 분야도 항공업계, 제조업, 서비스 업종, 정부 업무 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 대표적인 사례로는 항공기의 일정과 승무원의 배치하는 계획을 효율적으로 수립할 수 있는 의사결정 모형 구축 사례[7]이다. 기상악화 등과 같은 환경 변화가 발생하면 변경되는 운항 일정에 따라 재빠르게 승무원을 재배치 계획을 수립하여 항공사 손실을 최소화하고 승객의 만족도를 높이는 효과를 가져올 수 있었다. 이러한 사례를 일반적인 기업 환경과 연계하여 생각해 보면 지속적으로 기업을 둘러싼 환경이 변화가 발생하며 변화된 환경 조건에서 수익을 최대화하고 비용을 최소화하려는 경영을 항시 추구하게 된다. 이는 경영과학과 관련한 수학적 최적화(Mathematical Optimization) 관점으로 다르게 정의할 수 있다.

변화되는 환경은 다양한 제약 조건(Constraint)으로 수식화 하고 해결해야 할 문제는 목적함수(Objective Function)으로 정의할 수 있다. 이렇게 수리적 모형으로 문제를 구체적으로 구현할 수 있다면 다양한 방법론으로 최적해(최대 또는 최소화 지점)을 찾아낼 수 있다. 이러한 수학적 최적화는 수리 계획법[②] (Mathematical Programming)에 의해 실현되며 산업계에서는 이를 공급망 관리의 생산 계획 (구매/판매 포함), 투자 계획, 운송 비용 절감 등에 활용[표 2-1]하고 있다.

[표 2-1] 산업분야의 수리계획법 활용

구 분	내 용
공급망 관리	구매, 생산, 판매의 공급망 관리 단계에서의 원료 구매 계획, 공장 가동량, 판매 물량 및 판매처 등을 의사결정을 지원. 즉, 무엇을 어디서 얼만큼 사서 어떻게 가공하여 어디로 얼만큼 팔지를 결정함.
투자 계획	정해진 투자 금액(자원) 내에서 어떤 투자 및 자산에 각각 얼마나 투자할 지에 대한 결정
자원/인력 운용 계획	인력을 포함하는 자원을 얼마나 언제 확보하여 어떻게 최적으로 운영할 수 있는지 계획 제시 예)은행, 병원, 항공사, 놀이공원, 콜센터 등
운송 비용 절감	비용 절감을 위한 최적 경로 제시 (최단 거리, 최소 시간 등)
조달 계획	정해진 기간 중의 물류 최적 운영 계획 수립

② 계획법(Programming): 컴퓨터 프로그래밍(Programming)과는 다른 용어로 본 연구에서의 계획법은 경영과학(Operations Research) 분야에서 활용되는 최적화 도구 개념의 용어임.

2.2 수리 계획법(Mathematical Programming)

2.2.1 개요

수리 계획법은 경영과학(OR)의 주요 기법으로 선택 가능한 대안 집합에서 최선의 방법을 선택하는 것으로 정의할 수 있다[8]. 최적화(Optimization)로도 표현이 가능하며 '2.1.4'에서 언급한 바와 같이 다양한 환경 제약 속에서 합리적인 의사결정을 위해 수학적 모형을 기반으로 최적해를 구하는 방법론을 말한다.

2.2.2 기업의 적용

기업에서의 최적 의사결정 문제는 경영 목표를 달성하기 위해 가용한 자원을 어떻게 최적으로 활용할 것인지를 결정하는 것이다. 한정된 자원 내에서 최소 비용 또는 최대 효용을 목적으로 자원을 효율적으로 활용하는 방법을 제시하는 것이 최적해(Optimal Solution)를 구한 것이라고 말할 수 있다. 이러한 최적해를 구하기 위한 수리모형 구성을 위해서는 결정 변수(Decision variables) 및 제약 조건(Constraints)과 함께 목적함수(Objective Function)를 보다 구체적으로 정의하는 것이 중요하다. 정량적이지 못한 모호한 변수/조건/함수 정의는 수리 계획법의 결과가 목표와 다른 솔루션을 도출할 위험성이 커진다.

2.3 수리 계획법의 종류 및 관련 이론

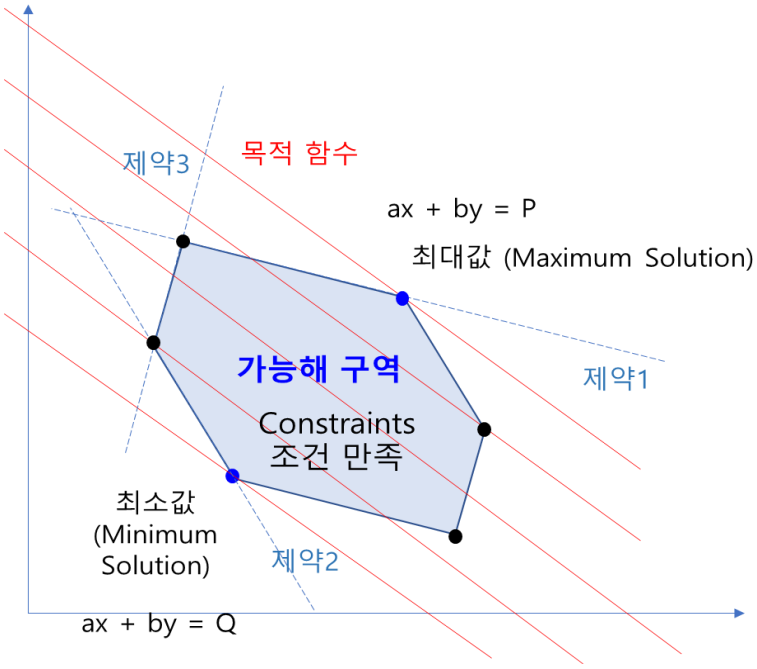
2.3.1 선형 계획법(Linear Programming)

선형 계획법은 경영과학의 가장 대표적인 기법으로 목적 함수와 제약 조건들이 모두 1 차 식으로 표현되는 수리 계획법이며 목적 함수를 최적화(최대화/최소화)한다. 1930~40 년 대에 최초로 연구된 최적화 문제는 식단 문제(Diet Problem)였다[16]. 군인들의 식단의 영양분은 유지하면서 비용을 최소화하려는 시도가 이루어졌다. 당시 대규모 계산으로 77 개의 미지수를 가진 9 개의 방정식으로 구성된 문제를 수동 탁상 계산기로 120 man day 가 걸려서 산정하였다. 이후 1947 년 조지 버나드 단치히(George B. Dantzig)가 미 공군에서 문제를 계획에 사용할 선형 계획법 공식을 독자적으로 개발하였으며, 선형 문제를 효율적으로

풀 수 있는 심플렉스 법(Simplex Method)[9]을 개발하였다. 이후 1984 년 나렌드라 카마카(Narendra Karmarka)가 내부점 해법(Interior Point Method)[10]을 활용한 선형 계획법 해법을 소개하였으며, 이후 컴퓨터 성능 및 알고리즘의 발전으로 CPLEX③, GLPK④, Gurobi⑤ 등 다양한 최적화 알고리즘 및 소프트웨어 들이 개발되어 산업계에서 널리 활용되고 있다.

- 개요

  선형 계획법의 목표는 제약조건을 동시에 만족하는 최적해를 찾는 것이다. 아래 예시[그림 2-3]와 같이 선형 형태의 다수의 제약에 의해 목적 함수의 가능해 구역이 정해진다. 해당 구역 내에서 목적함수가 최대값(P) 또는 최소값(Q)을 가지게 되는 x, y 값이 최적해라고 할 수 있다.



[그림 2-3] 선형계획법 예시

③ CPLEX : IBM 사의 ILOG CPLEX Optimizer 의 줄임말로 사용되며 선형, 혼합 정수, 2 차 프로그래밍 문제를 위한 수학적 솔버(Solver)를 제공함. [11]
④ GLPK : GNU Linear Programming Kit 의 줄임말. ANSI C 로 작성 및 호출이 가능한 라이브러리 형식의 루틴 세트임. [12]
⑤ Gurobi : 설립자의 이름을 따서 명명된 Optimizer 회사

· 구성 요소

선형 계획법의 구성 요소[13]는 목적 함수(Objective Function), 결정 변수(Decision Variable), 제약조건(Constraint) 3 가지로 구분하며, 구성 요소 별로 아래 [표 2-2]에 설명과 예시를 표기하였다.

[표 2-2] 선형 계획법의 구성 요소

구 분	내 용
목적 함수	의사결정의 목표로서 최대/최소화하고자 하는 1 차 함수 형태로 표현될 수 있음. 목표는 제품 생산 수익 최대화, 비용 및 시간 최소화 등으로 정의됨. $Objective\ Function$: $Maximize\ \ Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \ \ldots.\ + c_nx_n$
결정 변수	1 차 함수 형태의 목적 함수와 제약 조건을 만족하는 조건에서의 하나 또는 다수의 의사결정 변수가 존재할 수 있음. 목적함수와 더불어 결정 변수를 명확히 정의하는 것이 중요함. $Decision\ Varialbes\ :\ x_1\ , x_2, \ldots, x_n$
제약 조건	다양한 제약 조건 선정이 가능하며 정해진 제약 조건에 의해 결정 변수의 가능해 집합이 결정됨. $Subject\ to$: $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ \ldots.\ + c_{1n}x_n\ \leq\ b_1$ $a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ \ldots.\ + c_{2n}x_n\ \leq\ b_2$ $\vdots$ $a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ \ldots.\ + c_{mn}x_n\ \leq\ b_n$

· 기본 가정

선형 계획법의 모든 가정(확실성, 비례성, 가합성, 가분성)은 [표 2-2]에 표기된 각 구성요소의 공식(formula)에

내포되어 있다.[4] 그러나 모델링 관점에서 이러한 수학적 속성에 대한 가정이 대상 문제에 얼마나 타당한지 여부가 모델의 유효성(Validity)에 영향을 준다. 즉, 4 가지 가정 조건을 모두 만족하는 선형 계획모형이 의사결정에 도움이 되는 최적해를 찾을 가능성을 높인다. 기본 가정에서 벗어나는 모형의 경우, 최적해를 구하기 어렵거나 최적해가 아닌 결정 변수를 구하는 오류를 범할 가능성이 높아진다.

[표 2-3] 선형 계획법의 기본 가정

구 분	내 용
확실성 (Certainty)	의사결정 변수 외에는 각각의 계수들의 값이 확정적이라고 가정함.
비례성 (Proportionality)	목적함수와 제약식은 선형 관계를 가져야함.
가합성 (Additivity)	목적함수의 각 결정변수의 이익의 합이 목적함수 전체의 이익과 같아야 함.
가분성 (Divisibility)	'분할성'이라고도 하며 해는 정수해가 아닌 분수나 소수도 가능함.

· 모형의 해법

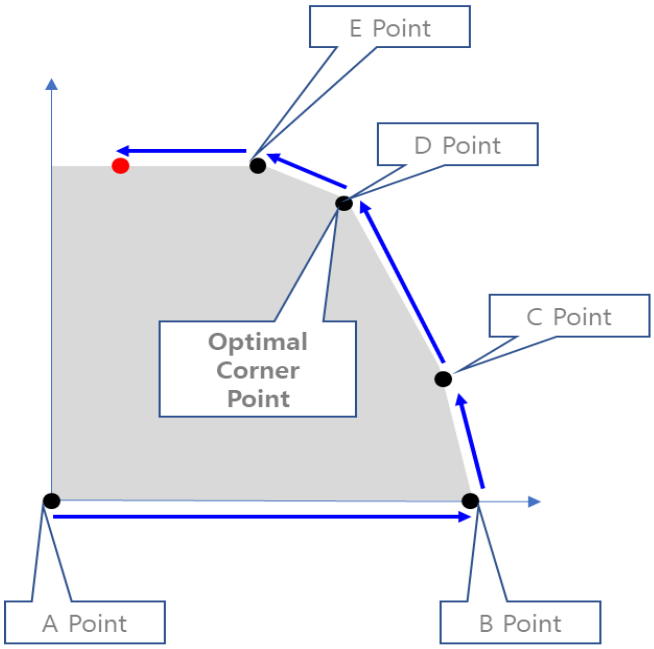
일반적으로 문제의 해법은 하나의 최종 해답이라는 의미가 익숙하지만, 선형 계획모형에서의 해(Solution)의 성격은 일반적인 의미와 다른 성격을 갖는다[4]. 결정 변수의 집합(x_1, x_2 ..., x_n)의 타당성 여부와 상관없이 모두 해집합으로 말할 수 있다. 이에 따라 해집합을 아래와 같이 실행 가능한 해(Feasible Solution)와 실행 불가능한 해(Infeasible Solution)으로 나누어 구분한다.

- 실행 가능한 해: 모든 제약을 동시에 만족하는 해
- 실행 불가능한 해: 하나 이상의 제약을 만족하지 못하는 해
- 가능해 구역(Feasible Region): 실행 가능한 해의 모음

결정변수가 2 개인 아주 단순한 선형 계획 모형의 경우, 도해법(Graphical Solution)을 활용하여 제약과 목적함수를 2 차원 그래프로 표현하여 최적해를 구하는 방법도 존재한다.

· 심플렉스 법(Simplex method) [4][14]

1947 년 조지 버나드 단치히(George B. Dantzig)에 의해 개발되었으며, 아래 [그림 2-4]와 같이 원점(A Point)에서 시작하여 목적 함수 값이 개선이 되는 이웃한 꼭지점으로 이동하여 최적해 꼭지점을 찾는 방법이다. 이 방법은 가능해 구역의 해를 모두 고려하지 않고, 신속하게 최적해를 찾을 수 있는 장점을 가진다.



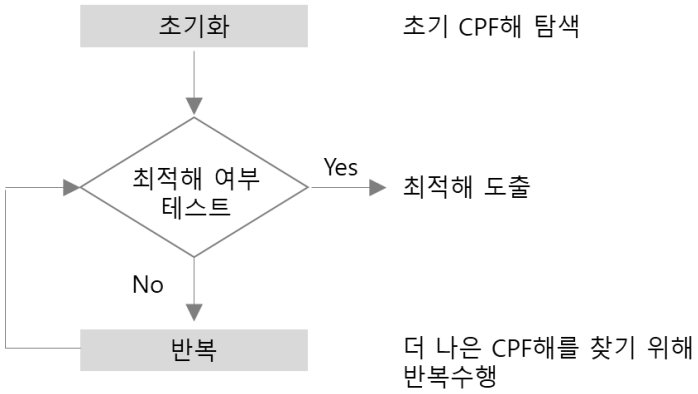
[그림 2-4] 심플렉스 법

심플렉스 법의 핵심 개념[4]은 아래와 같다.

① CPF⑥ 해에 초점을 둔다. 최소 하나의 최적해를 갖는 문제에서 가장 최적의 해는 CPF 해이기 때문이다.

⑥ CPF: Corner-Point Feasible 의 줄임말로 가능해 구역의 꼭지점에 존재하는 해를 뜻함.

② 심플렉스 법은 반복적인 알고리즘이다. 아래 [그림 2-5]와 같은 과정을 반복하며 최적해를 구한다.



[그림 2-5] 심플렉스 법 반복 절차

③ 초기 CPF 해는 원점(0,0)을 사용한다. 이는 결정 변수들이 많은 경우 시간을 단축할 수 있고 가장 쉽게 최적해를 찾을 수 있기 때문이다.

④ 최적해 여부를 점검할 때 기준 CPF 해의 가까운 CPF 해만 확인하며 다른 CPF 해는 고려되지 않는다. 이에 따라 [그림 2-4]와 같이 전체 이동 경로는 가능해 구역의 꼭지점을 따라 이동하게 된다.

⑤ 현재의 CPF 해가 찾아지면 이웃하는 꼭지점을 점검하고 다음 이동은 개선률(Z)이 가장 높은 CPF 해로 이동한다.

⑥ 개선률(Z)이 양의 값을 가지는 이웃 꼭지점으로의 이동은 인접하는 CPF 해가 현재보다 더 나은 해임을 의미하며, 양의 개선률을 가지는 꼭지점이 없다면 현재의 CPF 해가 최적해가 된다.

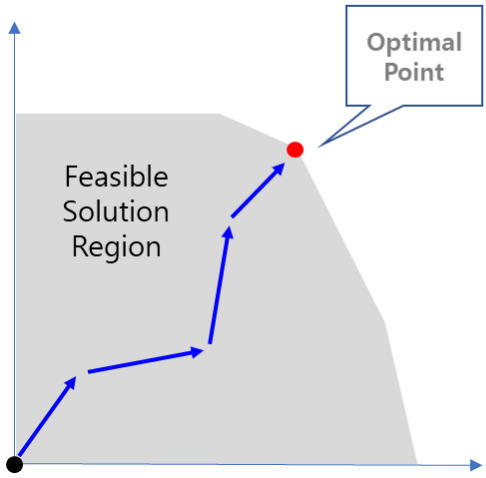
심플렉스 법은 컴퓨터를 활용하여 대수적으로 방정식을 풀어 내는 방식으로 최적해를 구하게 된다. 이에 따라 부등호를 가진 제약식을 모두 등호의 제약식으로 전환이 필요한데 해당 전환 과정에서 여유 변수(Slack Variable)을 활용하게 된다. 또한 여유 변수를 활용하여 제약식이 확장되며 이에 따라 확장된 해(augmented solution) 및

기저해(basic solution), 기저가능해(BF solution) 등의 용어들이 사용된다.

- 내부점 해법(Interior Point Method) [4][15]

  1984 년 나렌드라 카마카(Narendra Karmarka)에 의해 개발되었으며, 아래 [그림 2-6]와 같이 실행가능해 구역의 내부를 횡단하여 최적해를 찾는 방법이다. 기본 개념을 요약하면 아래와 같다.

  1) 가능해 구역 내부를 통해 최적해를 확보한다.
  2) 가능한 빠른 속도로 목적함수 값을 향상시키는 방향으로 이동한다.
  3) 가능해 구역을 변형하여 현재 시도되는 해 가까이에 위치시켜서 2) 개념이 실행될 때 더 큰 개선이 가능하도록 한다.

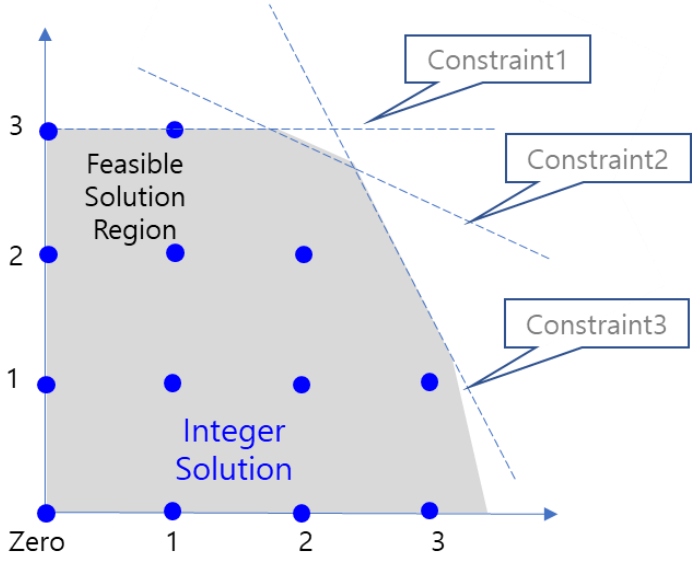


[그림 2-6] 내부점 해법

2.3.2 정수 계획법(Integer Programming Models : IP) [4]

결정 변수들 중 일부(혹은 전부)가 정수 값을 가져야 한다는 제약조건을 가진 최적화 모형으로 일반적으로 혼합정수선형계획법을 정수계획법(IP 또는 MIP)으로 표기한다. 앞선 2.3.1 항에서 설명한 선형 계획법은 다양하게 분야에서 활용되고 있지만 기본 가정인 가분성(divisibility)으로 인해 더 많은 분야 활용에

제약이 발생한다. 예를 들면 인력, 기계 및 차량 등의 현실적인 최적화 문제에서는 결정 변수가 정수의 값을 가져야만 의미 있는 최적해로 판단할 수 있다. 또한 정수 계획법은 더 중요한 의사결정을 지원할 수 있다. 그 것은 "예" 또는 "아니오"와 관련된 의사결정 문제이다. 예를 들어 프로젝트의 착수 여부, 투자 여부 등을 의사 결정할 때 활용될 수 있다. 이렇듯 선형 계획법 대비 장점은 보다 현실적인 모형 수립이 가능하며, 논리적 관계 모형화가 가능하다. 하지만 모형 수립의 난이도가 상대적으로 높고, 최적해를 구하기 어려운 점이다.



[그림 2-7] 정수 계획법 해

이러한 정수계획법은 정수의 형태와 혼합 여부에 따라 순수정수 계획법(Pure Integer Programming), 혼합 정수 계획법(Mixed Integer Programming), 이진 정수 계획법(Binary Integer Programming)으로 구분될 수 있다.

- 이진 정수 계획법 : 모든 변수가 0 아니면 1 인 모형으로 프로젝트의 투자 분석, 이진배낭 문제, 설비 투자 장소 선택, 생산 및 물류 네트워크 디자인 의사결정 문제 등에 활용될 수 있다. 각 결정 변수들의 때론 상호 배타적 대안(mutually exclusive alternatives)의 성격을 가진다면 추가적인 별도의

제약 조건을 추가해야 하는 경우도 있다. 예를 들면 A 프로젝트와 B 프로젝트는 동시에 수행될 수 없다는 조건이 있다면 $x_A + x_B = 1$ 또는 ≤ 1의 제약이 추가되어야 한다.

$$x_i = \begin{cases} 1 & if \quad \text{의사결정}\, i\, \text{가}\, yes\, \text{인 경우} \\ 0 & if \quad \text{의사결정}\, i\, \text{가}\, no\, \text{인 경우} \end{cases} \qquad (j = 1, 2, \ldots, n)$$

$$Z(\text{목적함수}) = \text{이 결정들에 의한 총 이익}$$

- 혼합 정수 계획법: 선형 계획법과 유사하고 일부 결정 변수가 이산적이지 않은 정수인 계획법이다.[17] 배합 최적화 문제와 공장 생산 계획 수립 등에 활용 될 수 있다.

- 순수 정수 계획법: 모든 변수가 정수인 계획법으로 집합 커버 문제 등을 풀 때 활용된다.

위와 같은 정수계획법은 2.3.2 항 서두에 언급한 바와 같이 선형 계획법 대비 해를 구하기 어렵다. 이러한 정수 계획법에 대한 해법 알고리즘은 세 가지 주요 범주로 나누어 볼 수 있다.[18]

- 근사 알고리즘 (LP Relaxation): 선형 계획법에 의한 근사한 해를 구하는 방법으로 해를 구하여 반올림하거나 절삭하여 정수해를 구하는 방법이다. 가장 간단한 방법이지만 실행 가능하지 못한 해를 구하거나 최적해를 구하지 못할 수 있다.

- 경험적 접근 알고리즘: 최적해를 보장하지는 않지만 일부 좋은 솔루션을 빠르게 찾아갈 수도 있다.

- 정확한 알고리즘: 절단 평면 법(Cutting Plane Method), 분기 한정법(Branch and Bound method), 동적 계획법(Dynamic Programming)등 이 포함되며 최적해를 찾는 것을 보장하지만 수많은 반복(Iteration)으로 해를 찾는데 시간이 오래 걸릴 수 있다.

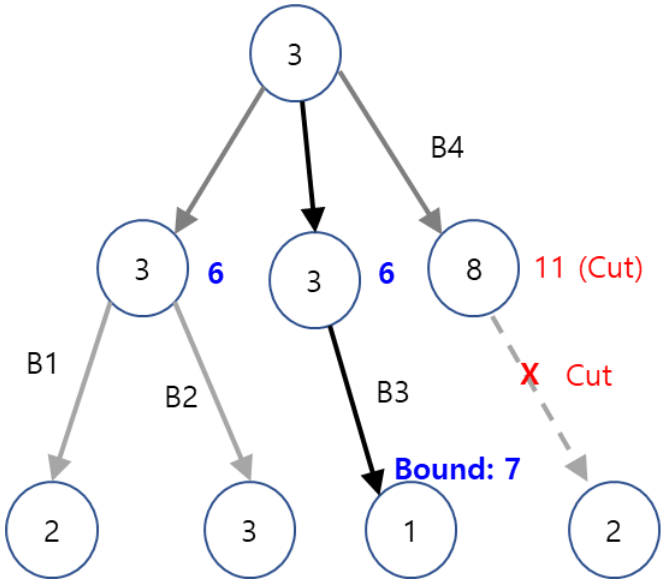
정확한 최적해를 제시하는 알고리즘 3 가지에 대해 다음 2.3.3 항에서 좀 더 자세히 살펴볼 예정이다.

2.3.3 정수 계획법 해법

- 분기 한정법(Branch and Bound) [19]

출장 세일즈맨의 최단거리 찾기 알고리즘[20]으로 잘 알려져 있으며, 일반적인 최적화와 같은 목적으로 주로 이산이나 조합 최적화에서 해를 찾는 분야에서 활용된다. 1960 년 British Petroleum 에서 후원하는 런던 연구 대학에서 이산 프로그래밍(Discrete Programming)에 대한 연구[21]를 수행한 에일사 랜드(Ailsa Land)와 앨리슨 하코트(Alison Harcourt)가 처음 제안하였고 NP Hard 최적화 문제를 해결하는 데 가장 일반적인 도구가 되었다.[22]

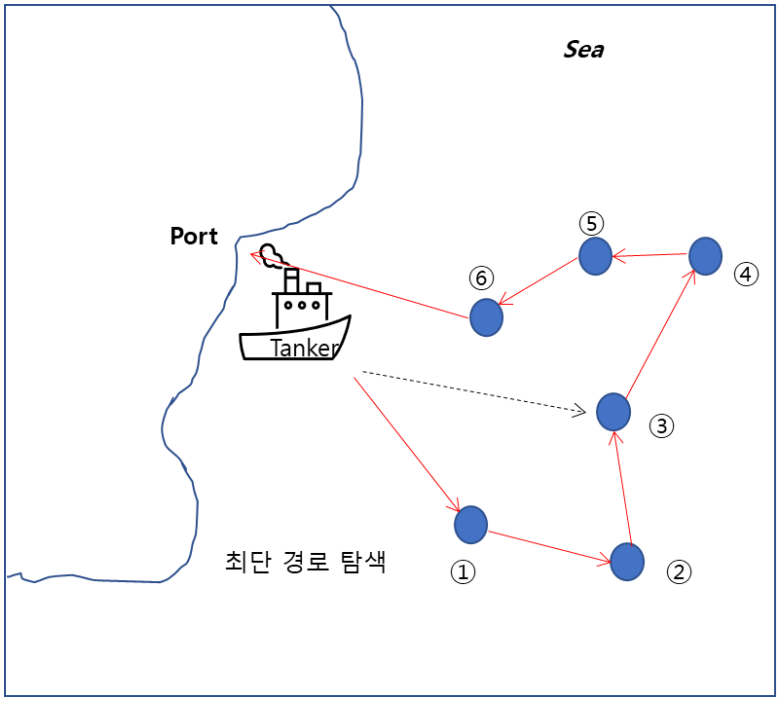
이 해법의 기본 개념은 나누고(divide) 정복하는(conquer) 것이다. 분할(Branching) 단계에서는 가능해 전체 집합을 더 작은 하위 집합으로 분할하여 수행된다. 다음 정복(fathoming) 단계에서는 나누어진 부분 집합 내에서 가장 좋은 부분집합을 기준으로 한계(bound)를 계산한다. 계산된 한계를 기준으로 최적해 가능성이 없는 부분집합을 가지치기하여 최적해를 효율적으로 찾아가는 방법이다. 초기에 분할 단계에서 상태 공간 트리를 검색하는 방법은 깊이 우선 탐색(Depth First Search), 너비 우선 탐색 (Breadth-First Search), 최고 우선 탐색(Best-First Search) 세 가지로 나누어 진다. 최적화해야 하는 문제의 종류에 따라 검색하는 방법을 적용할 수 있다.



[그림 2-8] 분기 한정법 예시

분기 한정법은 위의 [그림 2-8]을 통해 간단히 설명할 수 있다. 분할 단계를 거쳐 부분 집합에 대한 상태 공간 트리가 구성되면 각 가지(B1, B2, B3)를 따라 가면서 각각 최적해(합 최소화)를 계산해 나간다. 세번째 가지(B3)에서 현재까지의 최적해 7 을 가지는 경로를 구했다면, 다음 네번째 가지(B4) 경로에서는 두 번째 단계까지 한계치 (3+8=11)를 계산해 보고 이미 앞선 B3 의 최적해를 넘어서게 됨으로 중단시키고 이후 뻗어져 가는 가지들의 집합은 고려하지 않게 된다. 이렇듯 수많은 조합의 경우의 수에서 가능성이 없어진 가지의 경우 잘라버리는 절단(Cut)의 과정이 포함된다. 이렇듯 분기한정법은 분기 (Branch) → 한정(Bound) → 절단 (Cut) 과정을 거치게 된다.

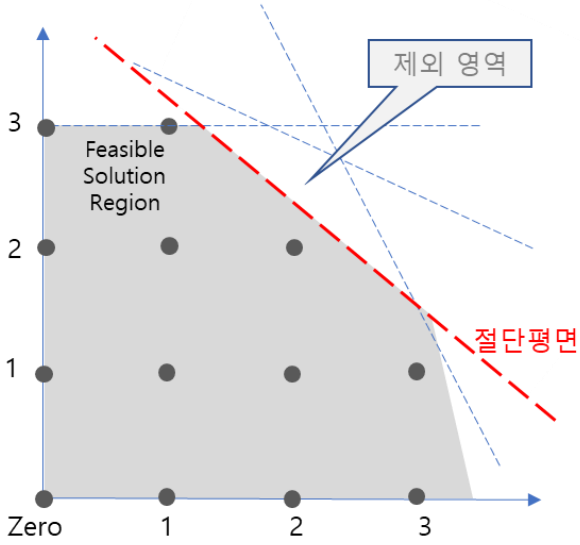
산업계에서는 이러한 분기한정법 알고리즘을 적용한 정수 계획법으로 여러 곳에서 원재료를 싣고 수송하는 경우, 이동 거리 또는 비용 최적화가 가능하다. 특히 정유 산업에서는 아래 [그림 2-9]와 같이 해상에 대기 중인 여러 척의 선박에 최적 경로로 연료를 공급하는 최적화 문제에 정수 계획법을 활용하기도 한다.[23]



[그림 2-9] Multiship Shuttle Tanker Scheduling

· 절단 평면 법(Cutting Plane Method) [24]

수학적 최적화에서 절단 평면법은 가능해 구역이나 목적 함수를 반복해서 제외하여 최적해(정수해)를 구하는 방법이다. 일반적으로 혼합 정수 계획법(MILP)나 볼록 최적화 해를 찾는데 사용된다.



[그림 2-10] 절단 평면법 예시

2.3.4 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

장치 산업을 포함한 다양한 산업에서 선형 계획법이나 정수 계획법을 활용하여 다양한 최적화 문제를 해결하고 활용되고 있음을 2.3.1 항 및 2.3.2 항에서 살펴보았다. 다양한 분야에서 계획 모형을 활용하여 현재 제약 조건하 최적해를 구하는 것은 중요한 일이다. 하지만 경영과학에서는 한 단계 더 나아가 어떤 변수와 제약 조건들이 최적 해에 영향을 미치는지 분석해 보게 된다. 이렇게 선형 계획모형에서 제약 변수의 변경에 따른 최적해의 변화를 분석하는 것을 민감도 분석(Sensitivity Analysis)라고 한다. 민감도 분석의 장점은 어떠한 제약들이 최적해에 큰 영향을 주고 있고 방해가 되고 있는지를 찾아냄으로써 더 나은 최적해를 얻을 수 있는 환경 변화 조건을 분석 가능하다. 이러한 민감도 분석의 유용성[25]은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 의사결정 고도화: 최적해의 건전성 및 견고성 점검, 최적 전략 변화에 따른 임계값(Critical Value) 및 손익분기점 (Break-even Point) 확인, 민감도가 높고 중요한 변수 확인, 전략 변화에 따른 효과 비교, 시나리오의 리스크 점검 등
- 시스템 이해도 증진: 입력/출력 값 간의 관계 규명 등
- 커뮤니케이션 강화: 다양한 솔루션 제공으로 의사결정자 신뢰도 상승.
- 모델 고도화: 오류 탐색, 정확도 향상, 단순화 효과 등

상기 유용성 외에도 민감도 분석은 모델을 만드는 모델러에게도 도움이 될 수 있다. 모델러는 사용자가 원하는 모델을 완성한 후 모델 신뢰도를 평가해야 한다. 신뢰도 평가는 모델 결과에 대한 불확실성(Uncertainty)의 정량화가 필요하며, 입력 값들이 결과 값의 불확실성에 어느 정도 기여하는지 평가도 필요하다.[26] 이러한 불확실성에 대한 점검은 초기 모델 민감도 분석을 통해 가능하다.

주로 민감도 분석을 실시할 때는 허용 증가치(감소치)와 잠재 가격(Shadow Price)라는 용어를 많이 사용하게 된다. 허용

증가치는 최적해를 변화시키지 않는 목적 함수 상의 계수의 변화 허용 범위를 말한다. 즉, 해당 계수가 허용치 내에서 커지거나 작아지더라도 최적해 값은 변하지 않는다. 잠재가격은 제약 조건 내에서 자원 제약의 변동에 따른 최적해의 변화 정도로 설명할 수 있다. 즉, 자원이 1 단위 늘어나게 되면 최적 수익은 1.5 수준으로 늘어날 수 있다는 정보를 주게 된다. 잠재가격이 높은 자원 제약일수록 제약이 완화되게 되면 최적해의 값이 커지면서 수익이 늘어날 수 있다는 것을 의미한다.

이렇듯 계획모형에서 최적해를 찾아내는 것과 더불어 허용증가치와 잠재가격 등을 분석하여 추가적인 최적해 기대값을 분석하는 민감도 분석 활동은 경영활동에서 중요한 역할을 한다. 또한 장치 산업에서는 설비 투자에 대한 경제성 등을 평가 시 원자재 및 제품 가격 변화에 따른 경제성 영향을 점검하는 분야에서도 민감도 분석 방법론이 활용[27]되고 있다.

2.4 장치 산업의 최적화 관련 연구

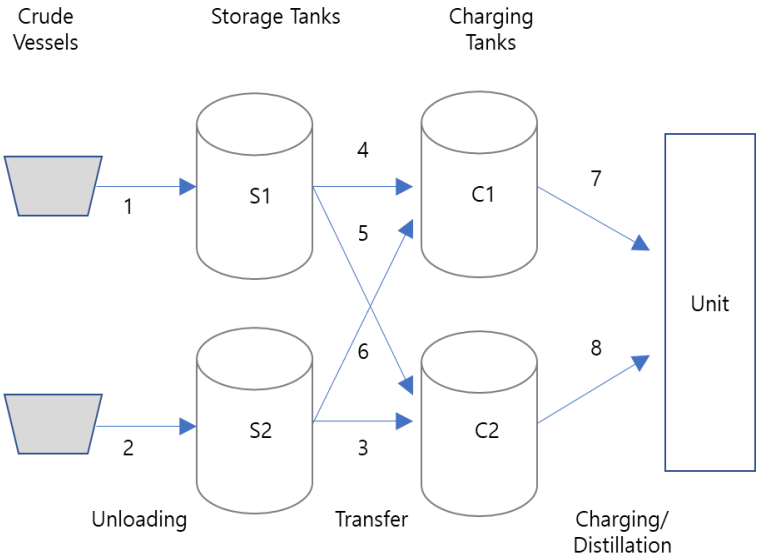
제조업을 포함하는 장치 산업에서의 경영과학과 연관한 최적화 방법론은 다양한 분야에서 활용되고 있으며 이와 관련된 연구들도 활발히 진행되고 있다. 이번 2.4 절에서는 정유산업 중심으로 장치산업에서의 최적화 연구 사례를 살펴볼 예정이다.

2.4.1 원자재 스케줄링 최적화 관련 연구

정유사들은 구매, 생산, 판매의 구조를 가지는 공급망 관리 단계에서 복잡한 스케줄링 문제에 직면해 있다. 이런 복잡성을 줄이기 위해 원유 도입 운영, 생산, 제품 혼합 및 분배 등 3 개의 프로세스로 구분하게 되는데 이런 프로세스 중 첫 번째 원자재(원유) 운영 일정을 최적화하는 부분을 연구한 사례[28]이며 'Crude Oil Operations Scheduling Problem(COSP)'로 명명한다. 일반적인 원유 스케줄링 네트워크는 [그림 2-11] 과 같이 표현되며 COSP 에서 의사결정이 필요한 요소들을 나열하면 아래와 같다.

· 기간 중 얼마나 많은 원유 하역 및 탱크 이송이 이루어지는가?
· 각 하역/이송 작업들의 시작 및 소요 시간은 얼마인지?
· 각 하역/이송 작업 중에 이송하는 원유 물량은 얼마인가?”

또한 해당 연구 모델의 목적함수는 스케줄링의 최적화를 통해 장치(Unit)에 투입되는 원유 혼합물의 비용을 최소화하여 수익을 최대화하는 것으로 설정하였다.

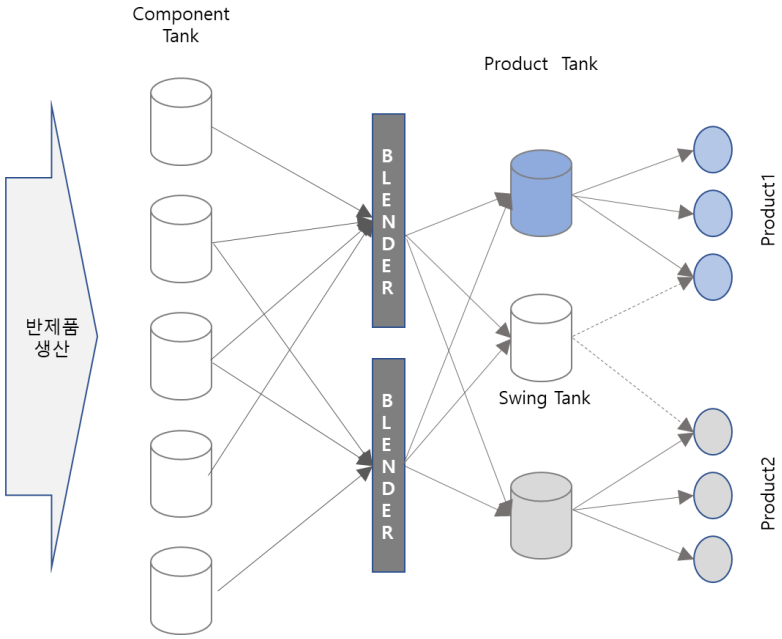


[그림 2-11] COSP 네트워크

원자재(원유) 배합/공급 프로세스 상에는 기상 변화 포함 다양한 변화와 제약이 발생한다. 이런 환경 하에서 운영 상의 낭비요소 최소화 및 원자재 비용 절감을 통해 수익 마진 최대화 방안을 스케줄링 측면에서 연구한 것은 큰 의미를 가진다. 다만 해당 연구 모델의 효과를 최대한 향유하기 위해서는 우선 실제 현장에서의 계획 이행률이 높아야 한다. 또 다른 원자재 스케줄링 관련 연구로는 혼합 정수 계획법(MILP)과 비선형 계획법(NLP)을 통합하여 혼합 정수 비선형 계획(MINLP)를 구현한 연구 사례[29]도 있다.

2.4.2 제품 생산 스케줄링 최적화 관련 연구

정유 공정에서 일반적인 휘발유 제품은 아래 [그림 2-12]과 같이 운영된다. 휘발유는 제품 스케줄링의 복잡성 외에도 다양한 반제품의 혼합으로 비선형적 혼합 성상을 보여주기도 하는데 이를 해결하기 위해 글로벌 최적화 알고리즘을 제안한 연구[30]와 연속적인 혼합 정수 계획법(MILP) 접근을 제시한 연구[31]가 있다. 이 외에도 RTO(Real Time Optimizer)를 활용한 실시간 휘발유 배합 최적화 연구[32], 휘발유 스케줄링 시스템 상에 연속 시간 (continuous-time) 공식을 제시한 연구[33], 휘발유 비선형 혼합 최적화를 위한 DNA 기반의 하이브리드 알고리즘 개발 연구[34] 등 제품 운영 관련 다양한 연구가 진행되었다.



[그림 2-12] 일반적인 가솔린 배합 시스템

제 3 장 현황 및 문제 정의

3.1 석유 산업의 특성

3.1.1 국내 석유산업 현황

석유산업이란 원유 및 석유제품을 모두 포함하는 산업으로 크게 원유 탐사, 시추, 개발, 생산 등 채굴과 관련된 상류 부문(Upstream)과 원유 수송, 정제, 석유제품 판매 등을 포함하는 하류 부분(Downstream)으로 나눌 수 있다. 국내 정유산업은 석유사업 중 하류 부분이 집중되어 있으며 전통적인 3 대 중공업(자동차, 화학 포함)으로 불리우며 한국의 성장을 책임졌던 산업이다. 원재료를 전량 수입하여 가공 판매하는 구조이지만 공장의 고도화율이 높고 대규모 정제시설을 갖추고 있어서 '18 년 기준 한국 전체 수출액의 7~8% 수준을 차지할 정도로 지속적으로 발전해 왔다. 최근 발생한 COVID-19 사태로 인한 글로벌 경기 둔화로 정제 마진 하락, 가동율 감소 등의 어려움을 겪고 있으나, COVID-19 이후의 마진 회복 및 수출 경쟁력 우위 선점을 위해 자체 회복 탄력성을 확보하면서 장기적인 전략 준비에 노력을 기울이고 있다. 이와 같은 정유 산업의 환경 변화에 대한 특성[35]은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 장치산업의 규모가 크며 급격한 수요 변화에 타 산업 대비 유연한 대처가 어려운 편이다. 경기가 좋은 시기에 증설을 결정하고 시행하게 되면 대규모 투자를 수반하게 된다. 이 후 증설된 공장들이 동시에 가동되기 시작하면 수요 대비 공급이 많아지는 경향을 보인다. 즉, 글로벌 경기에 민감하며 경기 순환 주기를 가진다.
  - 순환 주기 : 경기호황 → 수요확대 → 대규모 증설투자 → 공급과잉 → 경기침체 → 경기호황
- 특히 공급 과잉 시점에 COVID-19 와 같은 글로벌 경기 둔화 요인이 발생하면 수요가 급격히 감소하는 현상이 발생한다.
- 국내의 석유 수요는 일정 수준이 유지되고 있으며 이에 따라 정유산업의 성장동력은 수출 경쟁력과 연계된다. 이는 글로벌

경기 침체는 곧 수출 경쟁력 악화로 이어질 가능성이 매우 높다. 원재료 전체를 수입에 의존하다 보니 유가, 환율, 국제 정세 등의 영향으로 인한 원자재(원유) 가격 변동 영향도 큰 편이다.

- 또한 대외적으로 미국의 셰일 오일 생산 증가, 중국의 석유 제품 수출 증가 등도 국내 정유산업에 영향을 미치고 있는 실정이다.

3.1.2 국내 석유산업 발전 전략 관련

'18 년 에너지 경제 연구원에서 발표한 '국제 석유시장 구조 변화에 따른 한국 석유산업 중장기 발전전략' 보고서[36]의 분석 내용에 따르면 국내 석유산업의 하류 부문은 세계 8 위의 정제시설 규모와 세계 5 위의 수출경쟁력을 갖춘 역량을 보유하고 있으며 지속 성장해 왔다. 그러나 석유사업의 지속적인 성장을 위해 석유산업의 허리에 해당되는 석유의 저장 및 수송, 이와 연계된 거래 기능에 해당되는 중류' 부문의 강화가 필요하다고 강조하고 있다.

3.2 석유 제품 특성

3.2.1 석유 제품 종류

석유 제품은 1.1 절에서 설명한 바와 같이 경질(LPG, 납사, 휘발유), 중(中)질(항공유, 등유, 디젤), 중질(벙커씨, 아스팔트) 제품으로 분류된다. 이러한 제품들은 원유를 증류하여 생산되는 다양한 반제품을 혼합하고 적절한 첨가제를 추가하여 완성되며 제품 판매를 위해서는 탱크 저장, 수송 수단 준비 등의 과정이 필요하다[37]. 대표적인 제품은 아래와 같다.

① 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas)

: 상압증류 공정, 접촉개질공정 및 분해공정 등에서 회수한 가스 성분 중 프로판, 부탄 성분을 분리/정제하여 생산하며 자동차 연료, 난방용, 발전소 연료 등으로 활용된다.

② 납사(Naphtha)

: 원유 정제과정에서 액화석유와 등유 사이에서 유출되는 유분으로 경질납사와 중질납사로 구분됨. 석유화학 산업의 원료로 주로 사용되며 도시가스 및 합성비료 등 화학공업의 원료로 활용된다.

③ 휘발유(Gasoline)

: 비점 범위가 30~200℃ 정도의 휘발성이 있는 액체 상태의 석유제품으로 중질유 분해공정에서 나온 반제품을 주요 원료로 다양한 석유화학 부산물이 배합되어 생산된다. 자동차, 경비행기 또는 스파크 점화식 내연기관의 연료로 사용된다.

④ 항공유(Jet Fuel)

: 제트 엔진에 사용되는 연료유로서 군용 항공기와 민간 항공기에 사용되는 항공유로 구분된다.

⑤ 등유(Kerosene)

: 석유제품 중 가장 오래 전부터 사용되어 온 석유제품으로 일반적으로 가정용 난방기기에 사용되는 석유를 말한다.

⑥ 경유(Diesel)

: 자동차용 경유는 환경 규제 충족을 위해 원유를 증류할 때 등유 다음으로 유출되는 Light Gas Oil 를 수첨탈황시설[⑦]에서 처리하여 실내등유와 첨가제 등을 적절히 배합하여 생산한다. 자동차용 경유는 초저유황 경유(10 ppm)만 생산하며, 고유황 경유는 선박용 연료로 활용된다.

⑦ 중유 (Bunker A/B/C)

: 내연기관, 보일러 및 각종 용광로에 적합한 연료로 원료 증류 시 증류탑의 하부에서 나오는 잔사유를 주원료로 하며 경질유, 중질가스유를 주요 규격(황함량, 유동성, 동점도 등)에 맞추어 적절히 배합하여 생산한다. 상압증류탑 잔사유의 경우 대부분 업그레이드 공정 원료로 활용되어 생산량이 감소되어 운영된다.

---

⑦ 수첨탈황시설 : 석유제품에 포함된 황성분을 제거하기 위해 고온 고압의 반응기에 수소를 첨가하여 황을 제거하는 공정임.

3.2.2 경유 제품 특성

본 연구에서 다룰 경유 제품은 주로 자동차와 발전기, 선박, 건설기계 등 고속 경유 엔진에 사용된다. 일반적으로 경유 제품은 아래와 같은 특성을 가진다.

- 세탄가[⑧] 규격을 만족하여 착화성이 양호해야 하며, 점도/휘발성이 일정한 수준으로 유지되어야 함.
- 유해한 불순물이 없어야 함.
- 동절기 저온에서의 사용에 문제가 없어야 함.
- 엔진마모를 방지하기 위해 일정 수준의 윤활성 규격을 만족해야 함.

특히 동절기에는 경유에 포함된 Wax 가 석출되면서 색상이 흐려지거나 연료계통 여과기 막힘 현상이 발생할 수 있어서, 이런 저온 성상을 관리하여 생산한다.

3.2.3 석유 제품 규격

각각의 제품 별로 규격이 굉장히 다양하여 모두 열거하기 어려움으로 본 연구에서 다루는 경유 제품의 규격에 한정하여 살펴보겠다. 경유 제품 규격은 일반적으로 국내 자동차 경유 생산 규격과 수출용 규격으로 나눌 수 있다. 수출 제품의 경우 국가 별 정책이나 기후에 따라 품질 규격이 상이하며 구매자가 별도의 규격을 요구하는 경우가 많다. 아래[표 3-1]은 국내용 자동차 경우 생산 규격의 예시이다. '3.2.2 항 경유 제품 특성'을 만족하기 위해 각 규격의 상한/하한 값에 충족하는 제품을 생산한다.

---

⑧ 세탄가(Cetane Number) : 경유 제품의 연소 속도와 점화에 필요한 압축 정도를 나타내는 지표로 활용됨. 디젤 엔진에서 높은 세탄가 연료는 낮은 연료 대비 점화지연 시간이 짧다.

[표 3-1] 자동차유/선박유 경유 규격 [38]

항목 / 등급	자동차용	선박용
유동점(℃)	0.0 이하	0.0 이하
인화점(℃)	40 이상	
동점도(40℃, mm2/s)	1.9~5.5	1.5~6.0
증류성상(90% 유출온도,℃)	360 이하	-
10% 잔유중 잔류탄소분(무게%)	0.15 이하	0.20 이하
물과 침전물(부피%)	10 이하	
황분(mg/kg)	10 이하	500 이하
회분(무게%)	0.02 이하	0.01 이하
세탄값(세탄지수)	52 이상	40 이상
동판부식(100℃, 3h)	1 이하	
필터막힘 점(℃)	-18 이하	-
윤활성@60℃(HFRR 마모흔경)	400 이하	-
밀도@15℃(k/m3)	815~835	-
다고리방향족 함량 (무게%)	5 이하	-
방향족화합물 함량 (무게%)	30 이하	-
바이오경유 함량 (부피%)	2~5	-
색(육안식별)	-	빨간색

3.3 석유 제품 제조 방식

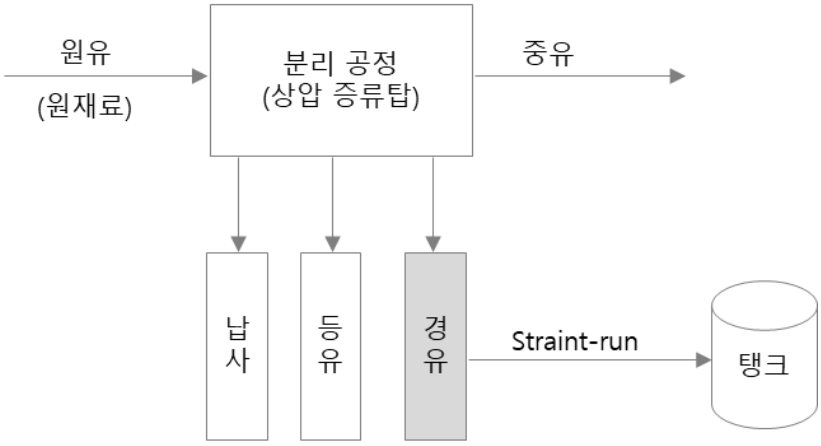
석유 제품 제조 방식은 생산 공정, 규격 및 저장 조건 등이 제품별로 상이함으로 제조 방식도 다른 특징을 가진다. 3.2.2 항과 동일하게 경유 제품 중심으로 생산 공정과 제조 방식의 특징에 대해 알아보겠다.

3.2.1 경유 생산 공정 [39]

정유 공장은 독립적인 개별 공정의 조합으로 이루어지며 공정은 크게 세 가지 타입으로 분류할 수 있다. 각 공정에서 생산되는 경유 반제품들은 한 곳으로 모아져서 배합 및 첨가제 투입 등의 제조 과정을 거쳐 경유 완제품으로 완성된다.

① 분리 공정(Separation Process)

분리 공정은 정유 공장에서 가장 일반적으로 활용되는 공정이다. 원료가 공정에 투입되면 물리적 성질(주로 끓는점)에 의해 두 가지 또는 그 이상의 유분들로 분리된다. 가장 대표적인 분리 공정은 상압증류탑과 같은 증류 공정이다. 원유가 상압증류탑에 투입되면 끓는 점 차이에 의해 반제품들이 분리되며, 증류탑 중간 단계에서 경유 반제품이 생산된다. 직접 분리에 의해 생산되므로 스트레이트-런(Straight-run) 경유라고도 부른다. 스트레이트-런 경유는 반제품 탱크로 이송되어 저장된다. 이와 같은 분리공정(상압증류탑)에서 생산되는 경유 반제품의 흐름은 아래 [그림 3-1]과 같다.



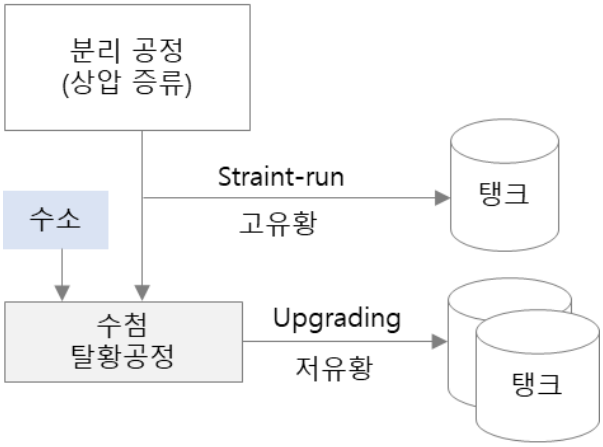
[그림 3-1] 분리 공정 경유 생산

② 업그레이드 공정(Upgrading Process)

업그레이드 공정은 화학적 반응을 이용하여 투입 반제품 내에 불필요한 불순물 농도를 정해진 기준까지 제거한다. 공정을 통과하면서 반제품의 품질이 향상되며 주요 성상은 변화되지 않고 유지된다. 가장 대표적인 업그레이드 공정은 황성분을 제거하는 수첨탈황공정 ⑨ 이다. 수첨탈황공정에서는 적절한

⑨ 수첨탈황공정(Hydrotreating 또는 Hydrodesulfurization) :
수소탈황(HDS)은 천연가스 및 정제 석유제품(휘발유, 항공유, 경유 등)에서 수소를 첨가하여 황성분을 제거하기 위해 사용되는 촉매 화학 공정임. [1]

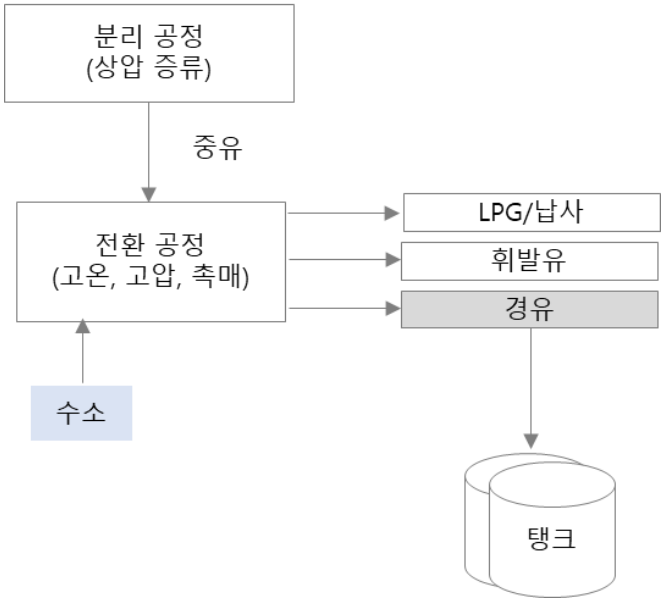
촉매와 함께 불필요한 올레핀, 일부 황, 질소 및 산소 화합물과 같은 반응성 화합물을 제거한다. 상압증류탑에서 생산되는 스트레이트-런 경유 반제품의 일부는 수첨탈황공정을 거치면서 품질이 업그레이드된다.



[그림 3-2] 업그레이드 공정 처리

③ 전환 공정(Conversion Process)

전환 공정은 근본적으로 투입 원료의 분자 구조를 변화시키는 공정이다. 탄소 사슬이 긴 무거운 화합물이 깨져서 작은 분자수의 탄소 화합물로 전환되는 크래킹(Cracking) 과정을 거친다. 대표적인 공정은 하이드로 크래킹 (Hydrocracking)과 촉매 크래킹 (Catalytic Cracking)이며 고온/고압의 조건에서 운전된다. 이러한 크래킹 공정에서 액화석유가스, 휘발유, 등유, 경유 등의 경질 반제품들이 생산된다, 특히 하이드로 크래킹 공정에서는 상당 비율의 등유 및 경유가 생산되며, 고온 고압의 조건에서 수소가 첨가되면서 황 및 질소 성분들의 대부분이 제거된다.



[그림 3-3] 전환 공정 경유 생산

3.2.2 제품 제조 방식의 특징

주요 석유 제품들은 품질규격과 생산 주기 등의 차이로 제조 방식이 서로 상이하다. 주요 제품의 생산방식의 특징은 아래와 같다.

- 항공유는 전통적인 방식 및 재생 프로세스 등 다양한 방식 [40]으로 생산이 가능하며, 주로 분리공정과 전환공정에서 생산된다. 상압증류탑에서 스트레이트-런으로 생산된 등유 반제품을 스위트닝(Sweetening) ⑩ 공정에서 머캡탄을 제거하여 생산한다. 비교적 간단한 과정으로 제조되나 군용 항공기나 일반 항공기 등의 품질 규격이 다양함으로 이러한 규격 충족이 중요한 요소이다.
- 휘발유는 분리 공정, 전환 공정, 석유 화학 공정 등 다양한 공정에서 생산되는 반제품들의 혼합으로 제조되는 탄화수소 혼합물로 엔진 성능 사양을 충족하는 품질 규격을 충족이 필요하다. 다양한 반제품(Component)들이 배합되어 여러

⑩ 스위트닝(Sweetening) : 휘발유, 등유 등에 포함된 악취와 부식성이 있는 머캡탄류를 산화하여 냄새와 부식성을 제거하는 과정임.

가지 규격의 완제품이 생산되며, 배합비를 최적화하여 제조 비용을 절감하는 것이 중요하다. 또한 배합과정에서 완제품 품질 규격을 충족하기 위해 혼합물의 품질을 정확히 예측하여 제조하는 것이 핵심 요소이다.

· 경유는 3.2.1 항에서 살펴본 바와 같이 분리 공정과 전환 공정에서 생산되는 반제품을 품질 규격에 맞게 배합하여 생산한다. 경유 제조 방식의 주요 특징을 정리하면 아래와 같다.

- 대규모 연속 생산: 분리 공정(상압증류탑)과 전환 공정에서 대량으로 생산되는 경유 반제품들을 품질 규격을 충족하는 제품으로 지속 생산이 필요함.
- 다품종 배합 생산: 국내 자동차용 및 선박용 제품과 구매자가 요구하는 다양한 품질의 수출 제품을 수요 계획에 따라 생산 필요함.
- 생산량 변동: 원료 및 공정 조건에 따라 분리 공정(상압증류탑)의 반제품 생산량 변동이 발생함.

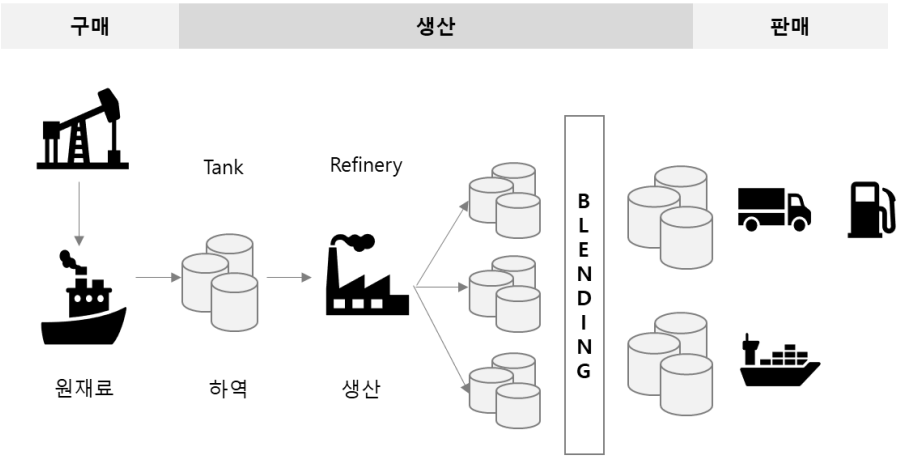
3.4 정유산업 공급망 관리

3.4.1 공급망 관리

앞서 3.1 절에서 살펴본 바와 같이 국내 정유산업의 특성은 수요 변동에 민감하며 증설 시 대규모 투자를 수반함으로 글로벌 경기 변화에 따른 유연성 확보가 다소 어려울 수 있다고 하였다. 이런 특성 때문에 정유산업에서 수요 예측, 생산 계획 등을 포함하는 공급망 관리 ⑪ 는 중요한 역할을 수행한다. 정유산업의 공급망 관리(Supply Chain Management)는 아래 [그림 3-4]와 같이 구매, 생산 및 판매 크게 세 가지로 분류된다. 구매 단계의 경우 필요한 원유를 구매하여 유조선을 통해 운송하는 과정을 포함한다. 이 단계는 원료 전량을 수입에 의존하기 때문에 국제

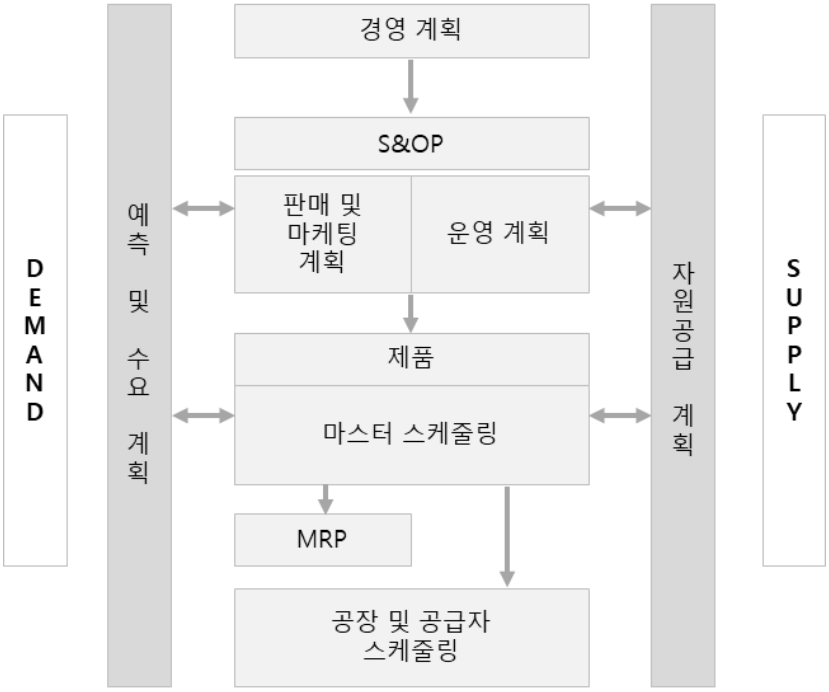
⑪ 공급망 관리(Supply Chain Management) : 제품 생산 과정에서 원재료 구매 , 제품 생산 및 판매 과정에서 원료 조달, 생산 계획, 재고 관리 등의 활동을 통해 공급망을 효율적으로 관리하여 소비자가 원하는 제품을 적시적재에 제공하는 관리 활동을 통틀어 칭함.

유가, 환율, 다양한 국제환경 제재 등의 복합적인 환경 영향을 받게 된다. 생산 단계는 구매된 원유 하역 작업에서 시작하여 공정 투입/생산, 제품 판매를 위한 출하 준비 과정을 포함한다. 준비된 제품은 파이프라인, 유조차, 선박 등을 통해 국내에 판매되거나 대형 운반 선박을 통해 다양한 국가로 수출된다.[41] 즉, 구매 단계에서 값싼 가격에 원유를 구매하여 경제적으로 생산하여 제품 마진을 남기고 판매하는 전형적인 수입 원자재 장치산업 구조이다. 또한 국내 판매 제품을 제외한 원료 수입, 제품 수출 모두 원거리 운반 비용이 구매/판매 비용에 포함된다.



[그림 3-4] 정유산업 공급망 관리 개요

공급망 관리와 관련한 S&OP(Sales & Operations Planning)[42]는 판매생산계획으로 불리며, 기업의 수요와 공급이 균형을 이루어 고객 만족과 수익성이 향상되도록 도와주는 업무 프로세스로 정의된다. S&OP 를 통해 수요/공급 균형을 유지하고 균형이 깨지기 전에 미리 인지할 수 있는 경고 시스템을 갖추어야 한다. 위험이 인지되었을 때 사전에 계획을 보완하게 되면 어렵지 않게 위험을 극복할 수 있으나, 이를 방관하게 되면 큰 위험에 빠질 수 있다. 이렇듯 공급망 관리 전체에서 생산계획 수립은 매우 중요한 역할을 하며 수요/공급과 계획의 연관 관계는 [그림 3-5]의 S&OP 구성에서 잘 나타나 있다.

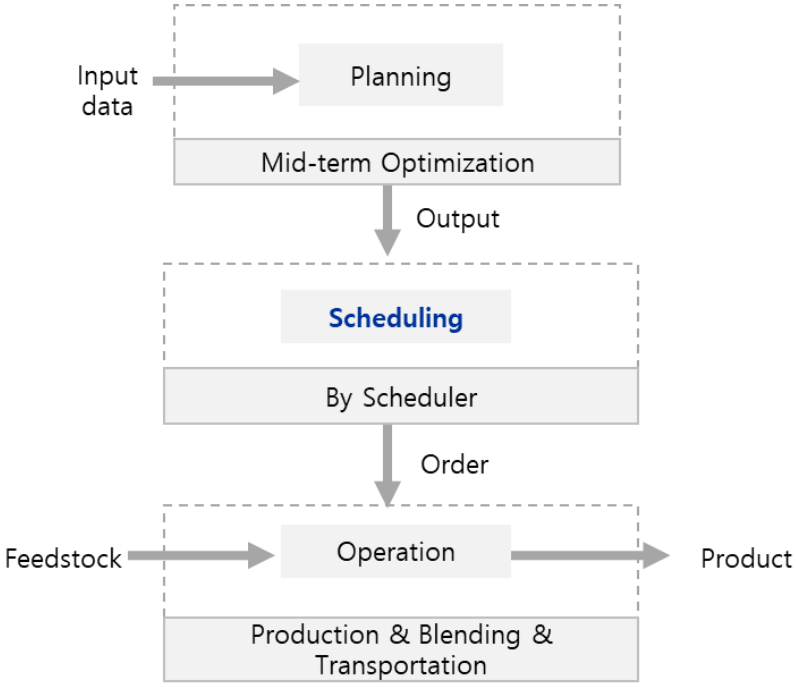


[그림 3-5] Sales & Operation Planning [42][43]

3.4.2 플래닝(Planning)과 스케줄링(Scheduling)

플래닝은 사용 용도에 따라 세 가지로 분류할 수 있다.[43] 전략(Long-term) 플래닝은 설비 투자 및 위치 선정 등 공급망의 구조를 결정하는 곳에 사용되며, 중기(Mid-term) 플래닝은 공장별 제품 생산 목표 수립과 창고에서 물류 센터로의 수송 등을 의사결정 시 활용된다. 마지막으로 단기 플래닝은 일간 또는 주간 단위로 공장 별 제품 생산 목표 수립하고 생산 순서를 결정하는 과정이다. 제품 생산 측면에서는 단기 플래닝은 스케줄링과 같은 의미를 가진다. 일반적으로 [그림 3-4]에 표현한 정유공장의 생산 단계는 구매/판매와 연계된 중기 플래닝을 기반으로 운영 계획이 수립된다. 공급망 관리 과정의 수익을 최대화하기 위해 최적화(Optimization) 방식을 통해 생산 계획을 수립하며, 해당 생산

계획을 기반으로 스케줄링 및 제품 운영이 이루어 진다. 이와 같은 과정을 도식화하면 [그림 3-6]와 같다.



[그림 3-6] 공급망 생산단계 운영

- 플래닝(Planning) 단계: 중기 플래닝 최적화을 통해 목표 및 운영 가이드를 제시한다. 사용되는 입력 자료(Input Data)는 실적 평균 값 또는 예측 값을 활용하며 정해진 기간 동안의 이상적인 운영안과 목표를 제시한다.
- 스케줄링(Scheduling) 단계: 플래닝에서 제시한 목표와 운영안을 기준으로 단기 생산 계획을 수립하고 이를 바탕으로 현장에 작업 일정(Order)을 수립하여 전달한다.
- 운영(Operation) 단계: 스케줄링 단계에서 전달된 작업 일정을 기준으로 원유 투입, 공정 별 가동, 탱크 간 이송, 배합, 파이프 라인 송유, 선박 출하 등의 작업을 수행한다.

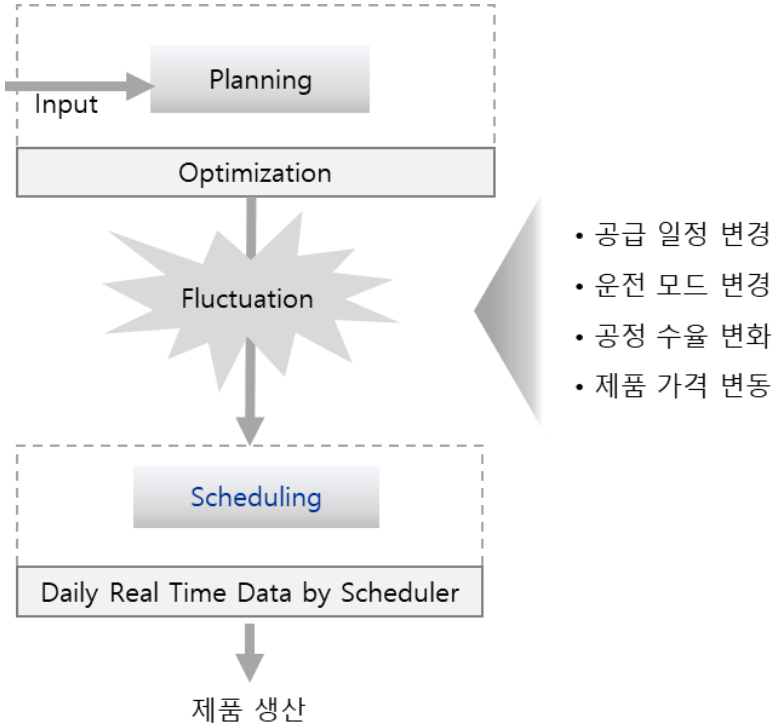
3.4.3 플래닝과 스케줄링의 차이 원인

생산 단계의 스케줄링은 3.4.2 에서 설명한 바와 같이 플래닝 단계에서 제시되는 결과 및 목표를 기준으로 스케줄링 운영안을

수립하고 현장에 작업을 지시한다. 이러한 과정에서 중기 플래닝/단기 스케줄링/운영 단계의 각 단계 별 계층적 관리 레벨[45]이 형성된다. 3 단계의 관리 레벨이 모두 조화롭게 연계되어 운영된다면 공급망 생산 단계최적화(Optimization)가 이루어 졌다고 말할 수 있다. 하지만 실제 운영 상 플래닝과 스케줄링은 차이가 발생한다. 플래닝 단계는 일정 기간 평균 개념의 최적화 결과임으로 기간 중의 시간의 흐름을 고려하지 않는다. 이에 따라 스케줄링 단계에서는 다양한 환경 변화 요인이 발생하며 운영 계획의 일부 변경이 불가피하다. 차이가 발생하는 환경 변화 요인들은 아래와 같다.

- 제품 공급 일정 몰림: 공급망 관리 단계에서 채찍(Bullwhip) 효과⑫에 의해 수요 변동이 증가하여 일부 제품 공급 일정이 몰리는 현상이 발생함.
- 운전 모드 변경: 플래닝 단계에서는 각 공정의 운전 모드가 평균값으로 제시되지만 실제 운영 단계에서는 재고 상황이나 공급 일정 변동 등의 요인으로 변경 운영이 필요함.
  (*) 운전 모드 변경에 공정 제품 생산 수율 변동이 발생함.
- 공정 수율 변화: 상압 증류탑에 투입되는 원유 혼합물의 성상 변동 및 공정 운영 환경 변화 등으로 제품 생산량과 성상 등이 변동됨.
- 제품 가격 변동: 급격한 제품 가격 변동으로 인해 플래닝 단계의 목표와 다르게 운영되는 경우도 간혹 발생함.

⑫ 채찍 효과(Bullwhip effect) : 공급망에서 상위 단계로 올라감에 따라 수요 변동성이 증가하는 현상을 뜻함. 상위 단계로 갈수록 제품의 주문이 수요 신호보다 더 가변적이며 증가하는 경향으로 설명됨. [46]



[그림 3-7] 스케줄링 단계 변동 요인

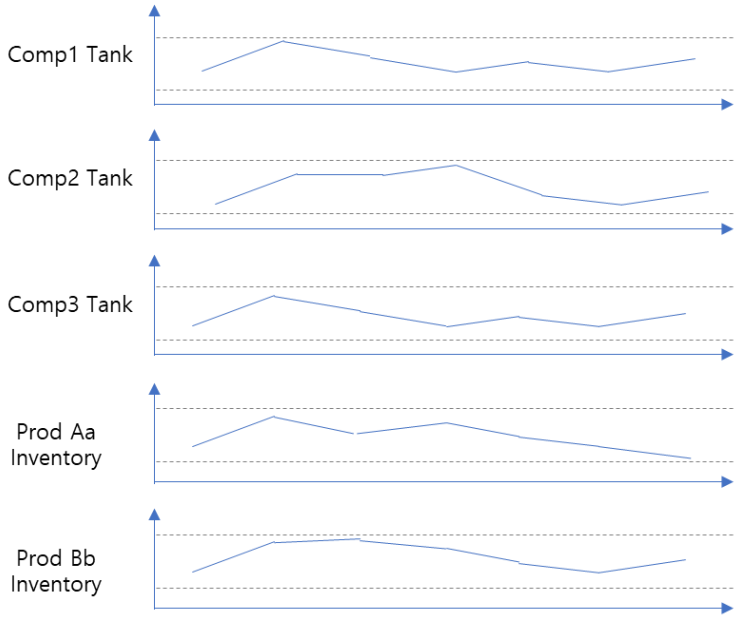
3.5 스케줄링 시스템 필요성

3.5.1 단기 스케줄링 최적화 및 예상 효과

3.4.3 항에서 플래닝 단계와 스케줄링 단계는 다양한 환경 변화 요인들에 의해 차이가 발생할 수 있음을 살펴보았다. 평균 개념의 최적화된 결과를 기준으로 단기(일별/주간) 계획을 원활히 수립/운영하기 어렵고 그 결과를 배제한 운영은 둘 간의 차이를 더 크게 할 가능성이 높다. 따라서 이러한 차이를 최소화하기 위해서는 최적화된 플래닝 결과를 근간으로 하는 단기 스케줄링 시스템이 필요하다. 단기 스케줄링 시스템은 비교적 단순한 최적화 모델 구성을 통해 지속적으로 변화하는 운영 환경을 반영하여 해당 시점의 최적 운영 의사결정을 지원하고 근본적으로는 이상적인 플래닝 결과를 쫓아가는 시스템이 되어야 한다.

Demand Plan

Grade	Product	Scheduling						
		1 Day	2 Day	3 Day	4 Day	5 Day	6 Day	7 Day
A	Aa	-	-	-	-	-	-	-
	Bb	-	-	-	-	-	5,000	-
B	Cc	5,000	-	-	-	5,000	-	-
	Dd	-	-	-	5,000	-	-	-
	Ee	15,000	20,000	-	-	-	-	-
	Ff	-	-	-	20,000	20,000	-	-
	Gg	-	5,000	20,000	-	-	20,000	20,000



[그림 3-8] 단기 스케줄링 모델 예시

[그림 3-8]와 같은 단기 최적화 모델이 통해 예상되는 효과는 다음과 같다.

첫 번째, 수요 계획의 제품 생산 충족 여부를 신속히 판단 가능하다. 충족이 어려운 경우 사전에 정보를 제공하여 대응할 수 있게 하거나 우선 순위에 따라 수요 계획을 변경할 수 있다.

두 번째, 수급 과/부족에 따른 반제품 재고의 예측 관리가 가능하다. 수요와 공급의 불균형 예상 시 사전 조치를 통해 조절 과정을 거쳐 재고를 안정적으로 운영할 수 있다. 이는 3.4.2 항에서 살펴본 S&OP 의 효과인 위험을 사전에 인지하는 기능과 연관되어 있다.

세 번째, 플래닝 최적화 결과를 연계한 제품 수익 최대화 운영 가이드 제시가 가능하다. 재고 현황 포함 환경 변화 요인을 반영한 단기 최적화 결과를 도출하게 된다.

네 번째, 제품과 연계한 업그레이드 공정의 최적 가동 결정이 가능하다. 단기 공정 가동량 변동을 사전에 예측함으로써 급격한 가동 변경 없이 안정적 운영이 가능해진다.

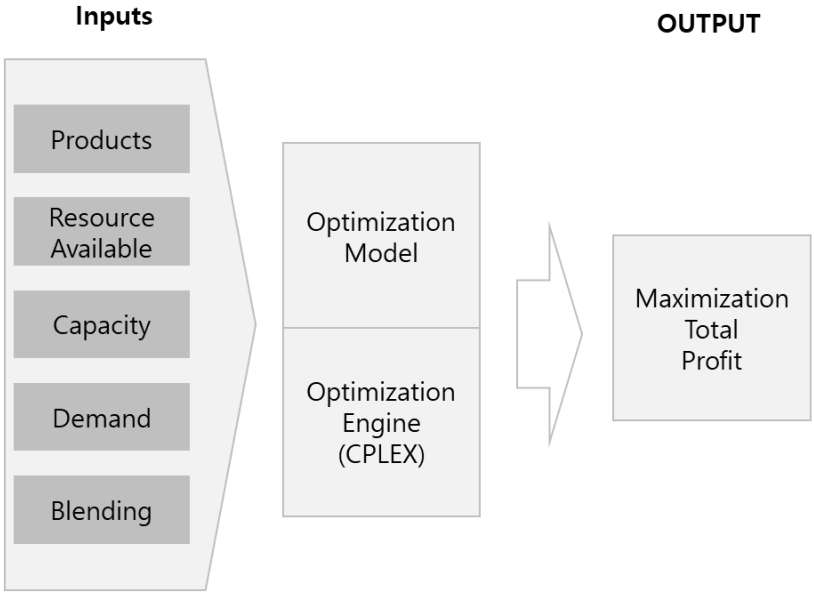
다음 4 장에서는 상기와 같은 예상효과를 가지는 최적화 모델의 구성에 대해 살펴보겠다.

제 4 장 최적화 모델 구성

4.1 개요

4.1.1 모델의 개요

최적화 모델의 구성은 아래와 같이 입력변수/출력값, 그리고 중간 단계의 최적화(Optimization) 분야로 구성된다. 입력값은 완제품, 반제품, 수요 계획 등을 포함하며 [표 4-1]와 같다. 출력값을 포함하는 최적화 모델의 목표는 지정 기간 중 수익 최대화이며 수학적 최적화 모델을 통해 구현한다. 최적화 모델은 입력변수(Parameter)와 제약조건(Constraint)을 기반으로 모델의 목적함수(Objective Function)가 최대값을 가질 수 있는 결정 변수(Decision Variables)를 구하게 된다.



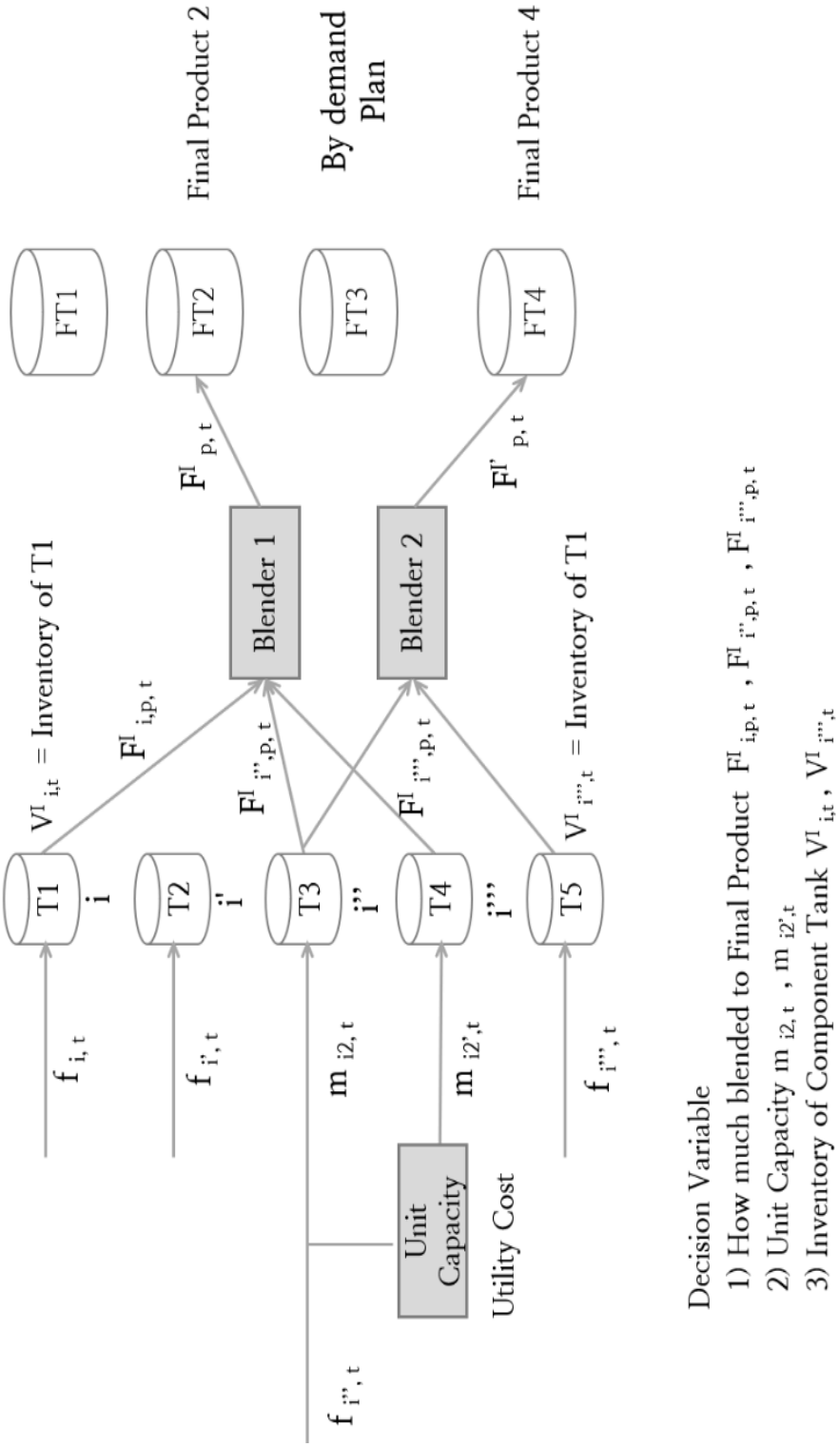
[그림 4-1] 최적화 모델 개요

[표 4-1] 모델 입력 변수

구 분	내 용
Products	완제품 종류에 따른 품질, 재고 등
Resource	반제품(Component) 품질 및 재고
Capacity	저장 탱크 용량, 업그레이드 공정 가동량
Demand	완제품 품종 별 수요 계획
Blending	최소/최대 배합비

[표 4-1]에서 제시한 입력 변수를 바탕으로 [그림 4-2]와 같이 최적화 모델의 개략도를 구성해 보았다. 주요 결정 변수는 아래와 같이 구성하였다.

- 최종 완제품 탱크로 배합되는 반제품의 배합 물량
- 각 반제품 탱크의 Time Slot 별 재고량
- 각 최종 완제품 탱크의 Time Slot 별 재고량
- 반제품의 업그레이드를 위해 가동되는 연계 공정의 가동량 (공정 가동은 운전 비용이 수반됨)



[그림 4-2] 수리 모델 개략도

최적화 모델을 구성하는 목적 함수(Objective Function)와 주요 제약은 아래[그림 4-3]와 같이 정의할 수 있다. 결정 변수(Decision Variable) 포함한 상세한 정의와 구성은 '4.2 절 구성 요소'에서 자세히 살펴볼 것이다.

- Object Function : Profit Maximization

Maximize $\sum$ *(Diesel Price - Product Cost) X Quantity of Blending) - Operation Cost*

- Subject to

Demand = ∑ Blending

Component Blending ≤ Component available Inventory

Product quality Satisfaction

- Min spec. ≤ Density ≤ Max spec.
- Min spec. ≤ Cetane index
- Min spec. ≤ Flash Point
- Pour Point ≤ Max spec

Domestic Total Inventory ≥ 적정 재고

∑ Blending ≤ Blender capacity

[그림 4-3] 모델 목적함수 및 제약 개요

4.1.2 명명법

스케줄링 모델의 수리 모델 구성을 위해 주요 입력 변수(Parameter)와 결정 변수(Variable)를 포함하여 아래와 같이 명명하였다.

Indices

i	반제품(Component)
p	최종 완제품(Product)
t	전체 기간 중의 time slot
c	제품의 성상

Sets

I	제품 배합에 사용된 반제품 set
P	수요에 의해 최종 생산된 완제품 set (Product)
T	Time slot set(Period)
Q	반제품/제품의 성상 set (Component)

주요 입력 변수(Parameter)

t	time slot (Period) = 스케쥴링 기간
c_i	반제품의 가격 정보
c_p	완제품의 가격 정보
$f_{i,t}$	time slot(t)기간 중의 B 그룹 반제품(i)의 생산 물량
Va^{max}_i	A 그룹 반제품(i)의 최대 저장 용량
Va^{min}_i	A 그룹 반제품(i)의 최소 저장 용량
Vb^{max}_i	B 그룹 반제품(i)의 최대 저장 용량
Vb^{min}_i	B 그룹 반제품(i)의 최소 저장 용량
inv_i	A/B 반제품(i)의 최초 저장량
$ble^{min}_{i,p}$	A/B 제품(i)의 완제품(p) 최소 배합 비율
$ble^{max}_{i,p}$	A/B 제품(i)의 완제품(p) 최대 배합 비율
$fat_{i,t}$	time slot(t)기간 중 모든 A 그룹 반제품(i)의 생산물량 합계
Cap^{min}	업그레이드 공정 최소 가동량
Cap^{max}	업그레이드 공정 최대 가동량
Cap^{ini}	업그레이드 공정 초기 가동량

결정 변수(Variables)

$Fa^I_{i,p,t}$	time slot(t)기간 중 완제품(p)에 배합된 A 그룹 반제품(i)의 물량
$Fb^I_{i,p,t}$	time slot(t)기간 중 완제품(p)에 배합된 B 그룹 반제품(i)의 물량
$F^P_{p,t}$	time slot(t)기간 중 만들어진 완제품(p)의 생산물량
$Va^I_{i,t}$	time slot(t)기간의 A 그룹 반제품(i)의 최종재고
$Vb^I_{i,t}$	time slot(t)기간의 B 그룹 반제품(i)의 최종재고
$V^P_{p,t}$	time slot(t)기간의 완제품(p)의 최종재고
Cap_t	time slot(t)기간의 업그레이드 공정 가동량

$m_{i,t}$ time slot(t)기간의 A 그룹 반제품(i)의 생산량

4.2 구성요소

앞선 4.1 절에서 수리 모델을 구성하는 각 요소들의 정의와 개요에 대해 간략히 살펴보았다. 이번 4.2 절에서는 각 구성 요소의 가정, 정의에 대한 근거 및 주요 수식 등에 대해 상세히 살펴볼 예정이다.

4.2.1 제약의 가정 사항

최적화 수리 모델의 제약들은 아래와 같은 기본 가정을 가진다.

- 모든 반제품 탱크에는 한 가지 종류의 반제품만 저장함.
- 모든 반제품 탱크는 배합설비(blender)와 연결되어 완제품 배합이 가능함.
- 반제품 탱크로의 유입되는 공정 생산 물량은 기간 중 일정하게 유지됨(필요시 기간 별로 유입 물량을 조절할 수 있음)
- 모든 완제품 탱크에는 한 가지 종류의 완제품만 저장함.
- 완제품 탱크는 제품 배합이 완료된 후 출하함.
- 모델 기간(Period)은 7 일을 기본으로 하되 필요시 조절 가능함.
- 완제품 수요 입력은 고정하며, 필요시 최소/최대값 설정 가능함.
- 반제품/완제품 탱크의 제약은 기존 저장 용량에서 안전 재고 마진을 고려하여 조절함.
- 반제품 초기 재고의 성상은 생산되는 반제품 탱크 성상과 동일함을 가정함.

4.2.2 목적함수(Objective Function)

수리 모델을 통한 최적화 목표는 스케줄링 기간 중 완제품 제조 비용을 최소화하여 수익을 최대화하는 것이다. 이러한 최적화 목표는 목적함수로 정의되며 제품 수익, 제조 비용, 운전 비용으로 구성된다. 수익(Profit)은 수식(4.1)과 같이 전체 기간(t)중 생산된 완제품(p)의 총 가치 (물량 x 가격)로 정의한다.

$$Profit = \sum_{t}\sum_{p} p_p \;\; F^{P}_{p,t} \tag{4.1}$$

비용(Cost)는 수식(4.2)와 같이 전체 기간(t)중 완제품(p) 생산에 배합된 반제품(c)의 총 가치(배합물량 x 가격)로 정의한다.

$$Cost = \sum_{t}\sum_{p}\sum_{i} c_i \, F^{I}_{i,p,t} \tag{4.2}$$

운전 비용(Operation Cost)는 수식(4.3)과 같이 전체 기간(t) 중 업그레이드 공정 운전비(가동량 x 변동비)로 정의한다.

$$Operation\ Cost = \sum_{t} m_t * k(\text{상수}) * unit\ operation\ cost \tag{4.3}$$

최종 목적함수는 수식(4.4)와 같이 수익의 총합에서 비용(운전 비용 포함)을 제외한 값이 최대가 되는 지점을 찾는 것이다.

$$Objective\ Function = Max \quad Profit - (Cost + Unit\ Operation\ Cost) \tag{4.4}$$

4.2.3 결정 변수(Decision Variables)

최적화 모델의 결정 변수는 8가지로 구분되어 정의되었으며, 각 결정 변수 별로 상세한 내용은 아래와 같다.

- 반제품 A 그룹의 배합물량($Fa^{I}_{i,p,t}$)
  : A 그룹은 업그레이드 공정에 처리 여부에 따라 생산량이 결정됨으로 나머지 B 그룹과는 별도로 결정 변수로 정의한다. 완제품의 수요 계획과 품질 규격을 만족하는 배합물량이 결정한다.
- 반제품 B 그룹의 배합물량($Fb^{I}_{i,p,t}$)
  : A 그룹과 동일하게 완제품의 수요 계획과 품질 규격을 만족하는 배합물량을 결정 한다.

- 완제품 생산 물량 ($F^P_{p,t}$)
  : 반제품 A 그룹 배합물량과 B 그룹 배합물량의 합으로 모델 변수 구성을 단순하게 하기 위해 별도로 정의하였다.
- 반제품 A 그룹의 재고 ($Va^I_{i,t}$) : 기간 별 최종 재고 기준
- 반제품 B 그룹의 재고 ($Vb^I_{i,t}$) : 기간 별 최종 재고 기준
- 완제품의 재고 ($V^P_{p,t}$) : 기간 별 최종 재고 기준
- 업그레이드 공정의 가동량 (Cap_t)
  : 반제품 A 그룹 내 물량 확정을 위해 업그레이드 공정 가동량을 결정 변수로 정의하였다. A 그룹은 공정을 거치는 반제품과 나머지 반제품 둘로 구분된다.
- 반제품 A 그룹의 반제품 생산량($m_{i,t}$)
  : 반제품 A 그룹의 생산량은 입력 변수가 아닌 결정변수로 두어 업그레이드 공정 가동량에 연동하여 결정되도록 하였다.

4.2.4 제약 조건(Constraints)

최적화 모델의 주요 제약 조건은 아래와 같이 정의하였다.

- 재고 제약 및 물량 밸런스(Inventory Constraint)
  - 반제품 A/B 그룹의 초기 재고는 초재고 입력 변수(inv_i)와 동일하게 설정하였다.

$$F^I_{i,0} = inv_i \qquad \forall i \qquad (4.5)$$

  - 반제품 A 그룹 재고 제약은 스케줄링 기간(t)의 최종 재고 물량이 Va_i^{min} 과 Va_i^{max} 범위 내에 유지되도록 제약을 설정하였다.

$$Va_i^{min} \le Va^I_{i,t} \le Va_i^{max} \qquad \forall i,t \qquad (4.6)$$

  - 반제품 A 그룹의 스케줄링 기간(t) 물량 밸런스는 수식(4.7)와 같이 정의하였다. 이전 기간의 최종 재고와 결정 변수로 정의된 A 그룹 반제품 생산량을 합치고 기간(t) 중 모든 완제품(p)에 배합된 해당 반제품(i)의 물량의 합을

빼서 반제품 A 그룹의 물량 밸런스를 맞추도록 하였다. 세 가지의 결정 변수(재고, 생산량, 배합량)가 포함되며 모델 전체의 물량 균형(Material Balance)이 유지되도록 하는 핵심 제약이다.

$$Va_{i,t}^{I} = Va_{i,t-1}^{I} + m_{i,t}^{I} - \sum_{p} Fa_{i,p,t}^{I} \qquad \forall i,t \qquad (4.7)$$

- 반제품 B 그룹의 재고 제약은 수식(4.8)과 같이 기간(t)의 최종 재고 물량이 Va_i^{min} 과 Va_i^{max} 범위 내에 유지되도록 설정하였다.

$$Vb_i^{min} \le Vb_{i,t}^{I} \le Vb_i^{max} \qquad \forall i,t \qquad (4.8)$$

- 반제품 B 그룹의 스케줄링 기간(t) 물량 밸런스는 수식(4.9)와 같다. 반제품 A 그룹 밸런스와 같은 방식으로 정의하였으며, A 그룹과 차이점은 반제품 생산량($f_{i,t}^{I}$)값이 결정 변수가 아닌 입력 변수로 고정되는 것이다.

$$Va_{i,t}^{I} = Va_{i,t-1}^{I} + f_{i,t}^{I} - \sum_{p} Fa_{i,p,t}^{I} \qquad \forall i,t \qquad (4.9)$$

- 완제품 재고는 최소/최대 제약을 위해 수식(4.10)과 같이 정의하였다.

$$V_p^{min} \le V_{p,t}^{P} \le V_p^{max} \qquad \forall p,t \qquad (4.10)$$

- 완제품(p)의 스케줄링 기간(t) 생산 물량은 반제품 A 그룹의 총 배합물량과 반제품 B 그룹의 총 배합물량의 합으로 정의하였다.

$$F_{p,t}^{P} = \sum_{i} Fa_{i,p,t}^{I} + \sum_{i} Fb_{i,p,t}^{I} \qquad \forall i,t \qquad (4.11)$$

· 공정 가동량 관련 제약(Unit Capacity Constraint)

– 스케줄링 기간(t)의 반제품 A 그룹내 모든 반제품의 총합을 반제품 총생산량(fat_t)으로 정의하였다. 이는 A 그룹의 총 물량 이내에서 두 가지 A 그룹 반제품 물량이 결정될 수 있도록 제약한다.

$$\sum_i Fa_{i,t}^I = fat_t \qquad \forall t \qquad (4.12)$$

– 스케줄링 기간(t) 업그레이드 공정 용량의 최소/최대 제약을 위해 수식(4.13)과 같이 정의하였다.

$$Cap^{\min} \leq Cap_t \leq Cap^{max} \qquad \forall t \qquad (4.13)$$

– 업그레이드 공정의 초기 가동량은 수식(4.14)와 같이 입력 변수와 동일한 값으로 정의하였다.

$$Cap_0 = Cap^{ini} \qquad \forall t \qquad (4.14)$$

– 스케줄링 기간(t) 중 업그레이드 공정 가동량은 변동 제한폭(k) 내에서 변화되도록 제약하였으며 이는 변동성이 심하고 잦은 가동량 조절이 발생하지 않도록 수식(4.15)와 같이 제약을 추가하였다.

$$Cap_{t-1} - k \leq Cap_t \leq Cap_{t-1} + k \qquad \forall t \qquad (4.15)$$

– 스케줄링 기간(t) 중 업그레이드 공정 가동량은 결정변수로 정해지는데 이 값을 A 그룹의 aAb 반제품 물량으로 정의하였다.

$$Cap_t = m_{"aAb",t} \qquad \forall t \qquad (4.16)$$

제 5 장 모델 구동 결과

5.1 구동 결과

5.1.1 기본 정보 구성

최적화 모델의 기본 모델링은 IBM ILOG CLPEX ⑬ 의 Academic version 을 활용하였다. 모델의 입력 변수를 포함하는 기본정보는 엑셀과 연동하여 향후 변경 및 확대 적용 등이 용이하도록 하였다. 기본 정보는 [표 5-1]에 항목 별 내용을 표기하였으며, 아래 [그림 5-1]은 엑셀로 구성한 모델의 기본 정보 입력의 예시이다.

[표 5-1] 모델 기본 정보

구 분	내 용
Time Slot NbPeriod	총 7개로 나누어 스케줄링이 가능함. - 개별 Period 구성 (1~7) (*) 재고의 경우, 초기 재고를 포함하며 0~7까지 8개의 Slot으로 구분함.
Unit	반제품 업그레이드 공정 관련 정보 - 공정 운전 비용 - 최소/최대 가동량 - 초기 가동량
Production	업그레이드 공정에 투입 가능한 원재료 물량 정의
Blending Cost	배합 생산에 소요되는 비용

⑬ IBM ILOG CPLEX : 최적화 소프트웨어 패키지로 CPLEX Optimization Studio 의 Academic Version 은 학생 대상 무료 제공 [47]

▶**Model Setting Information**

NbPeriods	7						
Time Slot	1	2	3	4	5	6	7
UnitI OperationCost							
Unit Capa Min			Initial Unit Capa				
Unit Capa Max							
aAa Production	-						
Blend Cost							

[그림 5-1] 모델 기본 정보 예시

최적화 모델의 스케줄링 기간(NbPeriods)은 7 일을 기본 설정하였다. 필요시 입력 데이터 구성에 따라 1/2 일 또는 1/3 일 등 Time Slot 조절이 가능하며 운영 환경에 맞추어 변경하여 구성할 수 있다. 그 외 업그레이드 공정 용량 등 기간 중 변동이 없는 입력 변수 주위로 기본 정보를 구성하였다.

5.1.2 반제품 및 완제품 관련 입력 변수

5.1.1 항의 기본 정보 외에 모델 구동을 위해서는 반제품/완제품 관련 물량, 품질 정보 입력이 필요하다. 기본 정보 외 입력 정보들은 엑셀을 통해 간단히 입력 가능하도록 구성하였다. 입력 변수는 완제품과 반제품 관련 정보로 나누어 진다.

첫번째 완제품(Product)에 대한 입력 변수는 필요 생산 물량(Demand), 재고 탱크의 최대/최소값, 초기 재고 등 물량 정보와 제품 규격 최대/최소값을 포함하는 품질 정보로 구성된다. [표 5-2]는 완제품 관련 입력 변수에 대한 예시이다.

[표 5-2] 완제품 입력 변수 예시

제품 구분	Demand		품질 규격		
	Min	Max	Sulfur Max	Density Min	FP Min
Daa	1,000	1,000	0.5	0.90	63.0
Dab	2,000	2,000	0.3	0.85	70.0

(*) Table 내의 수치는 실제 모델 입력 값이 아닌 임의의 값임.

두번째 반제품(Component) 정보는 반제품 중 일부가 모델의 결정변수인 업그레이드 공정 가동량에 연동하여 정해짐에 따라 생산량 변동이 있는 반제품 A 그룹과 입력 변수에 의해 일정한 반제품 B 그룹으로 구분하였다. 반제품 A, B 그룹 모두 배합을 통해 완제품이 제조됨으로 가격, 품질, 재고의 최대/최소값 등의 입력정보가 필요하다. 또한 특정 반제품의 경우 배합 단계에서 최대/최소값이 필요하며 고정 배합비(Recipe Blending)로 제조되는 완제품이 존재하여 배합 비율을 입력하여 제약할 수 있도록 구성하였다. [표 5-2]는 반제품 입력 변수의 예시이다.

[표 5-3] 반제품 물량/재고 입력 변수 예시

제품 구분	초기 재고	생산량	재고 제약		배합 제약	
			최소	최대	최소	최대
aAa	6,000	4,000	1,000	50,000	-	0.5
aAb	2,000	2,000	2,000	60,000	-	-
aAc	3,000	1,400	1,500	70,000	-	-

(*) Table 내의 수치는 실제 모델 입력 값이 아닌 임의의 값임.

[표 5-2]와 [표 5-3]을 포함하는 완제품/반제품에 대한 입력 정보는 모델 내에서 *.dat 형태로 저장되어 정보를 전달한다. 기본 정보를 포함하는 모든 입력 정보 들은 엑셀을 통해 입력하고 모델 내에서 엑셀 자료를 추출해 갈 수 있도록 구성하였다.

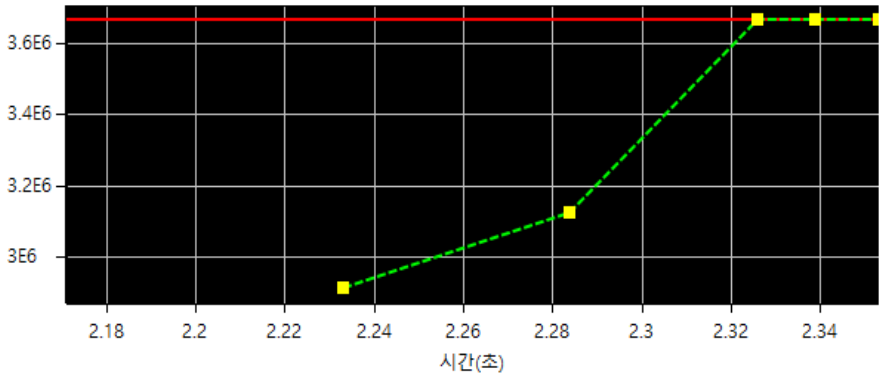
5.1.3 모델 구동 결과

모델링이 완료된 최적화 모델에 5.1.2 항에서 설명한 기본 정보와 각 반제품, 완제품의 정보를 입력 후 구동을 한 결과, 아래 [표 5-4]와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 모델 내에 총 변수 583 개(정수 변수 8 개 포함), 제약 요소 1,599 개를 가지는 MILP(혼합 정수 선형 프로그래밍, Mixed Integer Linear Programming) 모델로 구성되며, 기본 모델의 Iteration ⑭ 은 233 번, 구동 시간은 약 6.2 초가 소요되었다.

[표 5-4] 모델 구동 결과 요약

구 분		결과값
MILP Objective		3,478
Variables	Integer	8
	Other	575
Constraints		1,599
Iterations		233
Running Time		6.16 sec

(*) Objective 값은 scaling 한 값을 적용함.



(*) CPLEX Optimization 결과 Capture

[그림 5-2] 기본 모델 구동 결과

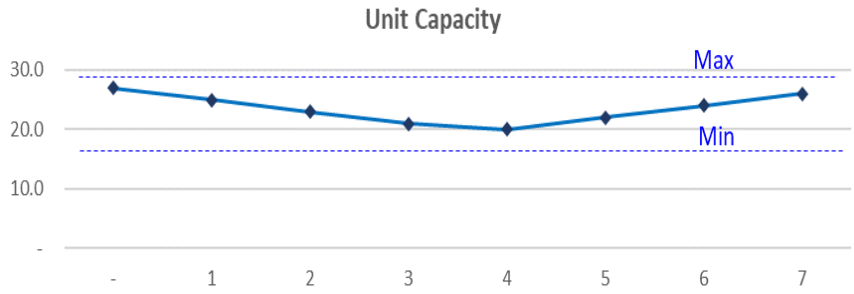
전체적으로 모델 구동에 충돌이나 완화 없이 실현 가능한 (Feasible) 해를 구하여 스케줄링 결과를 얻을 수 있었다. 다음 단계에서는 수학적으로 풀려진 문제의 결과에 대한 분석을

⑭ Iteration : 결과를 생성하기 위한 프로세스의 반복을 의미한다. 프로세스의 각 반복은 단일 반복이며, 각 반복의 결과는 다음 반복의 시작점이 된다.

수행하였다. 결과 분석은 수요 충족, 공정 가동량, 재고 결정 및 배합 비율 결정 부분으로 나누어 결과를 살펴보았다.

첫 번째는 제품 수요 충족 부분이다. 스케줄링 기간 동안 생산해야 할 제품 별 수요 계획(입력 변수)을 모두 충족하였으며 반제품, 완제품 재고는 최대/최소 제약 내의 값의 제시하였다. 그리고 모델의 전체적인 물량 밸런스(Material Balance) 점검 결과 문제없음을 확인하였다.

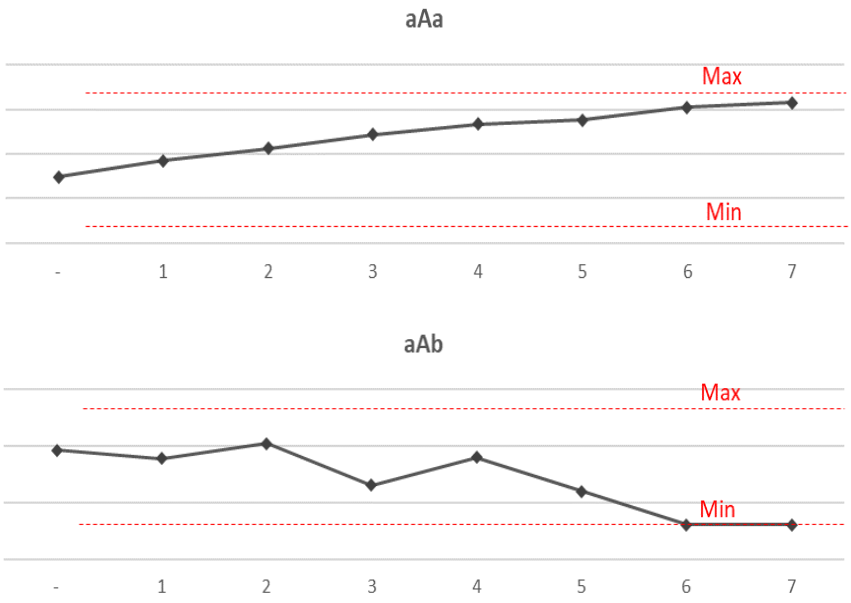
두 번째는 공정 가동량 변동 부분이다. 업그레이드 공정 가동량은 반제품 A 그룹에 속하는 두 개 반제품 간의 생산 물량을 결정하는 결정 변수이다. 기본정보 입력에서 정해진 변동 가능 범위(최대/최소 제약 조건)내에서 공정 가동량을 아래 [그림 5-3]와 같이 변동시키는 것이 최적이라고 제시하였다.



(*) Capacity 값은 scaling 한 값을 적용함.

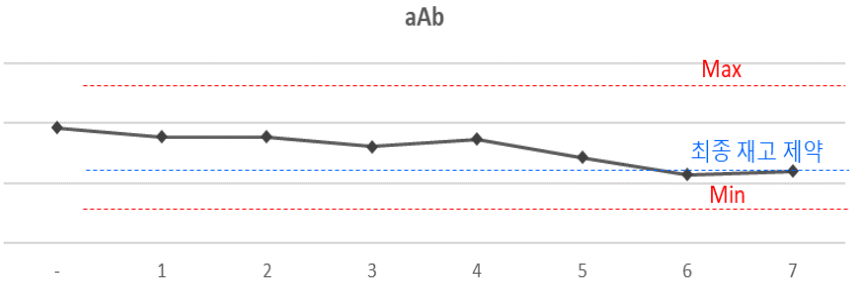
[그림 5-3] 공정 가동량 결정

세 번째는 A 그룹 반제품 재고 부분이다. 반제품은 크게 두 개 그룹으로 구분되며 공정 가동량에 의해 생산량이 결정되는 반제품 A 그룹 과 일정한 생산량을 유지하는 반제품 B 그룹으로 나눌 수 있다. 반제품 A 그룹은 아래 [그림 5-4]과 같이 최대/최소 재고 제약 내에서 변동하였다. 다음은 재고 변화 경향을 상세히 분석하여 문제점이 없는지 확인하였다.



[그림 5-4] 반제품 A 그룹 재고 결정

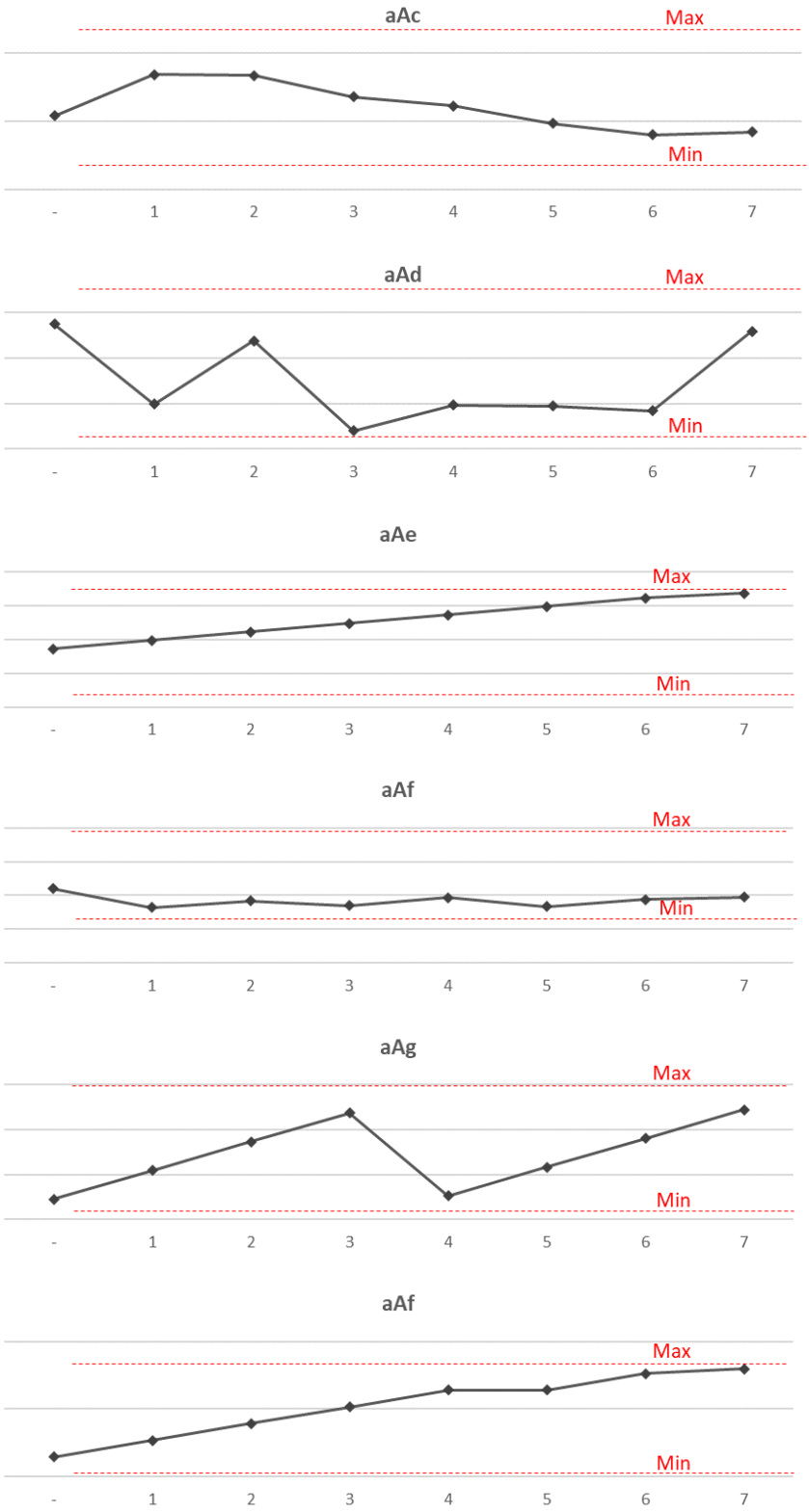
반제품 A 그룹의 재고 변동에서 [그림 5-4]와 같이 aAb 재고가 스케줄링 기간 마지막에 최소 재고까지 감소하는 결과를 제시하였다. 원인 분석 결과 aAb→ aAb 반제품으로 업그레이드 시키는 과정에서 공정 운전 비용이 발생하는데 이를 최소화 하기 위해 재고를 낮추는 것으로 분석되었다. 목적함수의 최대값 도달을 위해 비용을 감소시키는 결과이다. 하지만 aAb 반제품이 최소 재고로 유지되면 차기 스케줄링 주기에 급격하게 공정 가동량을 올리거나 재고 부족의 문제가 발생할 가능성이 커진다. 이런 리스크를 사전에 방지하기 위해 aAb 반제품 최종 재고의 목표를 제약 조건(Constraint)으로 모델에 추가하였다. 그 결과 [그림 5-5]와 같이 aAb 반제품 최종재고가 적정재고 수준으로 제시되어 차기 스케줄링에 차질이 없도록 하였다.



[그림 5-5] 최종 재고 제약 추가 Case

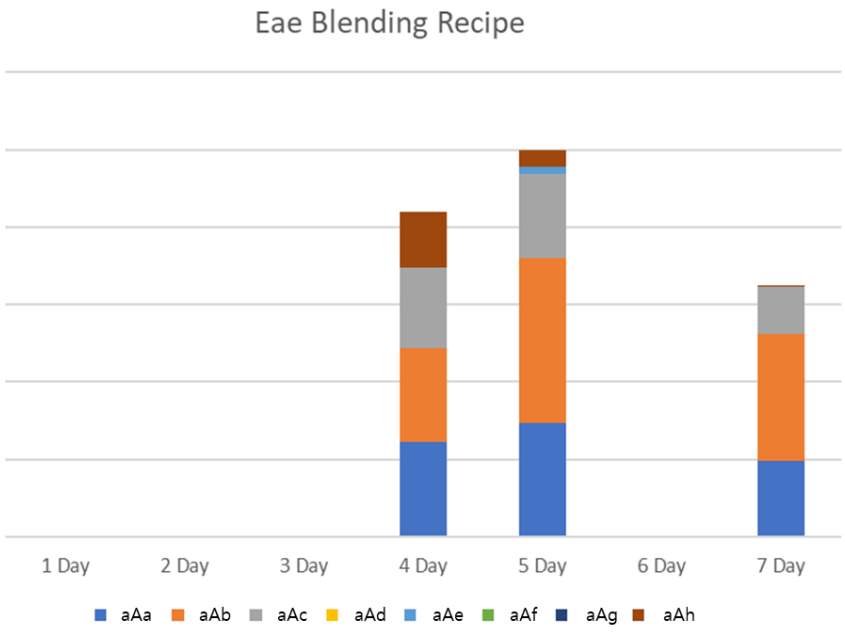
또한 반제품 A 그룹의 전체 생산량(aAa+aAb)은 초기 동일한 생산량으로 가정하였으나, 원재료 품질 변동 등과 같은 환경 변화 요인에 대응하는 유연성을 갖추기 위해 Time Slot 별로 입력이 가능하도록 입력 변수를 재설정하였다.

네 번째는 B 그룹 반제품 재고 부분이다. 분석 결과 반제품 생산 물량, 초기 재고 및 최대/최소 용량 제약을 충족하면서 기간별로 최종 재고를 제시하였다. 또한 물량 밸런스(Material Balance) 점검을 통해 모델링 건전성을 확인하였다. 재고 변화 분석 결과 전반적으로 수요계획 대비 반제품 생산량이 많아서 재고가 상승하는 경향으로 나타났다. 이는 향후 수요가 충분하지 않으면 재고 용량 부족의 문제가 발생할 수 있다는 시사점을 주는 부분이다. 따라서 이러한 시사점을 바탕으로 사전에 공급계획을 조절하여 문제 발생을 미연에 방지하는 조치가 필요하다. 이는 '3.4.1 공급망 관리'의 S&OP 부분에서 알아본 수요/공급의 불균형 경고 시스템 필요성을 강조하였는데 본 모델에서 시스템적으로 기능 수행이 가능함을 알 수 있다. 또한 반제품 B 그룹은 A 그룹과 동일하게 반제품 생산량의 변화 반영을 위해 Time Slot 별로 개별 입력이 가능하도록 구성하였다.



[그림 5-6] 반제품 B 그룹 재고 결정

다섯 번째는 완제품의 반제품 배합 비율의 결정이다. 각 반제품의 재고 운영, 수요 계획, 공정 가동량 및 품질규격 제약들을 충족하는 완제품 배합 비율을 제시하였다. 모델에서 배합비 결정은 제품 생산 비용에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 최적 배합비를 경제성 측면과 현실 적용 가능성 측면에서 점검하는 것은 중요하다. 품질 규격을 대표적인 완제품의 예시는 아래 [그림 5-6] 와 같다. Eae 의 배합비의 구성을 살펴보면 생산량이 많고 가격이 저렴한 반제품을 기본으로 품질규격 충족을 위해 일부 반제품을 추가하는 배합비를 제시하였다. 그리고 모델 기능적으로 고정 배합비나 최대/최소 배합비가 필요한 현실적인 제약 반영을 위해 배합비 비율 제약을 추가하였다.



[그림 5-7] 완제품 Eae 의 배합비 결정

5.1.4 모델 효과 및 활용

5.1.3 항에서 살펴본 모델의 결과 분석을 요약하면 모델의 건전성을 점검하고 다양한 입력 변수와 제약 조건을 만족하면서 최적화된 모델 결과를 제시함을 확인하였다. 또한 현실적인 제약 반영을 위해 제약을 개선하거나 추가하여 모델의 현실성을

높였다. 이러한 스케줄링 모델의 기대 효과는 아래와 같이 다섯 가지로 요약할 수 있다.

첫 번째, 다양한 현실 제약을 반영한 모델 최적화를 통해 최적의 제품 배합비(Recipe)를 제시함으로써 제조 원가 절감이 가능할 것으로 판단된다.

두 번째, 완제품과 반제품의 재고 사전 예측(Forecasting)이 가능하여 안정적인 운영이 가능하며, 특히 S&OP 에서 강조한 수요/공급 불균형 경고 시스템으로써 기능을 수행하여 수급 위험을 사전에 인지하고 대응할 수 있다.

세 번째, 업그레이드 공정 가동량을 결정 변수로 목적함수에 포함하고 모델에서 제시하여 급격한 가동량 변경에 따른 운전 리스크를 방지하고 운전 비용 절감에도 기여할 수 있다.

네 번째, 다양한 운영 환경 및 다품종의 제품을 적용할 수 있는 모델의 유연성을 확보하여 향후 환경 변화에도 활용할 수 있는 스케줄링 모델을 구성하였다.

다섯 번째, 시스템에 의한 운영 가이드를 제시함으로써 운영 의사결정 시간 감소 및 휴먼 에러 방지 등의 효과도 예상된다.

5.2 모델 민감도(Sensitivity) 분석

모델의 민감도 분석은 2.3.4 항에서 살펴본 바와 같이 어떠한 제약들이 최적해에 큰 영향을 주고 있고 방해가 되고 있는지를 찾아냄으로써 더 나은 최적해를 얻을 수 있는 환경 변화 조건을 분석하는 것이다. 이번 절에서는 본 연구 모델을 활용하여 입력 변수와 제약 조건의 변화에 따른 최적해 영향을 살펴보았다.

5.2.1 입력변수(Input Parameter)에 따른 민감도 점검

모델의 입력 변수(Input Parameter)는 크게 가격, 수요 계획, 공정 생산물량으로 구성되며 환경 변화에 따라 변동 가능성이 크다. 이 중 목적함수에 직접 영향을 줄 수 있는 반제품의 가격 변동과 특정 반제품 생산 물량에 따른 민감도 분석을 실시하였다.

① 반제품 가격 변동에 따른 민감도 분석

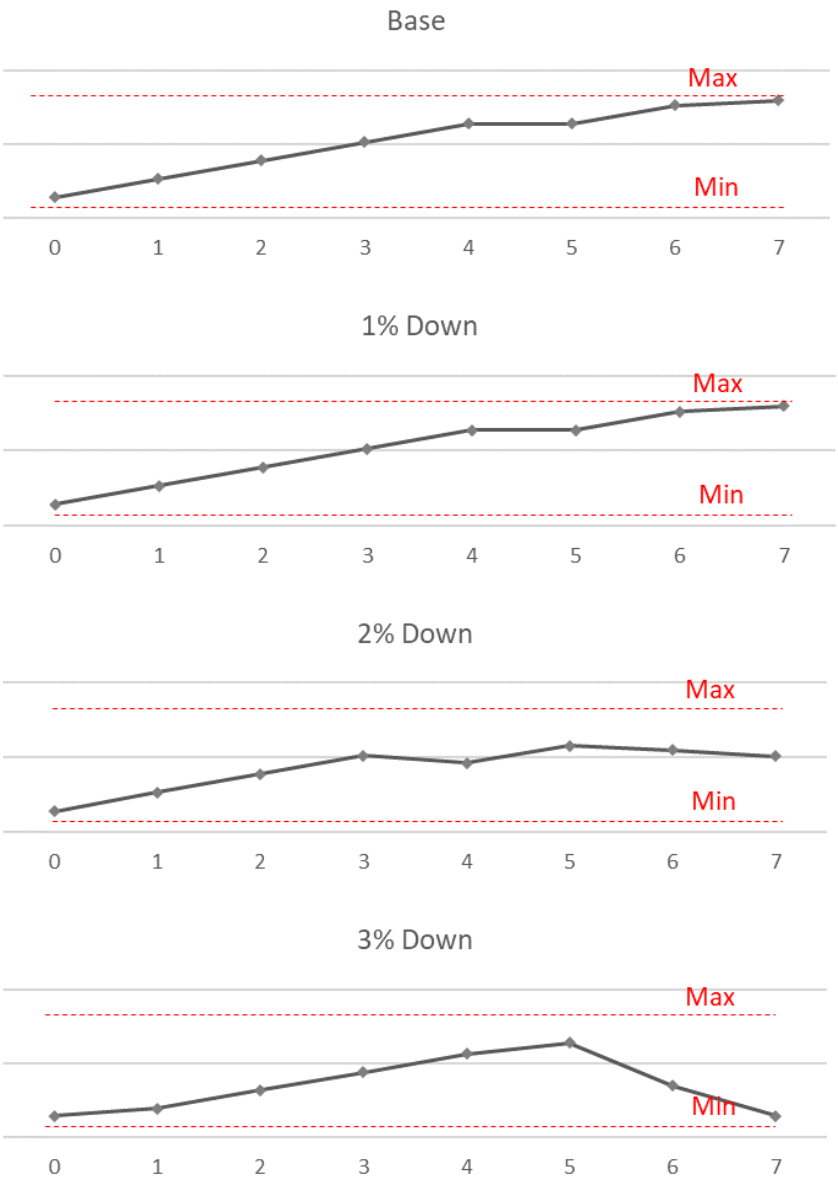
기본 모델의 구동 결과의 반제품 재고 변동을 살펴보면 반제품 B 그룹의 aAf 는 배합에 활용하지 않고 재고로 지속적으로 쌓이고 최대 수준에 도달하는 것으로 나타났다. 이에 따라 해당 반제품 가격이 어느 수준까지 감소되어야 사용이 시작되는지 분석하였다. [표 5-5]와 같이 기준 가격에서 1%→3%까지 감소시켜 구동한 결과 aAf 반제품의 가격 변동에 따라 모델의 Objective 값은 변화하였다.

[표 5-5] aAf 가격 변동에 따른 Objective 변화

구 분	Base Price	Price Sensitivity		
		1% 감소	2% 감소	3% 감소
MILP Objective	3,478	3,495	3,517	3,571
Running Time(sec)	6.16	6.15	5.03	4.99

(*) Objective 값은 scaling 한 값을 적용함.

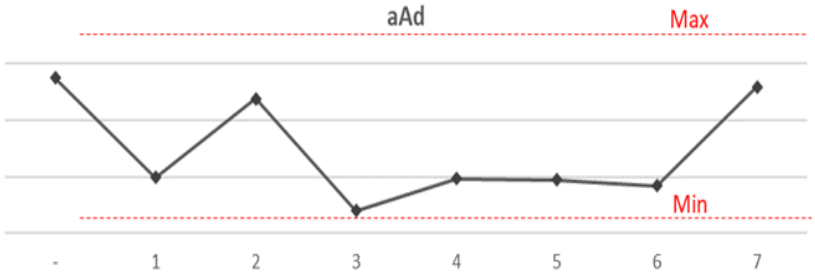
aAf 반제품 가격을 점진적으로 낮추는 경우, 1% 감소는 배합 사용에 따른 재고 변화가 미미하였으나, 2% 감소 시나리오에서 배합에 추가 사용하여 최종 재고가 낮아졌고, 3% 감소 시나리오에서는 최소재고까지 배합에 사용하였다. 이렇게 반제품 가격에 대한 민감도 분석을 통해 스케줄링 모델에서 특정 반제품이 잘 활용되지 않는 원인을 가격 측면에서 점검해 보고 원인을 분석할 수 있었다.



[그림 5-8] 민감도 분석-가격 변동 시나리오

② 반제품 생산 물량에 따른 민감도 분석

기본 모델의 구동 결과 분석에서 aAd 반제품은 아래 [그림 5-9]와 같이 기간 중 재고가 최소 지점에 도달하며 전체적으로 낮게 유지되었다. 이에 따라 해당 반제품의 생산량 변동에 의한 Objective 영향을 분석하였다. 기존 생산물량에서 2%, 4%, 6%의 생산량 증가 시나리오에 대해 모델을 구동하고 결과를 비교하였다.



[그림 5-9] 기본 구동 모델 aAd 재고 변동

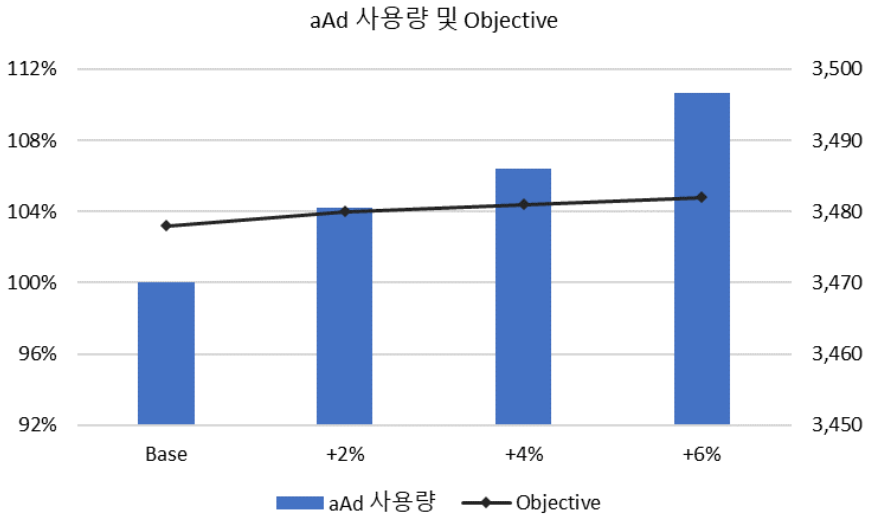
시나리오 별 구동 결과 aAd 의 생산량을 2~6% 증가시키는 경우 aAd 사용량은 [표 5-6]과 같이 4.2~10.7% 수준 증가하였다. 다만 Objective 값에는 큰 차이가 없으므로 부가적인 추가 생산 비용을 발생시키면서 생산량을 증가시킬 필요가 없는 것으로 분석되었다. 이렇게 반제품 생산량에 대한 민감도 분석을 통해 스케줄링 모델에서 특정 반제품 생산량을 증가시키는 시나리오에 대한 경제성을 점검해 볼 수 있었다.

[표 5-6] 반제품 aAd 생산량 변동에 따른 Objective 변화

구 분	Base Price	Production Sensitivity		
		2% 증가	4% 증가	6% 증가
MILP Objective(*)	3,478	3,480	3,481	3,482
Running Time(sec)	6.16	4.51	5.01	4.47

aAd 사용량	Base	104.2%	106.4%	110.7%

(*) Objective 값은 Scaling 하였음.



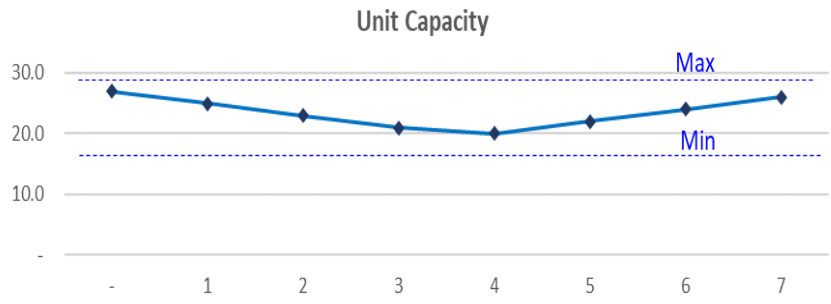
[그림 5-10] aAd 생산량에 따른 사용량 및 Objective 변화

5.2.2 제약 조건의 변화에 따른 민감도 점검

모델의 제약(Constraints)은 공정 최대/최소 가동량, 최대/최소 재고, 품질 규격 등 다양하게 구성되며 제약 완화 또는 강화에 따른 경제성 분석이 필요한 경우가 많다. 이 중 시나리오 분석이 가장 많이 활용되는 공정 용량 및 품질 변경에 대한 모델 민감도 분석을 실시하였다.

① 공정 가동량 Max 제약 변화

기본 모델에서 aAa 와 aAb 반제품 생산량을 결정하는 업그레이드 공정 가동량(결정 변수)은 기간 중 최대/최소 제약 범위 내에서 결정되었다. 이런 경우 상한/하한 경계에 도달하지 않았기 때문에 제약 완화(Constraint)에 대한 Objective 값의 변동이 없을 것으로 예상되나, 모델의 건전성 검증을 위해 최소/최대 제약 값을 변경하여 민감도 분석을 실시하였다.



(*) Capacity 값은 scaling 한 값을 적용함.

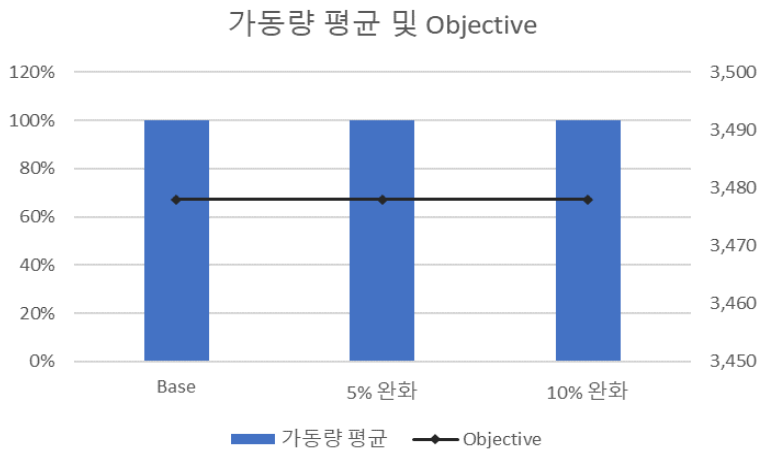
[그림 5-11] 공정 가동량 결정(Base 모델)

시나리오 별 구동 결과 공정 가동량 허용 범위를 5%, 10% 완화하였으나 [표 5-7]과 같이 기본 모델대비 Objective 값과 공정 가동량 변화는 없었다. 즉, 기본 모델에서 업그레이드 공정 가동량 최소/최대 범위가 해당 제약의 허용 증가치(감소치)보다 큰 경우라서 제약을 변화시키더라도 Objective 에는 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

[표 5-7] 가동량 범위 완화에 따른 Objective 변동

구 분	Base Price	Capacity Sensitivity	
		5% 완화	10% 완화
MILP Objective(*)	3,478	3,478	3,478
Running Time(sec)	6.16	4.70	5.06
가동량 평균	Base	변동없음	변동없음

(*) Objective 값은 Scaling 하였음.



[그림 5-12] 가동량 허용 범위 완화 시 Objective 변화

② 주요 제품 품질 변경

최근 환경 규제 강화로 인해 장기적으로 연료유의 황 규격 강화가 예상됨으로 황 성분 규격 강화에 따른 영향 분석이 필요한 것으로 판단되었다. 이에 따라 현재 기준보다 5%~15% 단계적으로 강화되는 경우 Objective 의 영향을 점검하였다.

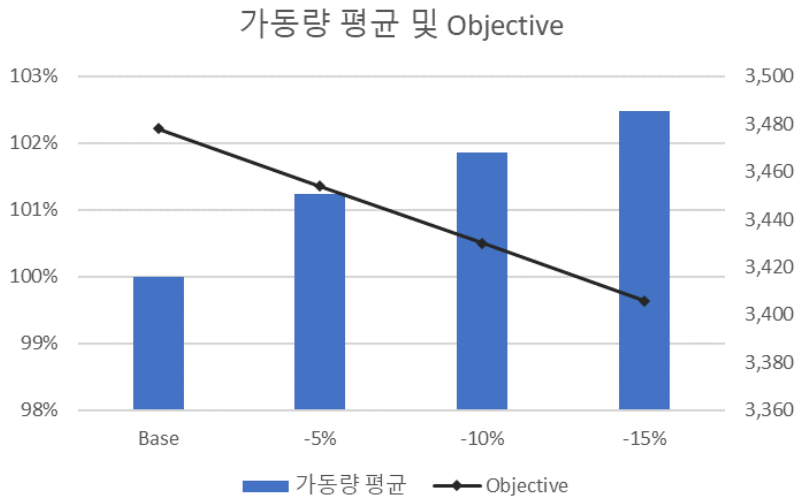
[표 5-8] 완제품 성상 강화에 따른 Objective 변화

구 분	Base Price	Property Sensitivity		
		5% 강화	10% 강화	15% 강화
MILP Objective(*)	3,478	3,454	3,430	3,406
Running Time(sec)	6.16	5.46	5.32	4.99
공정 가동량	Base	+1.2%	+1.9%	+2.5%

(*) Objective 값은 Scaling 하였음.

시나리오 별 점검 결과 완제품의 황 품질 규격이 5%, 10%, 15% 강화되는 경우, [표 5-8]과 같이 업그레이드 공정 가동량이 점진적으로 증가하였다. 이에 따라 공정 운전 변동비가 증가되면서 전체 Objective 값이 감소하였다. 또한 [그림 5-13]와 같이 품질 규격 강화 정도와 Objective 는

선형을 상관관계를 가지며, 이를 통해 규격 강화에 따른 석유 완제품 제조 비용 증가 등을 예상해 볼 수 있을 것을 판단된다.



[그림 5-13] 품질 규격 강화 시 Objective 및 가동량 평균

5.2.3 민감도 분석 의의

최적화 모델을 구성하고 활용함에 있어 단순히 모델의 최적해를 구하는 것도 중요하지만 입력 데이터와 모델링이 건전성을 갖추어 합리적인 결과(최적해)를 도출하는 것이 더욱 중요하다. 이러한 건전성에 대한 점검은 민감도 분석[23]을 활용하여 수행할 수 있으며, 제약 변화에 따른 타당성 및 경제성 점검 등에도 활용할 수 있다. 본 연구의 기본 모델을 대상으로 반제품 가격 변동/생산량 변화, 가동량 제약 변경 및 품질 규격 변경 시나리오에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 이를 통해 주요 입력 변수 및 제약 변화에 대한 모델의 최적해(Objective) 영향을 정량적으로 점검할 수 있었다. 이런 방식의 정량적 분석은 새로운 품종의 제품 판매나 품질 변화 등에 대한 의사결정 지원이 가능할 것으로 판단된다.

제 6 장 결론 및 향후 계획

6.1 결론

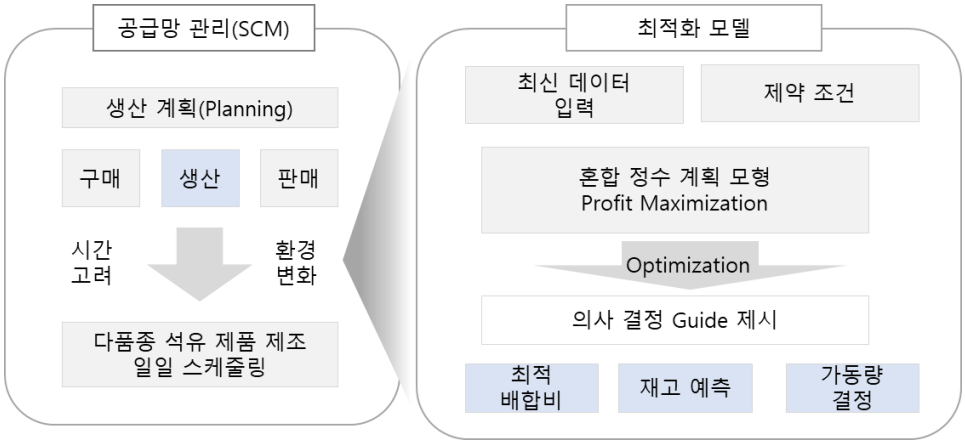
정유공장의 다품종 제품 제조 과정에서는 시간의 흐름과 다양한 환경 변화 요인에 의해 사전 계획된 최적화 모습과 현재의 실제 운영 간에 차이가 발생한다. 본 연구는 이러한 차이를 최소화하고 현재의 조건을 반영한 효과적인 운영을 위해 수학적 최적화 기법을 활용한 스케줄링 모델 구성을 목표로 하였다. 해당 모델은 경영 과학의 혼합 정수 모형을 활용하여 구성하였으며 모델이 가지는 기대 효과는 다음과 같다.

첫 번째, 현재 제약을 반영한 최적화(Optimization)로 제품 제조 원가 절감을 위한 운영 가이드를 제시한다.

두 번째, 수요/공급 불균형에 대한 사전 경고 시스템으로써 수급 리스크를 사전에 인지하고 대응할 수 있다.

세 번째, 운영 측면 일정 준수에 의한 비용 절감, 의사결정 시간 최소화 및 휴먼 에러 방지 효과가 기대된다.

더불어 본 연구에서는 민감도 분석 기법을 활용하여 시나리오 별로 제약 해소에 따른 모델 경제성 변화를 확인할 수 있었다. 이를 통해 구축 모델의 건전성을 검증하였고 다양한 시나리오 적용으로 전략적인 운영 의사결정에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



[그림 6-1] 최적화 모델의 역할

6.2 정유 산업의 미래와 스마트 공장

스마트 공장에 대한 정의는 고객이 요청하는 즉시 다양한 요구를 만족시킬 수 있는 제품을 생산/유통하는 사람 중심의 첨단 지능형 공장을 말한다. 독일은 '11 년 4 차 산업혁명을 제시하며 스마트 공장을 언급하였고 스마트 공장의 이점은 과거의 직관에 의지한 경영에서 데이터에 의한 과학적인 경영이 가능한 것이다. 스마트 공장을 단계별로 나누어 보면 [표 6-1]과 같다.

[표 6-1] 스마트 공장의 단계 구분

단 계		내 용	기 술
1	비 스마트	컴퓨터 기술을 활용하는 일반 공장 - CAD/CAM을 사용하지만 연결이 안됨	-
2	기초	기기간 연결된 스마트 공장의 기초단계 - 설비와 프로세스가 상호 연결	ERP, PLM, MES, APS, Simulation, Virtual Mfg.
3	중간 1단계	2단계와 3단계의 중간단계 - Connected & Controlled	
4	중간 2단계	3단계 + Optimization이 가능한 공장 - 현존하는 최고의 자동화, 스마트 수준	
5	고도화	미래형 공장으로 인공지능이 활용된 환경 친화적 지능형 공장	미래 기술

국내 기업들은 스마트 공장의 단계를 높이기 위해 많은 노력을 기울이고 있으며, 인공지능/빅데이터를 필두로 4 차 산업 혁명 및 디지털 트랜스포메이션(Digital Transformation)이 산업계 전반에 걸쳐 필수로 인식되고 있다. 이에 국/내외 정유업계에서도 기업마다 시기의 차이는 있겠지만, 스마트 팩토리 완성과 디지털 트랜스포메이션 가속화를 위해 다양한 방식으로 변화를 꾀하고 있다. 견고한 경영 과학의 최적화 기반을 통해 효과적으로 SCM 을 운영하고 이를 근간으로 스마트 팩토리 및 인공지능/빅데이터 기술을 접목할 수 있다면, 지형적으로 불리한 환경을 지닌 국내 정유기업이 지속적으로 살아남을 수 있는 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Gary, James H., Glenn E. Handwerk, and Mark J. Kaiser. "*Petroleum refining: technology and economics*." CRC press, 2007.

[2] Khor, Cheng Seong, and Dimitrios Varvarezos. *"Petroleum refinery optimization."* Optimization and engineering 18.4 (2017): 943-989.

[3] INFROMS.org. *"What is O.R.?"* The Institute for Operations Research and the Management Sciences.

[4] Hillier, Frederick S. *"Introduction to operations research."* Tata McGraw-Hill Education, 2012.

[5] Rajgopal, Jayant. *"Principles and applications of operations research."* Maynard's Industrial Engineering Handbook.-2004.-P (2004): 11-27.

[6] Merigó, José M., and Jian-Bo Yang. *"A bibliometric analysis of operations research and management science."* Omega 73 (2017): 37-48.

[7] Etschmaier, M. M., and M. Rothstein. "*Operations research in the management of the airlines."* Omega 2.2 (1974): 157-179.

[8] INFROMS Computing Society. *"The Nature of Mathematical Programming"* Mathematical Programming Glossary.

[9] Dantzig, George B.; Thapa, Mukund Narain (1997). *"Linear programming."* New York: Springer. p. xxvii.

[10] Karmarkar, Narendra. "*A new polynomial-time algorithm for linear programming.*" Proceedings of the sixteenth annual ACM symposium on Theory of computing. 1984.

[11] ibm.com/analytics/cplex-optimizer *"What can IBM CPLEX Optimizer do for business?"* Retrieved (18 Nov 2020)

[12] gnu.org/software/glpk *"Introduction to GLPK"* Retrieved (18 Nov 2020)

[13] Kyungsik Lee, "*Optimization Lecture*", Seoul National University

[14] Taha, Hamdy A. "*Operations Research An Introduction.*" © Pearson Education Limited 2017, 2017.

[15] Ye, Yinyu. *"Interior point algorithms: theory and analysis."* Vol. 44. John Wiley & Sons, 2011.

[16] Dantzig, George B. *"The diet problem."* Interfaces 20.4 (1990): 43-47.

[17] Chachuat, B. *"Mixed-Integer Linear Programming (MILP): Model Formulation"*, ChE 4G03: Optimization in Chemical Engineering, McMaster University, Department of Chemical Engineering." (2009).

[18] Galli, Laura. *"Algorithms for Integer Programming."* (2016).

[19] Clausen, Jens. "*Branch and bound algorithms-principles and examples.*" Department of Computer Science, University of Copenhagen (1999): 1-30.

[20] Conway, Richard W., Louis W. Miller, and William L. Maxwell. "*Theory of scheduling*." Dover, 2003.

[21] Land, Ailsa H., and Alison G. Doig. *"An automatic method for solving discrete programming problems."* 50 Years of Integer Programming 1958-2008. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 105-132.

[22] Clausen, Jens. *"Branch and bound algorithms-principles and examples."* Department of Computer Science, University of Copenhagen (1999): 1-30.

[23] Jiang, Zhenfeng, Dongxu Chen, and Zhongzhen Yang. *"A Synchronous Optimization Model for Multiship Shuttle Tanker Fleet Design and Scheduling Considering Hard Time Window Constraint."* Journal of Advanced Transportation 2018 (2018).

[24] Marchand, Hugues, et al. *"Cutting planes in integer and mixed integer programming."* Discrete Applied Mathematics 123.1-3 (2002): 397-446.

[25] Pannell, David J. *"Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies."* Agricultural economics 16.2 (1997): 139-152.

[26] Saltelli, Andrea, et al. *"Global sensitivity analysis: the primer."* John Wiley & Sons, 2008.

[27] El-Temtamy, Seham A., and Tahani S. Gendy. *"Economic evaluation and sensitivity analysis of some fuel oil upgrading processes."* Egyptian Journal of Petroleum 23.4 (2014): 397-407.

[28] van der Hoek, T. *"Optimization of crude oil operations scheduling and product blending and distribution scheduling within oil refineries."* (2014).

[29] Mouret, Sylvain. *"Optimal scheduling of refinery crude-oil operations."* (2010).

[30] Castillo, Pedro A. Castillo, Pedro M. Castro, and Vladimir Mahalec. *"Global optimization of nonlinear blend-scheduling problems."* Engineering 3.2 (2017): 188-201.

[31] Mendez, Carlos A., et al. *"A simultaneous optimization approach for off-line blending and scheduling of oil-refinery operations."* Computers & chemical engineering 30.4 (2006): 614-634.

[32] Singh, A., et al. *"Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations."* Journal of process control 10.1 (2000): 43-58.

[33] Jia, Zhenya, and Marianthi Ierapetritou. *"Mixed-integer linear programming model for gasoline blending and distribution scheduling."* Industrial & Engineering Chemistry Research 42.4 (2003): 825-835.

[34] Chen, Xiao, and Ning Wang. *"Optimization of short-time gasoline blending scheduling problem with a DNA based hybrid genetic algorithm."* Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 49.10 (2010): 1076-1083.

[35] EMERSON Korea. "The Present and Future of Korea's Oil Refinery Industry", Retrieved (20 Nov 2020)

[36] Korea Energy Economics Institue, “국제 석유시장 구조 변화에 따른 한국 석유산업 중장기 발표 전략”

[37] Leffler, William L. "Petroleum refining for the nontechnical person." (1985).

[38] Korea Petroleum Quality & Distribution Authority “Fuel Specification>Petroleum and Petroleum Substitute fuel” Retrieved (21 Nov 2020)

[39] Marketing, Global. *"Diesel fuels technical review."* (2007).

[40] Liu, Guangrui, Beibei Yan, and Guanyi Chen. *"Technical review on jet fuel production."* Renewable and Sustainable Energy Reviews 25 (2013): 59-70.

[41] Neiro, Sérgio MS, and José M. Pinto. *"Supply chain optimization of petroleum refinery complexes."* Proceedings of the 4th International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations. 2003.

[42] Wallace, Thomas F. *“Sales and operations planning: the how-to handbook.”* TF Wallace & Co, 2004.

[43] APICS *“APICS Introduction to Sales and Operations Planning(S&OP).”* Retrieved (21 Nov 2020)

[44] Maravelias, Christos T., and Charles Sung. *"Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities."* Computers & Chemical Engineering 33.12 (2009): 1919-1930.

[45] Jiang, Shixun. “*Optimisation of diesel and gasoline blending operations*.” The University of Manchester (United Kingdom), 2016.

[46] Lee, Hau L., Venkata Padmanabhan, and Seungjin Whang. *"Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect."* Management science 43.4 (1997): 546-558.

[47] ibm.com/academic/technology/data-science Retrieved (18 Nov 2020)

Abstract

A Study on the Scheduling for Multi-variety Batch Production in the Process Industry

Sangwon Jung
Department of Engineering Practice
Graduate School of Engineering Practice
Seoul National University

The domestic oil refining industry, along with the automobile and chemical industries, was called one of the top three heavy industries and was responsible for Korea's growth. Although it relies on imports for all of its raw materials, it accounts for 7 to 8 percent of Korea's total exports based on its high portion of advanced unit and large-scale refining facilities (as of 2018). Although the global economic slowdown caused by the recent COVID-19 crisis is causing difficulties such as falling refining margins and decreasing operating rates, it is expected to recover margins and secure additional export competitiveness when recovering demand after COVID-19 by enhancing its own resilience. The characteristics of the oil refining industry are large-scale device industries, and active and flexible response to changes in market demand is relatively difficult compared to other industries. As the global economy has an economic cycle and relies on imports for all raw materials, fluctuations in raw material prices due to various environmental changes often affect the industry. China's increased exports of petroleum products and U.S.

shale oil production have also been affected. In response to various changes in the environment, the company continues to make efforts to secure competitiveness in various ways in the stages of purchasing and managing supply chains. In this study, we would like to address the last step in the supply chain management phase, the study of how to efficiently manufacture various petroleum products in an oil refinery. The oil production of the refinery belongs to the supply chain management and is operated by the production plan through mid-term planning considering the long-distance crude oil purchase period. Depending on various environmental changes such as real-time process changes and supply and demand factors of products, there are cases where they are operated differently from production plans that are optimized. The objective was to construct a model that could optimize short-term scheduling based on production plans through a study of scheduling that could minimize differences from these production plans in the manufacturing process of various petroleum products. The scheduling system is expected to provide an operational guide to collect and enter the most recent operation data and to minimize product operating costs for about a week. In addition, it is expected to have the effect of checking short-term balance of supply and demand and operational risk.

Keywords : Scheduling, Optimization, Refinery, Blending
Student Number : 2019_21553