



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](#)

박사학위 논문

수요와 원료구입에 불확실성이 있는
건강기능식품 생산의 순현재가치 최대화
문제

- 휴리스틱 기반 시뮬레이션을 중심으로 -

Net Present Value Maximization
Problem in Health Functional Food
Production under Uncertain Demand
and Raw Material Supply

- A Heuristic-based Simulation Approach -

2023년 12월

승실대학교 대학원

경영학과

서 정 민

박사학위 논문

수요와 원료구입에 불확실성이 있는
건강기능식품 생산의 순현재가치 최대화
문제

- 휴리스틱 기반 시뮬레이션을 중심으로 -

Net Present Value Maximization
Problem in Health Functional Food
Production under Uncertain Demand
and Raw Material Supply

- A Heuristic-based Simulation Approach -

2023년 12월

승실대학교 대학원

경영학과

서 정 민

박사학위 논문

수요와 원료구입에 불확실성이 있는
건강기능식품 생산의 순현재가치 최대화
문제

- 휴리스틱 기반 시뮬레이션을 중심으로 -

지도교수 안 태 호

이 논문을 박사학위 논문으로 제출함


2023년 12월


숭실대학교 대학원

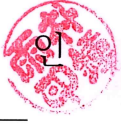
경영학과


서 정 민

서 정 민 의 박 사 학 위 논 문 을 인 준 함

심 사 위 원 장 유 한 주 인 

심 사 위 원 최 정 일 인 

심 사 위 원 박 종 우 인 

심 사 위 원 박 희 준 인 

심 사 위 원 안 태 로 인 

2023년 12월

송실대학교 대학원

목 차

국문초록	vi
영문초록	viii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구 방법 및 구성	3
제 2 장 선행연구	6
2.1 원료의 불확실성	6
2.2 NPV	7
2.3 현금흐름	8
2.4 생산계획	10
2.5 재고관리	11
2.6 휴리스틱	13
2.7 시뮬레이션	15
제 3 장 수학적 모형	17
3.1 문제의 개요	17
3.2 문제의 가정	18
3.3 문제의 수식화	21

제 4 장 알고리즘	29
4.1 하위 문제들의 정의와 도출	36
4.1.1 확정적 문제 $[DP]$ 의 정의와 도출	36
4.1.2 t 월별 문제 $[DP^t]$ 의 정의와 도출	38
4.1.2.1 추정계수 갱신	38
4.1.2.2 의사결정변수 보정	39
4.1.2.3 종속변수 보정	39
4.2 $[DP^t]$ 해법	39
4.2.1 $[DP^t]$ 의 휴리스틱 알고리즘의 약속	40
4.2.1.1 최초의 초기해 생성	40
4.2.1.2 해의 개선규칙	42
4.2.1.3 새로운 초기해 생성	47
제 5 장 모의실험	49
5.1 모의실험 조건 설정	50
5.1.1 데이터 생성 기본구성	50
5.1.1.1 원료 단가, 제품 비용과 가격	52
5.1.1.2 제품의 수요	53
5.1.2 불확실성 대처를 위한 조절 계수	58
5.2 모의실험 결과	59
5.2.1 Basic Problem Set과 조절 계수 조합	59
5.2.1.1 Basic Problem Set의 약속	59
5.2.1.2 사용한 조절계수 조합	60
5.2.2 Rand_Sigma 변화에 따른 최적 조절 계수 조합과 기법 비교	60
5.2.2.1 Rand_Sigma 변화에 따른 최적 조절 계수 조합	60

5.2.2.2 단순 생산 계획과 본 연구의 휴리스틱 기법의 비교	63
5.2.3 $Rand_Sigma = \text{수요 추정치} \times 0.3$ 일 때의 파라미터 변화에 따른 최적 조절 계수 조합	63
5.2.3.1 Stockout_Len 변화에 따른 최적 조절 계수 조합	64
5.2.3.2 DC_Rate 변화에 따른 최적 조절 계수 조합	65
5.2.3.3 Price 변화에 따른 최적 조절 계수 조합	66
제 6 장 결 론	68
6.1 연구의 결과	69
6.2 연구의 시사점	70
6.3 연구의 한계 및 향후 연구과제	71
참고문헌	72

표 목 차

[표 2-1] 현금 흐름에 관한 선행연구	9
[표 4-1] 시나리오 1. 월별 제품 수요와 원료 공급량	31
[표 4-2] 시나리오 2. 월별 제품 수요와 원료 공급량	32
[표 4-3] 시나리오 3. 월별 제품 수요와 원료 공급량	32
[표 5-1] 데이터 셋의 기본 구성	50
[표 5-2] 제품별 필요 원료의 수	51
[표 5-3] 제품과 원료의 계수들	53
[표 5-4] 최초 월수요 200, 연 성장률 0.20일 때의 추세 수요	54
[표 5-5] 추세 수요, 계절 효과와 수요 추정치	55
[표 5-6] $Rand_Sigma = (추정치) \times 0.2$ 의 시나리오 수요	56
[표 5-7] $Rand_Sigma = (추정치) \times 0.4$ 의 시나리오 수요	57
[표 5-8] 제품 수요 생성 파라미터	57
[표 5-9] $Rand_Sigma = \text{수요 추정치} \times 0.05$ 일 때의 계수 조합별 NPV 평균	61
[표 5-10] $Rand_Sigma = \text{수요 추정치} \times 0.20$ 일 때의 계수 조합별 NPV 평균	61
[표 5-11] $Rand_Sigma$ 별 최적 계수 조합	62
[표 5-12] $Rand_Sigma$ 별 두 기법 비교	63
[표 5-13] $Rand_Sigma = \text{수요 추정치} \times 0.30$ 일 때의 계수 조합별 NPV 평균	64
[표 5-14] Stockout_Len(SL)별 최적 조합과 NPV 평균	65
[표 5-15] DC_Rate(DR)별 최적 조합과 NPV 평균	66
[표 5-16] Price에 따른 최적 조합과 NPV 평균	67

그 립 목 차

[그림 4-1] 제 품 1의 시나리오별 수요	33
[그림 4-2] 제 품 2의 시나리오별 수요	33

국문초록

수요와 원료구입에 불확실성이 있는 건강기능식품 생산의 순현재가치 최대화 문제 - 휴리스틱 기반 시뮬레이션을 중심으로 -

서정민

경영학과

승실대학교 대학원

의학 기술의 발전으로 인해 기대수명이 높아지는 고령화 사회에서 현대인이 겪는 도시의 환경오염과 다양한 스트레스는 지속적인 건강에 관한 관심을 불러일으켰으며, 이러한 사회의 트렌드는 건강기능식품에 관한 관심을 점점 더 크게 만들었다. 그로 인해 건강기능식품 시장은 2017년부터 2022년까지 연평균 성장률 16%의 고속 성장을 이루었으며, 시장의 진입장벽이 낮아 경쟁 역시 심화되고 있다. 건강기능식품 시장의 특성 중 하나는 소비자들의 선호 제품이 계속 변화하는 것이며, 기업들은 경쟁력 향상을 위하여 유행하는 신제품을 빠르게 공급할 수 있으며 다양한 수요와 변동에 유연하게 대응할 수 있는 다품종소량생산 시스템으로 변화하고 있다. 또한, 독점력을 갖추기 위하여 전략적으로 독점원료 또는 프리미엄 제품을 개발하는 회사들도 조금씩 증가하고 있다.

일반적으로 국내 건강기능식품의 원료는 오랜 기술력과 안전성을 확보한 선진국으로부터 수입되는 경우가 대부분이다. 이러한 원료는 별크한

원료로부터 특정 유효성분만 뽑아내고 나머지는 폐기하기 때문에 수율이 무척 낮으며 가격이 높다는 특징을 가지고 있다. 또한, 특수한 조건에서 보관해야 하며 유통기한이 2~3년 내로 짧은 편이다.

제품의 생산도 일반 제약사처럼 자사의 제품을 효율적으로 대량 생산하는 시스템이 아닌, 대부분 최소 로트 단위로 다품종소량생산을 해야 한다. 그 이유는 첫째, 특정 건강기능식품의 시장 수요가 얼마나 되는지를 가늠하기 어렵고, 둘째 유통기한이 그리 길지 않기 때문이다. 이런 연유로 각 생산회사는 매번 다른 제품들을 생산해야 하는 만큼, 효율성이 매우 떨어지게 되어 제품의 생산에 비교적 긴 리드타임이 필요하다. 또한, 해외로부터의 원료 구입은 운송 기간도 길고, 간혹 글로벌 원료공급사에 품질이 걸리는 경우 최소 몇 개월에서 1년 이상 원료의 공급이 중단될 수도 있다. 따라서, 이 시장은 수요의 불확실성, 원료 공급의 불확실성, 원료와 제품의 짧은 유통기한 등을 효율적으로 관리하는 것이 필수이다.

본 연구는 수요와 원료 구입의 불확실성이 존재하는 상황에서 건강기능식품 회사의 순현재가치(NPV) 최대화를 다루는 연구이다. 원료 공급에 불확실성이 있는 상황에서 제품 생산과 원료 구매에 관한 최적화를 제안하는 알고리즘은 시나리오 기반 휴리스틱 기법이다. 본 연구는 제품의 수요와 원료 공급의 시나리오를 가지고 수학적 모델링을 통해 이 문제의 해를 구하는 휴리스틱 기법을 제시한다. 소개한 기법이 특정 상황에서만 유효한지를 검증하기 위해 주어진 정보를 기반으로 다양한 시나리오를 생성하여 시나리오별로 소개한 기법을 적용하였다.

ABSTRACT

Net Present Value Maximization Problem in Health Functional Food Production under Uncertain Demand and Raw Material Supply – A Heuristic-based Simulation Approach –

SEO, JOUNG-MIN

Department of Business Administration

Graduate School of Soongsil University

In an aging society where life expectancy is increasing due to advances in medical technology, the various stresses and environmental pollution experienced by modern people have led to continued interest in health, and this social trend has led to greater interest in health functional foods. As a result, the health functional food market has achieved rapid growth at an average annual growth rate of 16% from 2017 to 2022, and competition is intensifying due to low entry barriers to the market. In addition, due to the nature of the health functional food market, where new products must be supplied quickly in line with trends and where consumers' preferred products are constantly changing, companies are shifting their systems to small-scale production of a large variety of products that can flexibly respond to

various demands and changes, and strategically The number of companies with competitiveness and monopoly power by developing exclusive raw materials or premium products is gradually increasing.

However, health functional food raw materials have a raw material market with completely different characteristics from industrial products or agricultural and marine products, and are mostly imported from developed countries that have secured long-term technology and safety. Because these raw materials extract only specific active ingredients from bulk raw materials and discard the rest, the yield is very low and the price is high. Additionally, it must be stored under special conditions and its expiration date is short, within 2 to 3 years.

The production of products is not a system that efficiently mass-produces their products like general pharmaceutical companies, but in most cases, small quantity production of various types is required in minimum lot units. The reason is that, firstly, it is difficult to estimate the market demand for a specific health functional food, and secondly, the expiration date is not very long. For this reason, as each production company must produce different products each time, efficiency is greatly reduced and a relatively long lead time is required for product production. In addition, the supply of raw materials from overseas requires a long transportation period, and in some cases, global raw material suppliers are out of stock, and in some cases, raw material supply may be interrupted for at least several months to a year or more. Therefore, in this market, it is essential to efficiently manage uncertainty in demand, uncertainty in supply of raw materials,

and short shelf life of raw materials and products.

Therefore, this study deals with maximizing the net present value (NPV) of a health functional food company in a situation where there is uncertainty in demand and supply of raw materials. The algorithm that proposes optimization of product production and raw material purchase in situations where there is uncertainty in raw material supply is a scenario-based heuristic technique. This study presents a heuristic technique to solve this problem through mathematical modeling using scenarios of product demand and raw material supply. In order to verify whether the introduced technique is effective only in specific situations, various scenarios were created based on the given information and the introduced technique was applied to each scenario.

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

한국인의 기대수명은 의학 기술의 발전으로 인해, 1970년 62.3세에서 2019년 83.3세로 증가하였다. 이러한 고령화 사회에서 현대인이 겪는 도시의 환경오염과 다양한 스트레스는 지속적인 건강에 관한 관심을 불러일으켰으며, 그로 인해 웰빙(Well-being), 로하스(LOHAS, Lifestyles Of Health and Sustainability)와 셀프메디케이션(Self-Medication)처럼 건강 지향적인 삶이 사회의 트렌드가 되면서 건강기능식품에 대한 관심도는 시간이 지날수록 더욱 커지고 있다.

국내 건강기능식품 시장은 2002년 ‘건강기능식품에 관한 법률’이 제정된 후 본격적으로 형성되었으며, 그 후 소비 트렌드의 변화와 코로나19 팬데믹 등으로 인해 건강관리에 관한 관심이 크게 높아지면서 시장의 규모가 지속해서 확대되고 있다. 통계청 건강기능 식품산업 현황에 따르면 2021년 기준 국내 판매액과 수출액을 합한 총매출액은 4조 원을 넘어섰으며, ‘17년 이후 ’22년까지 연평균 성장률 16%를 기록하였다(통계청, 2023년 10월 24일).

그러나 최근 코로나19 팬데믹과 우크라이나-러시아 전쟁 등의 사건들은 원자재비, 물류비, 마케팅비와 인건비 등을 급등시켰으며, 점점 포화되고 있는 시장환경은 과도한 업계 간의 경쟁을 불러오고 있어 기업의 수익성 저하와 적자 전환을 일으키고 있다. 신생 업체의 수는 계속 늘어나고 있으나, 제품 대다수가 중소 위탁업체를 통해 주문자 상표 부착 방식(OEM, Original Equipment Manufacturer) 및 생산자 개발 방식(ODM, Original Development Manufacturing) 형태로 제작하고 있어서 제품의 생산과 관련된 리드타임도 더욱 늘어나고 있다. 또한, 건강기능식

품 특성상 소비자들의 선호 제품이 계속 변화하기 때문에 트렌드에 맞게 새로운 제품이 빠르게 공급되어야 하며, 이런 시장의 요구를 반영하기 위한 전략으로 소품종대량생산에서 다양한 수요와 변동에 유연하게 대응할 수 있는 다품종소량생산 쪽으로 기업의 생산 시스템도 바뀌고 있고, 업종의 특성상 공산품과 같은 계획생산이 쉽지 않기 때문에 대부분의 업체가 과도한 재고나 품질 사태로 인해 어려움을 겪고 있다.

이런 어려운 시장 상황에서도 전략적으로 독점원료나 프리미엄 제품 개발을 통해 경쟁력과 독점력을 갖춘 회사들이 하나둘씩 생겨나고 있다. 과거에는 비타민이나 홍삼 등의 몇몇 제품만 건강기능식품으로 인식되었으나, 최근에는 다양한 효능과 기능성을 갖춘 제품들이 개발되어 시중에서 판매되고 있다. 최근 건강기능식품 시장의 요구는 과거처럼 단순한 건강기능식품의 범주를 넘어, 질병 치료의 보조 및 생명 연장과 같은 특수 분야로까지 확대되고 있다.

그러나 이러한 특수 분야의 건강기능식품 원료는 공산품이나 농수산물과는 전혀 다른 성질의 원재료시장을 가지고 있으며, 오랜 기술력과 안전성을 확보한 선진국으로부터 수입되는 경우가 대부분이다. 이런 원료는 벌크한 원료로부터 특정 유효성분만 뽑아내고 나머지는 폐기하기 때문에 수율이 무척 떨어지고 가격은 높다. 또한, 특수한 조건에서 보관해야 하며 유통기한도 2~3년 내로 짧은 편이다. 그로 인해 장기 품질과 같은 원료 공급의 문제를 발생시키기도 하고, 유통과 보관에 성분 변질 등과 같은 문제를 발생시키기도 한다. 이러한 불확실성은 불규칙한 생산 또는 생산 중단으로 인한 제품의 장기 품질 상태를 초래하게 되어, 제품이 좋고 시장의 수요가 있어도 기업의 정상적인 경영을 어렵게 만들며, 해당 제품이 필요한 소비자에게 큰 불편을 초래한다.

제품의 생산도 일반 제약사처럼 자사의 제품을 효율적으로 대량생산

하는 시스템이 아닌, 대부분 최소 로트(Lot) 단위로 다품종소량생산을 해야 한다. 그 이유는 첫째, 특정 건강기능식품의 시장 수요가 얼마나 되는지를 가늠하기 어렵고, 둘째 유통기한이 그리 길지 않기 때문이다. 이런 이유로 각 생산회사는 매번 다른 제품들을 생산해야 하는 만큼, 효율성이 매우 떨어지게 되어 제품의 생산에 비교적 긴 리드타임이 필요하다. 또한, 해외로부터의 원료 구입은 운송 기간도 길고, 간혹 글로벌 원료공급사에 품질이 걸리는 경우는 때에 따라서는 최소 몇 개월에서 1년여 이상 원료 공급이 중단될 수도 있다. 그런 만큼 이런 특수 분야의 비즈니스에서는 수요의 불확실성, 원료 공급의 불확실성, 원료와 제품의 짧은 유통기한 등을 효율적으로 관리하는 것이 필수이다.

본 연구에서는 제품들의 수요와 원료들의 구입에 불확실성이 존재하는 경우, 제품들의 생산과 원료들의 구입에 대한 일정을 어떻게 관리하여야 하는가에 대해 수리적 모형을 제시하고, 목적함수 값을 최대화하는 알고리즘을 제안하며, 제시된 불확실성에 대해 휴리스틱 기반 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 유효성을 검증하고자 한다.

1.2 연구 방법 및 구성

본 연구는 다품종소량생산인 건강기능식품의 제품에 관한 생산과 원료 구매 일정을 다룬다. 제품의 수요 불확실성으로 인해 제품의 생산 적절성과 원료 구매 가능 여부는 확률적이다. 이 연구의 목적함수는 순현재가치(NPV) 최대화이다. 만약 제품의 수요만 확실히 안다면 제품의 생산량과 원료의 구매량은 확정적이며 최적의 생산 및 구매 일정이 존재한다. 하지만 이 연구는 제품의 수요와 원료의 구매에 불확실성이 있는 만큼 최적의 일정은 존재할 수 없다. 제품의 수요 예측이 어긋나면, 불필요한 재고가 발생하여 폐기하거나 재고 부족으로 인해 판매 기회를 상실하

게 되는 문제가 발생한다. 원료의 구입에도 동일한 문제가 발생한다. 제품의 생산에 필요한 원료가 충분히 준비되어 있지 않으면 필요한 수량의 제품을 생산할 수 없다. 또 원료를 주문했는데, 원료공급사의 품질이 발생하여 구입이 안 되면 아예 제품의 생산을 못 하게 되어 장기 품질 상태가 지속될 수 있다. 제품의 수요와 원료의 구입에 불확실성만 없다면 제품의 생산과 원료의 구입 규칙에 따른 NPV는 오직 하나만 존재한다. 하지만 본 연구처럼 제품의 수요와 원료의 구입에 불확실성이 존재한다면 동일한 규칙을 적용한다 해도 NPV가 매번 달라진다.

제품의 수요 불확실성 요인인 성장률, 계절적 요인, 기념일 효과 등을 모수(Parameter)라 하고, 이에 따른 확률적 변동을 오차(Error)라 한다. 이번 연구는 오차의 확률분포가 알려져 있거나 오차가 특정한 확률분포를 따른다고 가정하자. 경험치에 의존해 제품별 수요의 모수와 오차의 확률분포를 특정하면, 특정 T개월 동안의 월별 제품 수요를 생성할 수 있다. 또한, 경험 축적을 통해 원료가 품질되는 시기와 확률을 사전에 알고 있다는 가정하에 정상적으로 원료가 공급될 때의 제품 수요와 원료의 공급 시나리오를 다수 생성할 수 있다.

제품의 수요와 원료의 공급 시나리오를 가지고 수학적으로 모델링을 한다. 이 수식을 알고리즘화한 후 코딩하여 모의실험을 진행한다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 시나리오 기반 휴리스틱 기법이다. 이를 위해 (1) NPV를 최대화하기 위한 제품의 수요 및 원료의 공급에 대하여 확률적 요소가 추가된 수학적 모델링을 제시하고 (2) 수학적 모형의 해결을 위한 알고리즘을 제안하며 (3) 제안한 알고리즘을 실험하기 위해 코드로 전환하고 (4) 데이터 생성 및 모의실험을 통하여 알고리즘의 안정성과 유효성을 입증한다.

본 연구는 총 6장으로 구성하여, 제1장은 서론으로 연구의 배경 및 목

적과 연구 방법 및 구성을 서술하였다. 제2장은 문헌 연구를 통한 이론적 배경으로 불확실성이 있는 생산과 공급 문제를 시뮬레이션 기법 등에 관한 선행연구를 살펴보았다. 제3장은 제품 수요와 원료 구입의 불확실성 하에 제품의 생산과 원료 구매에 대한 수학적 모형을 제시하였다. 제4장은 제시한 모형에 대한 해법으로 알고리즘을 제시하였다. 제5장은 알고리즘을 토대로 코딩하여 모의실험을 진행한 결과를 약술하였다. 마지막으로 제6장은 모의실험의 결과를 중심으로 연구의 결과를 정리하고, 연구의 한계와 연구 방향을 제시하였다.

제 2 장 선행연구

본 연구는 건강식품 제조기업의 순 현재 가치 최대화를 다루는 연구이다. 수요와 원료의 구입에 불확실성을 적용하고 휴리스틱을 적용한 시뮬레이션을 통해 그 결과를 분석한다. 이에 따라 원료의 불확실성, 순 현재 가치(NPV, Net Present Value) 문제, 현금흐름(Cash-Flow), 생산계획, 재고관리와 문제의 해결 접근법의 휴리스틱을 선행연구로 진행하였다.

2.1 원료의 불확실성

기업의 경제활동에 있어서 ‘불확실성’은 모든 실무자가 민감하게 다루는 문제이다(Hult et al., 2010). 글로벌 공급망의 복잡성이 증가하고 외부 환경이 미치는 영향력이 향상됨에 따라 원재료 등의 공급 지연에 대한 변동성이 커지고, 이는 곧 제품의 품질 문제로 이어진다(Bhatnagar & Sohal, 2005). 이처럼 제품 생산에 있어서 원재료 등의 불확실성은 기업의 이익에 직접적인 영향을 미치므로 이에 대한 깊이 있는 이해가 필수적이다.

이를 위해 ‘불확실성(Uncertainty)’에 대한 정의를 살펴보면 다음과 같다. 불확실성은 ‘위험(Risk)’과 혼용되어 사용되기도 하며, 광의로서의 불확실성은 알지 못하거나 예측할 수 없는 상태를 의미한다. 불확실성은 일반적으로 이슈, 따라야 할 경로, 추구하는 해결 방안에 대한 인식과 이해가 부족한 상태를 의미한다. 미래에 전개될 수 있는 상황에 대한 정확한 정보를 얻을 수 없거나, 특정 문제의 발생 가능성을 측정할 수 없는 상태이며, 예측 불가능한 리스크 또는 기존의 지식과 경험의 테두리를 완전히 벗어나 발생하는 요인을 포함한다. 이처럼 불확실성은 공급망 네트워크 내의 임의의 지점에서 발생할 수 있는 위험을 지칭하는 광범위한

용어이며, 많은 분야에서 사용되는 개념이다 (Simangunsong et al., 2012).

불확실성은 본질적으로 다차원적이기 때문에 기업은 여러 불확실성을 동시다발적으로 직면한다(Huang et al., 2014). 이러한 이유로 많은 선행 연구에서는 공급망 불확실성의 원인에 관한 다양한 연구가 이루어졌다 (Simangunsong et al., 2012). 불확실성은 원재료, 공급자, 구매자, 경쟁사, 제조 기술 등 산업의 특성에 따라 다양하게 발생한다(Jin & Doloi, 2008). 제조업체의 제품 생산 관점에서 원재료 공급자와 생산된 제품의 수요의 불확실성은 지대한 영향을 미친다. 불확실성으로부터 생산계획, 재고관리에 차질이 생길 뿐만 아니라 품질이 저하 되는 등 여러 형태의 문제가 파생되므로, 이러한 불확실성은 제품 생산계획의 초기 단계부터 고려되어야 한다(Gaonkar & Viswanadham, 2004).

2.2 NPV

본 연구는 건강식품 제조업의 순 현재 가치 최대화를 다루는 연구이다. NPV는 어떤 사업이나 영업활동의 가치와 타당성을 나타내는 척도 중 하나이다(Shank, 1996). 주로 기업의 예상투자나 프로젝트 수익성을 분석하기 위한 자본 책정 및 투자계획에 주로 이용된다. NPV의 수식은 $NPV = \sum \frac{CF_t}{(1+r)^t} - C_0$ 이다. 이 수식은 미래에 발생하는 예상 현금 유입 및 유출을 현재 시점의 가치로 계산하고, 초기 투자액을 뺀 순 가치를 의미한다. NPV의 값이 양수이면 기대 수익률 이상의 수익을 가질 것으로 예상하며 음수는 그 반대로 기대 수익률 이하의 수익을 가질 것으로 예상할 수 있다(Wetekamp, 2011). NPV는 기업의 새로운 프로젝트, 기술, 장비의 투자 결정과 부동산이나 금융시장에서의 임대수익, 가치평가 등 투

자전락을 결정하는 데도 중요한 지표로 사용되며 에너지 및 자원 사업의 개발가치와 향후 수익을 평가하고 R&D(Research and Development) 사업의 예상 수익과 연구개발 비용의 측정에도 사용되는 등 다양한 분야의 NPV의 활용도는 증가하고 있다. NPV의 관련 연구로 Patterson et al.(1990)은 역추적 알고리즘(Backtracking Algorithm)을 활용하여 프로젝트 소요 기간을 최소화시키고, 프로젝트 NPV를 최대화시키는 유용한 절차를 제시하였다. NPV 최대화 문제를 가진 자원 제약을 고려한 일정 문제는 Doersch & Patterson(1977)에 의해 소개되었고, Yang et al.(1993)에 의해서 후속 연구가 진행되었다. Asadujjaman et al.(2021)은 NPV 기반의 자원 제약이 있는 프로젝트 일정 문제를 해결하기 위한 유전 알고리즘과 면역 알고리즘을 결합한 면역 유전 복합 알고리즘을 제시하였다. 인력과 NPV 관계의 연구도 진행되었다. 일일 및 주간 교대 노동이 필요한 프로젝트에서 노동일정 관리 문제의 새로운 접근법으로 NPV의 추정치를 적용한 일정계획을 제안하였다(Thompson, 1995). 2015년 인도 북부의 석탄 화력 발전소는 NPV를 사용하여 공장의 비용분석을 통해 발전소 경제성을 분석하였다(Kumar et al., 2015).

2.3 현금흐름(Cash Flow)

본 연구는 건강기능식품 제조업체의 문제를 다루고 있으며, 제조업체 관점의 현금흐름에 중점을 두었다. 제조업체의 특성상 현금흐름은 다른 산업과는 다소 차이가 있다. 제조업체는 원자재 구입, 제품 생산, 재고관리, 판매 및 배송 등 다양한 과정을 포함하고 있다.

현금의 흐름(Cash Flow)은 기업, 조직 또는 개인의 경제활동(영업, 투자, 재무 등)에 대한 수입과 지출을 나타낸다. 현금의 흐름 중 현금의 유입을 Cash-Inflow라 하고, 현금의 유출을 Cash-Outflow라고 한다

(Plewa & Friedlob, 1995).

현금의 흐름은 기업의 유동성을 평가하는데 중요한 지표이다. Motlagh(2013)는 실제 기업이 수익을 내는 상황이라도 기업의 보유 현금의 부족하다면 원활한 기업활동이 어려울 수 있다 하였다. 또한, 장기적으로 안정적인 현금의 흐름을 보이는 기업은 기관과 협력기업 등에 신뢰를 주며 존속적으로 성장 능력이 있다고 평가할 수 있다. 기업의 주요 영업활동의 효율성과 성과의 평가로 현금의 흐름을 적용할 수도 있다. 예를 들어, 현금의 흐름이 불안전하고 급격히 감소한다면, 매출에 대한 현금 회수 지연과 재고의 증가 등 문제를 초래한다(Epstein & Pava, 1992). 즉, 현금 흐름은 기업의 영업 효율성, 재무 전략, 경제적 안정성을 나타내는 핵심 역할이다. [표 2-1]은 현금 흐름을 관리하는 다양한 접근 방법과 연구를 정리한 것이다.

[표 2-1] 현금 흐름에 관한 선행연구

저자	연도	연구내용
Chris B. Murphy	2023	현금흐름의 방법으로 직접 현금 흐름, 간접 현금 흐름, 미수금 현금 흐름, 재고 가치 현금 흐름, 투자 활동 현금 흐름, 재무 활동 현금 흐름을 설명
Realdi & Siregar	2022	제약회사의 부채에 대한 정책을 적용하여 부채를 대비할 때, 현금흐름이 기업에 미치는 영향을 연구
Saif et al.	2022	제조업 분야의 기업에서 현금흐름의 조절역할 통하여 기업의 투자 결정과 기업성과의 관계를 설명
Guan	2021	미국 제조 및 에너지 분야 기업의 투자-현금흐름 민감도의 하락 원인에 관하여 연구
Sánchez-Rebul et al.	2020	통조림 회사의 적자 상황에서 현금흐름을 개선하기 위한 6시그마 방법론 제시
Rahman & Sharma	2020	사우디아라비아 산업 제조 부문의 현금 흐름 및 재무 성과의 관계와 연관성을 설명
Finishtya	2019	인도네시아 제조기업 재무부실 상황에서 영업활동 현금흐름, 수익성을 검증하는 연구
Al Hayek	2018	요르단의 산업 제조 공기업의 영업활동으로 인한 순 현금 흐름을 통해 매출수익과 순이익을 추정하는 연구
Ahmed et	2018	제약회사에서 잉여 현금의 흐름이 수익성에 미치는 영향을

al.		연구
Almeida et al.	2004	1971~2000년까지 제조 회사의 현금 흐름 민감도를 추정하고 실증적으로 유용한 측정값을 제공하였다.
Scherer	2001	계약 연구개발에서 기업의 수익과 현금의 흐름의 중요성을 설명
McCue	1997	현금의 흐름이 안정적인 소규모 병원의 장점과 이유에 관한 연구

2.4 생산계획

미래의 변동되는 수요와 제한된 생산 능력 사이에서 수요와 공급의 불균형 문제가 야기되며, 이에 적절히 대응하기 위한 생산 능력을 결정하는 데에는 많은 어려움이 뒤따른다. 외부로부터의 수요에 대응하여 적시에 적량의 제품을 공급한다는 생산 목적을 달성하기 위해 생산 활동의 적절한 통제와 이를 위한 계획의 수립은 필수적이다. 생산계획(Production Planning)이란 일정 기간 얼마나 많은 생산 활동이 발생할 것인지에 대한 잠정적인 계획을 결정하는 과정이다. 생산계획을 통해 예상 재고 수준과 생산계획을 실행하는데 필요한 인력 및 기타 자원을 결정할 수 있다(Gelders & Wassenhove, 1981). 생산계획의 주요 목표는 원하는 수준의 품질로 제품을 생산하고 소비자에게 전달하는 가장 효율적인 방법을 설계하는 것이다. 실제로, 잘 설계된 생산계획은 원활한 작업 흐름을 제시하여 생산량 극대화과 비용 절감에 직접적인 영향을 미친다. 생산계획에 관련된 선행연구로 Koulouris & Kotelida(2011)는 원자재 공급이 불확실한 상황에서 토마토를 다양한 종류의 페이스트로 가공하는 실제 공장의 생산 일정을 연구하였으며, 시물레이션 기반 생산 프로세스 모델을 개발하고 가정된 공급 프로파일 하에서 토마토 재고 제약조건을 충족하는 실행가능한 생산계획을 생성하였다. Burggräf et al.(2023)는 확률론적 리스크 시물레이션을 사용하여 기획자에게 정보 밀도가 부족한 경

우 생산계획의 단계를 증가하여 중단과 지연을 줄일 수 있는 선박 생산의 실행 리스크를 체계적으로 분석할 수 있는 절차 모델을 제시하였으며, Nwasuka & Uchechukwu(2023)는 컴퓨터 기반 생산계획, 일정 관리와 통제(CPPSC, Computer-based Production Planning, Scheduling, and Control)에 대한 최근 추세, 접근방식 및 문제에 대한 선행 논문들을 분석하여, 스마트 제조 시스템에 라인 밸런싱과 공정 계획 선택이 통합되면 생산 공정이 더욱 효율적이고 가동 중지 시간이 줄어들며 자원 활용도가 향상된다는 점과 생산 환경에 대한 포괄적인 보기를 제공하여 데이터 기반 의사결정 및 최적화 전략을 가능하게 한다는 효과성을 AI 기반 스마트 제조시스템 도입 전과 후의 생산실적의 비교를 통하여 제시하였다. Dadaneh et al.(2023)은 수요 불확실성 하에서 다양한 공급업체로부터 원자재를 구매하는 최적의 수량, 운송 방법 및 시간 경과에 따른 생산계획을 결정하여 자재 및 제조 제품 창고의 적절한 재고관리를 통해 총비용을 최소화하는 것에 관해 연구하였으며, Seyfi et al.(2022)은 수요 불확실성 하에서 두 가지 다중 기간, 다중 생산 수학적 최적화 모델을 제안하였으며, 불확실한 수요를 시나리오 트리를 통해 모델링하였다.

2.5 재고관리

재고관리의 목적은 고객 서비스 최대화, 저비용 공장운영을 동시에 만족하면서 이익을 최대화하는 데 있다(Arnold et al., 2008). 재고관리란 재고와 서비스의 균형을 통하여 수입을 최대화하고 비용을 최소화하여 이익을 극대화하는 기업의 전략적인 판매 활동의 일환이다.

통상적으로 재고관리는 고객의 주문에 즉각적으로 대응하기 위한 최종 완제품을 우선적으로 고려하지만, 원재료는 기업 내부, 기업의 특정 부서의 문제로 치부되는 경향이 있어 문제로 인식되지 못하기도 한다. 하지

만 원재료는 원가에 가장 많은 영향을 미치는 요소임과 동시에 제조업체의 입장에서 손익 민감도 또한 상당하다. 따라서 기업은 단순한 최종 제품의 재고에 대한 관리가 아닌 제품의 생산과정 전반에 걸쳐 모든 자재에 대한 관리 전략을 수립해야 한다. 재고관리의 실패는 제품의 보관 및 비용 문제로 이어지며, 이런 결품 문제는 생산 지연으로 이어져 결과적으로 고객 납기 미준수에 따른 서비스 저하로 이어진다. 이는 매출 기회 상실을 초래하여 기업의 손익에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 따라서, 효과적인 재고관리는 기업 경쟁력 확보를 위한 기업 경영의 핵심 요소라고 할 수 있다.

재고관리는 크게 수요의 특성에 따라 확정적 모형과 확률적 모형으로 구분된다. 확정적 재고모형은 수요와 리드타임이 확정적이라는 가정을 바탕으로 한다. 결정하여야 할 변수는 총 재고비용을 최소화하는 발주량 또는 발주 시기이며, 확정적 재고모형의 비용 요소는 발주비와 재고 유지비이다. 일정한 기간에 일정한 비율로 발생하는 수요에 대한 재고를 보충하기 위하여 발주량을 증가시키면 발주 횟수가 감소하여 발주비는 감소하지만, 평균 재고는 증가하여 재고 유지비는 증가한다. 반대로, 발주량을 감소시키면 발주 횟수가 증가하여 발주비는 증가하지만 평균 재고는 감소하여 재고 유지비가 감소한다. 따라서, 발주비와 재고 유지비를 절충하는 적정의 발주량을 산출하는 것이 확정적 재고모형의 주된 내용이다. 확률적 모형은 수요와 리드타임에 대한 정확한 예측이 불가능하다는 것을 전제로 한다. 리드타임의 불확실성을 대비하기 위해 안전재고를 보유하는 것을 기본적인 대응 방법으로 여긴다. 하지만, 수요나 리드타임이 불확실성에 대비하기 위한 기본적인 방법은 안전재고를 보유하는 것이다. 그런데 안전재고를 많이 보유하게 되면 결품 위험은 감소하게 되지만, 재고 유지비는 증가하게 되며, 반대로 안전재고를 줄이게 되면 결

품 위험은 증가하지만, 재고 유지비는 감소하게 된다. 따라서 적절한 수준의 안전재고를 보유하여 재고 유지비와 결품 비용을 최소로 하는 것이 목표이다(김가영, 2005).

재고관리의 중요성은 산업의 발전과 동시에 그 중요성이 강조됐으며, 이를 배경으로 많은 선행연구에서 재고관리를 대상으로 연구를 진행해왔다. Fortuin(1981)은 자재구매 방식을 크게 SIC(Statistical Inventory Control)와 MRP(Material Requirements Planning) 방식으로 분류하여 평가하였다. Dolgui & Prodhon(2007)은 데이터의 불확실성에서 MRP에서 발생하는 데이터의 불확실성 문제를 해결하기 위해, 리드타임 등의 매개변수를 조정해야 한다고 주장하며, 이에 관한 문헌 연구를 진행하였다. Sun et al.(2009)은 MRP가 확정적 계획 도구이기 때문에 높은 불확실성 하에서 효과적인 계획 수립을 방해한다고 주장하며, 복수 아이템에 대한 시뮬레이션 모델을 통해 수요 예측 에러, 공정 변동성 등 주요 평가지표에 영향을 검토하였다. 또한, Arnold et al.(2008)은 그들의 저서를 통해 자재관리, 생산재고 관리, 물류 관리 전반에 대한 이론을 소개하였다.

2.6 휴리스틱

휴리스틱은 문제를 해결하기 위한 전략 또는 방법론을 의미한다. 기본적으로 최적화 문제나 결정 문제를 풀기 위한 근사적인 접근 방법이다. 특히 복잡하거나 해답이 명확하지 않은 문제들에 대하여 빠르게 근사해(Approximation Solution)나 최적해(Optimal Solution)에 가까운 해답을 찾아내려는 방법이다. 휴리스틱은 최적의 해답을 보장할 수는 없지만, 합리적인 시간 내에 충분히 좋은 해를 찾아가는 것에 그 의미가 있다(Blazewicz, 1978). 문제를 구성하는 요소들이 증가할수록 문제 해결을

위해 매우 많은 계산 시간이 요구되는 전형적인 Np-Hard 문제나 Np-Complete와 같이 알려진 해법이나 문제마다 접근법이 다른 경우에 효과가 있다. 본 연구에서는 임의의 가능해(Feasible Solution)로부터 이웃에 더 나은 해를 탐색하는 과정을 반복하여 개선하는 방법인 이웃해 기반의 탐색 휴리스틱 기법을 사용하여 해의 영역을 다루었다(안태호, 1998). 탐욕 알고리즘(Greedy Algorithm)은 문제 해결의 각 단계에서 최선의 선택을 하도록 설계된 알고리즘이다. 이후 탐욕 알고리즘을 토대로 주변의 해를 비교하며 결과를 개선해 나가는 이웃 탐색 알고리즘(Neighborhood-search Algorithm), 새로운 해의 영역을 탐색해 나가는 타부 검색(Tabu Search) 알고리즘 등이 개발되었다(Glover, 1989).

최근 휴리스틱을 이용한 문제들은 기술 발전으로 인해 그 크기가 커지고 분야가 다양해졌다. 이런 환경에서 휴리스틱의 접근법으로 더욱 큰 범위의 탐색을 지향하는 메타휴리스틱(Metaheuristics)과 두 개 이상의 휴리스틱이나 알고리즘을 결합하여 문제를 해결하는 하이브리드 휴리스틱(Hybrid Heuristics)의 개발이 활발히 진행되고 있다(Zaman, 2021). 그 대표적인 연구로, 대규모 우유 생산의 프로젝트에서 개미 군집 알고리즘(ACO, Ant Colony Optimization)과 타부 검색 두 가지 메타휴리스틱을 결합하여 새로운 하이브리드 휴리스틱을 제안하고 생산 처리시간 단축에 기여하였다(Nguyen, 2020). Jasim(2023)는 섬유 시설 기업에 FMOMPS(Fuzzy Multi-Objective Master Production Scheduling)문제를 적용하고 입자최적화(PSO, Particle Swarm Optimization), 개미 군집 알고리즘을 결합한 휴리스틱을 통하여 섬유 생산설비의 가능한 생산속도와 가용성을 계산하는 연구를 하였으며, 문제의 크기, 기계 수, 부품 수에 따라 최적의 솔루션을 얻는 데 필요한 계산 시간이 기하급수적으로 늘어나는 셀룰러 제조(CMS, Cellular Manufacturing Systems)업체에서 생산 시간의

단축을 위해 부품 시퀀스를 최적화하는 홍수 알고리즘(EGD, Extended Great Deluge)을 제시하였다(Alzidani, 2021).

2.7 시뮬레이션

본 연구는 원료의 구입과 제품의 수요가 확률적인 경우를 다룬다. 수학적 모델에서 확률적인 요소가 있는 경우 시뮬레이션을 사용하여 추정하는 것이 일반적이다. 시뮬레이션(Simulation)은 실제로 실행하기 어려운 과정을 간단히 행하는 모의실험을 뜻하며, 특히 수학적 모델에서 불확실성으로 인해 최적해를 찾기 힘든 확률적 문제 해결을 위한 방법의 하나이다.

가장 일반적인 시뮬레이션 기법은 몬테카를로 분석(MCM, Monte Carlo Method)이다. 몬테카를로 시뮬레이션은 본질적으로 컴퓨터를 통해 무작위로 객체나 프로세스를 생성하는 것이며, 이러한 객체는 복잡한 도로망, 중성자의 이동 또는 주식 시장의 진화와 같은 현실 일부를 모형화한 것으로 "자연적으로" 발생할 수 있다. 그러나 많은 경우 몬테카를로 기법에서 무작위 객체는 순전히 결정론적 문제를 해결하기 위해 "인위적으로" 도입하였다. 즉, MCM은 단순히 특정 확률분포에서 무작위 샘플링을 포함하며, 몬테카를로 기술의 자연적 또는 인위적 설정에서 아이디어는 실험을 충분히 반복함으로 대수의 법칙 및 기타 통계적 추론 방법을 사용하여 관심 있는 많은 수량을 얻는 것이다(Kroese et al., 2014).

불확정적인 사건들의 경우의 수를 난수 발생을 통해 무작위 추출을 반복하는 방법으로 수리적으로 추정하는 시뮬레이션 기법은 대부분 산업 및 생활에 제한 없이 사용할 수 있다. 따라서 실제 상황이나 실제 시스템과 같이 구현하는 것이 실험을 성공시키는 핵심이다(Banks, 2005).

프로젝트에 불확정적 요소를 추정하는 방법 중 하나는 시뮬레이션을

통해 불확정적 요소를 확률적으로 적용하고, 불확정적 요소가 확정될 때마다 단계적으로 확정하는 실험을 충분히 반복하여, 기간/비용을 추정하는 것이다(백인섭, 2019)

생산 프로젝트에서는 시뮬레이션 기법을 불확정적 요소를 확률모델을 적용하고 이를 반복함으로써 결과를 얻을 수 있다(Zhang et al., 2007).

공급망 네트워크(SCN, Supply Chain Network)는 복잡하고 대규모 시스템의 전형적인 예이며, 공급망 네트워크 설계(SCND, Supply Chain Network Design)는 지난 수십 년 동안 질적, 양적 관점에서 광범위하게 연구된 개념이며, 생산 시설의 수, 위치 및 용량을 결정하는 것뿐만 아니라 이러한 시설 중 하나 이상에 대한 시장(고객) 및 공급업체 할당을 결정하는 것을 목표로 한다. SCND의 가장 어려운 책임 중 하나는 동적 특성과 수요, 용량, 운송 시간 또는 제조 시간 등과 같은 변수의 불확실성을 해결하는 것이다. 특히, 수요는 공급망 네트워크를 설계하고 평가할 때 관련성을 보여주는 가장 많이 언급되는 불확실한 매개변수이다. 그러나 비용, 용량, 공급, 노드 중단, 링크 중단 등과 같이 불확실성이 있는 다른 매개변수도 수요와 함께 고려해야 하며, 이러한 매개변수와 관련된 불확실성은 대부분 확률분포와 확률이 할당된 시나리오를 통해 해결되며, 많은 연구가 탄력적인 SCN 설계에 시뮬레이션 최적화 방법을 사용하고 있다(Tordecilla et al., 2021).

생산계획 및 자재구매에서는 국내 항공기 제조사의 ERP 빅데이터를 추출하여 생산계획의 변동 통제에 따른 적정 재고수준 분석에 시뮬레이션 기법을 적용한 결과 재고 문제와 자재의 수급차이를 분석할 수 있었으며, 생산계획 및 자재구매에 수급정보를 동기화하여 재고비용, 리드타임 등 조직성과를 향상시킬 수 있음을 밝혔다(유경열 외, 2021).

제 3 장 수학적 모형

3.1 문제의 개요

본 연구는 건강기능식품의 원료 구입과 제품 생산에 관한 문제로서, 목적함수는 원료 구입, 생산 및 판매에 따른 현금 흐름의 최적화이며, 제품 생산에 필요한 생약 성분의 원료 수급이 때때로 원활하지 않을 수 있고 제품의 수요 또한 확률적으로 추정되는 경우를 다룬다. 제품의 수와 원료의 수가 복수인 경우를 다룬다. 일반적으로 제품은 자체 시설을 사용하여 생산하거나 위탁하여 생산할 수도 있다. 본 논문에서는 위탁 생산하는 경우를 다룬다.

본 연구는 각 제품의 시점별 생산량과 각 원료의 시점별 구입량을 결정하는 문제를 다룬다. 제품의 1회 생산량을 늘린다고 하자. 이 경우, 생산 단가와 품질의 위험은 감소하여 현금 흐름에 정의 효과를 낳지만, 반면 재고 보유기간(생산에서 판매까지의 소요기간)의 증가 및 유통기한 초과로 인한 폐기 확률 또한 증가하여 현금 흐름에 부의 효과를 가져올 수도 있다. 그러므로, 제품별 생산량은 생산단가, 품질과 폐기 확률, 재고 보유기간 등을 고려하여 결정되어야 한다. 제품 생산에 필요한 원료 수급이 안정적이고 수요 또한 확정적이라면, 이 문제는 확정적 생산 일정 문제(Deterministic Production Scheduling Problem)이므로 최적의 생산 일정이 존재한다. 본 연구는 이와는 다른, 원료 수급이나 수요 예측의 불확실성이 일정 수준 이상인 경우를 다룬다. 예를 들어, 제품 A의 생산 시점에 필요한 원료가 공급되지 않는다면 생산 자체가 이루어질 수 없다. 또한, 예상보다 수요가 급증하여 제품이 품질된 경우, 신속히 제품을 추가 생산해야 하는데 제품 생산에는 일정 시간이 소요되며, 원료의 확보에도 일정 시간이 소요된다. 그 결과 추가 생산을 한다고 하더라도 입

고되는 시점까지 품질 사태가 지속될 수 있다.

본 연구는 원료 수급과 제품 수요에 존재하는 불확실성 하에서 제품 생산과 원료 구입에 어떤 규칙을 적용할 때 회사의 NPV(Net Present Value)가 최대화되는지를 모의실험을 통해 살펴보고자 한다.

3.2 문제의 가정

본 문제에서 가정은 다음과 같다.

- (1) 제품과 원료의 수: 분석의 대상이 되는 제품의 수는 $N > 0$ 개이며, 이 값은 사전에 알려져 있다. 제품 생산에 필요한 주요 원료의 수는 $M > 0$ 개이며, 이 값 또한 사전에 알려진 값이다.
- (2) 제품 생산 단위: 각 제품은 최소 크기의 로트의 배수로만 생산된다. 예를 들어 제품 A의 최소 크기의 로트는 20만정이고 제품 B의 로트는 30만 정이라 하자. 이 경우 제품 A는 20만, 40만, 60만과 같은 20만의 배수로, 제품 B의 경우 30만의 배수로만 생산 가능하다. 제품별 생산 로트는 사전에 알려져 있다.
- (3) 제품별 필요 원료의 종류와 수량: 각 제품별 생산에 필요한 원료의 종류와 수량은 사전에 알려진 저 있다. 예를 들어, 제품 A의 최소 크기의 로트 생산에는 원료 1이 200단위, 원료 3이 300단위가 필요하며, 제품의 B의 경우 원료 2는 50단위, 원료 3은 150단위가 필요하다.
- (4) 제품 생산, 리드타임과 입고: 본 연구는 제품을 위탁 생산하는 경우를 다룬다. 제품 생산 의뢰(제품 생산 계약)부터 제품 인도까지 일정한 시일이 걸린다. 이를 제품 생산의 리드 타임이라 하자. 각 제품의 생산 리드타임은 사전에 알려져 있다. 제품의 생산 계약은 월초에 이루어진다고 가정한다. 예를 들어 제품 1이 3월 초에 생산

계약되고 리드타임이 2개월이라면, 제품의 입고는 5월 초가 된다.

- (5) 원료 구입, 리드타임과 입고: 원료 또한 구입부터 인수까지 일정 시일이 요구된다. 이를 원료 구입의 리드 타임이라 하자. 원료 구입, 리드타임 또한 사전에 알려져 있다. 본 연구에서는 원료의 구입도 매월 초에 이루어지는 것으로 가정한다. 예를 들어 원료 1이 7월 초에 구입 계약되고 리드타임이 1개월이라면, 원료의 입고는 8월 초가 된다.
- (6) 제품 생산 의뢰와 원료 준비: 제품 생산 의뢰 시점까지 해당 제품의 생산에 필요한 모든 원료는 확보되어 있어야 한다. 예를 들어, 생산 의뢰 시점에 필요한 원료 50%를 준비하고, 생산 기간 중 나머지 원료 50%를 제공하는 것은 허용되지 않는다.
- (7) 제품과 원료의 유통기한: 제품과 원료별로 유통기한이 존재하며, 그 값은 사전에 알려져 있다. 본 연구에서 유통기한은 입고 기준으로 한다. 예를 들어, 제품 2가 5월 초에 입고되고 유통기한이 4개월이라면, 제품 2는 5월, 6월, 7월과 8월 중 판매 가능하고, 9월부터 유통기한 초과로 판매는 불가능하다. 유통기한이 경과한 제품은 판매될 수 없으며, 유통기한이 경과한 원료는 생산에 사용될 수 없다. 이러한 제품과 원료는 폐기되며 잔존가치는 없다.
- (8) 유통기한 초과 제품과 원료의 폐기: 유통기한이 초과한 제품은 유통기한의 마지막 월의 말에 폐기한다. 예를 들어, 제품 2의 유통기한이 8월까지라면 8월 말에 폐기한다. 유통기한이 초과한 원료도 유통기한의 마지막 월의 말에 폐기한다.
- (9) 폐기비용: 제품이나 원료의 폐기에는 비용이 발생한다. 건강기능식품의 특성상 제품의 판매가나 원료의 구입비에 비해 폐기비용은 상대적으로 미미하므로, 본 연구에서는 폐기비용을 무시한다.

- (10) 제품 생산비: 제품의 1회 생산비는 주문비(Setup Cost)와 변동비(Variable Cost)로 구분된다. 주문비는 로트 크기와 무관하며, 변동비는 로트 크기에 비례한다. 예를 들어, 어떤 제품의 최소 로트 크기가 3천이라 하자. 로트 크기가 3천일 때 변동비가 백만이면, 로트 크기가 6천이면 변동비는 2백만, 크기가 9천이면 변동비는 3백만이다. 로트 크기 당 변동비를 단위 변동비라 하자. 이 경우 단위 변동비는 로트 크기와 무관하게 일정하다. 제품별 생산에 관련된 주문비와 단위 변동비는 사전에 알려져 있다.
- (11) 원료 구입 단위와 구입비: 원료 구입의 로트에는 최소 수량이 존재하지 않는다. 다시 말해, 상당히 작은 양부터 대단히 큰 양까지 구입 가능하다. 원료 구입비에서 주문비는 없거나 비중이 낮아 본 연구에서는 무시한다. 그러므로 원료 구입비는 원료 단가에 구입 수량을 곱한 값이다. 원료별 구입 단가는 시점별로 다소 유동적이지만 제품 원가에서 차지하는 비중이 아주 큰 편은 아니어서, 본 연구에서는 알려진 상수로 간주한다.
- (12) 원료 공급의 불확실성: 원료 공급이 특정 기간 동안 불가할 수 있다. 시점별 원료가 품질될 확률은 사전에 알려져 있다.
- (13) 제품 판매 단가: 제품별 판매 단가는 사전에 알려져 있으며, 수요와 무관하게 일정한 값이다.
- (14) 제품 수요: 제품별 월별 수요는 사전에 예측되며, 예상 표준오차 또한 알려져 있다.
- (15) 월별 현금 지출: 월별 현금 지출의 합계는 사전에 알려진 한도를 초과할 수 없다.
- (16) 현금 흐름 발생 시점: 제품의 생산 비용이나 원료의 구입 비용은 착수 시점에 50%, 인도 시점에 50% 지불한다고 가정한다. 예를

들어 제품 1의 생산 의뢰 시점이 3월 초이고 7월 초에 인수한다면, 생산비용의 50%는 3월 초에 지불하고, 나머지 50%는 7월 초에 지불한다. 제품의 판매 수입은 다음 달 초에 입금된다고 가정한다. 예를 들어 제품 1의 8월 판매 수입이 3,000이라면, 9월 초에 3,000이 입금되는 것으로 가정한다.

(17) 할인율: 분석 기간 중 할인율은 일정한 것으로 가정한다. 예를 들어 월 할인율이 2%라면, 8월 현금흐름에 대한 할인율도 2%이고 12월 현금흐름에 대한 할인율도 2%이다.

3.3 문제의 수식화

본 문제에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\text{Maximize } \sum_{t=1}^T CF(t) \frac{1}{(1+DR)^{t-1}} \quad [1]$$

Subject to

$$x_{i,t} \in \{0, Unit_i, 2 \times Unit_i, 3 \times Unit_i, \dots\}, \quad \forall it \quad [2]$$

$$P_{-}I_{i,t}^b = P_{-}I_{i,t-1}^e + x_{i,t-LT_{p_i}}, \quad \forall it \quad [3]$$

$$s_{i,t} = \text{Min} (P_{-}I_{i,t}^b, d_{i,t}), \quad \forall it \quad [4]$$

$$dc_{-}p_{i,t} = \text{Max} \left(P_{-}I_{i,t}^b - s_{i,t} - \sum_{k=t-LT_{p_i}-Exp_{-}p_i+1}^{t-LT_{p_i}} x_{i,k}, 0 \right), \quad \forall it \quad [5]$$

$$P_{-}I_{i,t}^e = P_{-}I_{i,t}^b - s_{i,t} - dc_{-}p_{i,t}, \quad \forall it \quad [6]$$

$$y_{j,t} \leq rm_SPLY_{j,t}, \quad \forall jt \quad [7]$$

$$R_{-}I_{jt}^b = R_{-}I_{j,t-1}^e + y_{j,t-LT_{r_j}}, \quad \forall jt \quad [8]$$

$$rm_{s_{j,t}} = \sum_{i=1}^N rm_{i,j} \times x_{i,t}, \quad \forall jt \quad [9]$$

$$rm_{s_{j,t}} \leq R_{j,t}^b, \quad \forall jt \quad [10]$$

$$dc_{r_{j,t}} = \text{Max} \left(R_{j,t}^b - rm_{s_{j,t}} - \sum_{k=t-LT_{r_j}-Exp_{r_j}+1}^{t-LT_{r_j}} y_{j,k}, 0 \right), \forall jt \quad [11]$$

$$R_{j,t}^e = R_{j,t}^b - rm_{s_{j,t}} - dc_{r_{j,t}}, \quad \forall jt \quad [12]$$

$$Rev(i,t) = price_i \times s_{i,t-1} \quad \forall it \quad [13]$$

$$Prod_C(x_{i,t}) = \begin{cases} s_{c_i} + p_{c_i} \times x_{i,t} & \text{if } x_{i,t} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall it \quad [14]$$

$$DP_P(i,t) = 0.5 \times Prod_C(x_{i,t}), \quad \forall it \quad [15]$$

$$RP_P(i,t) = 0.5 \times Prod_C(x_{i,t-LT_{p_i}}), \quad \forall it \quad [16]$$

$$DP_R(j,t) = 0.5 \times r_{c_j} \times y_{j,t}, \quad \forall jt \quad [17]$$

$$RP_R(j,t) = 0.5 \times r_{c_j} \times y_{j,t-LT_{R_j}}, \quad \forall jt \quad [18]$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^M DP_P(i,t) + \sum_{i=k}^M RP_P(k,t) + \sum_{j=1}^N DP_R(j,t) \\ & + \sum_{k=1}^N RP_R(k,t) \leq UB_Cash_Outflow, \quad \forall t \quad [19] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CF(t) = & \sum_{i=1}^M Rev(i,t) - \sum_{i=1}^M DP_P(i,t) - \sum_{i=k}^M RP_P(k,t) \\ & - \sum_{j=1}^N DP_R(j,t) - \sum_{k=1}^N RP_R(k,t), \quad \forall t \quad [20] \end{aligned}$$

$$x_{i,t}, y_{j,t} \geq 0, \quad \forall it, jt \quad [21]$$

Where,

i : 제품을 나타내는 인덱스; $i = 1, 2, ..., M$

j :	원료를 나타내는 인덱스; $j = 1, 2, \dots, N$
$x_{i,t}$:	t 월 초에 생산 착수하는 제품 i 의 수량; 생산 리드타임이 경과된 이후에 제품이 인도된다.
$y_{j,t}$:	t 월 초에 구입 착수하는 원료 j 의 수량; 원료 구입 리드타임이 경과된 이후에 원료가 인도된다.
$Unit_i$:	제품 i 의 생산 로트 크기
P_{it}^b :	t 월초 제품 i 의 재고
P_{it}^e :	t 월말 제품 i 의 재고
R_{jt}^b :	t 월초 원료 j 의 재고
R_{jt}^e :	t 월말 원료 j 의 재고
d_{it} :	제품 i 의 t 월 수요
$rm_SPLY_{j,t}$:	원료 j 의 t 월의 시장 공급량
s_{it} :	제품 i 의 t 월 판매 가능 수량
dc_{pit} :	유통기한 초과로 t 월 말에 폐기되는 제품 i 의 수량
$dc_{r_{jt}}$:	유통기한 초과로 t 월 말에 폐기되는 원료 j 의 수량
LT_{pi} :	제품 i 의 생산 착수에서 인수까지 소요되는 개월 수
LT_{r_j} :	원료 j 의 구매 계약에서 인수까지 소요되는 개월 수
Exp_{pi} :	제품 i 의 유통 개월 수
Exp_{r_j} :	원료 j 의 유통 개월 수

rm_{ij} :	i 번째 제품 1 단위 생산에 필요한 원료 j 의 수량
$rm_{s_{jt}}$:	t 월 초 제품들의 생산 착수에 필요한 원료 j 의 수 량
$price_i$:	제품 i 의 판매 단가
s_{c_i} :	제품 i 의 생산시 발생하는 로트당 주문비(setup cost)
p_{c_i} :	제품 i 의 단위 생산비
r_{c_j} :	원료 j 의 구입 단가
$Prod_C(x_{i,t})$:	제품 i 의 t 월 초 생산량, $x_{i,t}$ 에 소요되는 비용
$Rev(i,t)$:	t 월 초에 입금되는 제품 i 판매금액
$DP_P(i,t)$:	t 월 초에 지불해야 하는 제품 i 의 생산 계약금
$RP_P(i,t)$:	t 월 초에 지불해야 하는 제품 i 의 생산 잔금
$DP_R(j,t)$:	t 월 초에 지불해야 하는 원료 j 의 구매 계약금
$RP_R(j,t)$:	t 월 초에 지불해야 하는 원료 j 의 구매 잔금
$UB_Cash_Outflow$:	월별 지출의 한도액
DR :	월 할인율

$x_{i,t}$ 는 제품 i 가 t 월 초에 생산 착수에 들어가는 수량을 나타내는 변수이다. 제품마다 생산 단위 $Unit_i$ 가 존재한다. 식 [2]는 제품 i 의 t 월 초 생산 착수량은 0 또는 $Unit$ 의 자연수 배수로만 가능함을 나타내고 있다.

제품은 생산 착수 시점부터 인수되기까지 일정 시간이 필요한데, 제품 i 가 생산 착수부터 인수까지 경과되는 시간을 LT_{p_i} 라 하자. 이 경우, t 월 초에 생산 착수에 들어간 제품은 $(t + LT_{p_i})$ 월 초에 인수된다. 제품 i 의 t 월 초 재고는 전월 말 재고와 t 월 초 인수되는 수량의 합이 된다.

식 [3]은 t 월 초 재고는 $t-1$ 월 말 재고에 $(t - LT_{p_i})$ 월 초에 착수한 생산분의 합임을 보여준다. t 월 초 재고, $P_{-I_{it}^b}$ 는 t 월 중 판매할 수 있는 최대 수량이 된다. 제품 i 의 t 월 수요는 $s_{i,t}$ 이며, 식 [4]는 t 월 판매량은 월초 재고와 수요 중 최소값임을 나타낸다. 건강기능식품에는 제품의 유통기한이 존재한다. 본 연구에서는 t 월 말에 유통기한이 만료되는 제품은 t 월 말에 폐기한다고 가정한다. 본 연구에서 먼저 생산된 제품부터 판매된다고 가정한다. t 월말 기준으로 유효기간이 남아 있는 제품들은 $(t - LT_{p_i} - Exp_{p_i} + 1)$ 부터 $(t - LT_{p_i})$ 사이에 생산 착수된 제품들이다. 이들 제품들이 인수된 월은 $(t - Exp_{p_i} + 1)$ 부터 t 까지이며, 이에

해당하는 수량은 $\sum_{k=t-LT_{p_i}-Exp_{p_i}+1}^{t-LT_{p_i}} x_{i,k}$ 인데, 이를 ‘유통기한이 남은 재고’

라 하자. 월초 재고에서 판매 수량을 제한 수량은 $P_{-I_{i,t}^b} - s_{i,t}$ 인데, 이를 ‘판매 후 재고’라 하자. 식 [5]는 ‘판매 후 재고’가 ‘유통기한이 남은 재고’보다 크다면 폐기되는 수량은 ‘판매 후 재고’ - ‘유통기한이 남은 재고’가 되고, ‘판매 후 재고’가 ‘유통기한이 남은 재고’보다 작거나 같다면 모든 ‘판매 후 재고’는 유통기한이 남았음을 의미하므로 폐기되는 수량은 없다. 식 [6]은 월말 재고는 월초 재고에서 월 판매수량과 폐기수량을 제한값임을 나타낸다.

식 [7]부터 [12]까지는 원료에 관한 제약식들이다. 식 [7]은 t 월 초 원료 구입 계약량은 공급 가능 수량을 초과할 수 없음을 나타낸다. 식 [8]은 t 월 초 원료의 재고는 $t-1$ 월 말 재고에 $(t - LT_{r_j})$ 월 초에 착수한 구입분의 합임을 보여준다. t 월 초에 제품 생산에 필요한 자원 j 의 양은

$\sum_{i=1}^M rm_{i,j} \times x_{i,t}$ 이며, 식 [9]는 이 수량이 $rm_{s_{j,t}}$ 로 표기됨을 보여준다.

식 [10]은 t 월 초 제품 생산에 필요한 자원 j 의 수량은 t 월초 원료 j 의

재고보다 클 수 없음을 보여준다. 제품과 마찬가지로 원료들도 유효기간을 가지며, t 월 말에 유통기한이 만료되는 원료는 t 월 말에 폐기된다고 가정한다. 먼저 생산된 제품부터 판매되는 것처럼, 먼저 구입된 원료부터 생산에 투입된다고 가정한다. t 월말 기준으로 유효기간이 남아 있는 원료들은 $(t - LT_{r_j} - Exp_{r_j} + 1)$ 부터 $(t - LT_{r_j})$ 사이에 구입 착수된 원료들이다. 이들 원료들이 인수된 월은 $(t - Exp_{r_j} + 1)$ 부터 t 까지이며,

이에 해당하는 수량은 $\sum_{k=t-LT_{r_j}-Exp_{r_j}+1}^{t-LT_{r_j}} y_{j,k}$ 인데, 이를 ‘유통기한이 남은 원료’라 하자. 월초 원료에서 생산에 소비된 수량을 제한 수량은

$R_{i,t}^b - rm_{s_{j,t}}$ 인데, 이를 ‘소비 후 후 재고’라 하자. 식 [11]는 ‘소비 후 재고’가 ‘유통기한이 남은 원료’보다 크다면 폐기되는 수량은 ‘소비 후 재고’ - ‘유통기한이 남은 원료’가 되고, ‘소비 후 재고’가 ‘유통기한이 남은 원료’보다 작거나 같다면 모든 ‘소비 후 재고’는 유통기한이 남았음을 의미하므로 폐기되는 수량은 없다. 식 [12]는 월말 재고는 월초 재고에서 월 소비수량과 폐기수량을 제한 값임을 나타낸다.

식 [13]부터 식 [16]은 현금 흐름에 관한 제약식들이다. 본 연구에서 제품의 판매금액은 다음 달 초에 입금된다고 가정했다. 식 [13]은 t 월 초에 입금되는 제품 i 의 판매금액($Rev(i,t)$)은 $t-1$ 월에 판매된 제품 i 의 수량에 판매단가를 곱한 값임을 보여준다. 식 [14], [15]과 [16]은 제품 생산비, 계약금과 잔금에 대한 제약식이다. 제품 i 가 t 월 초에 생산 착수하지 않는다면, 제품 생산비용은 발생하지 않는다. 만약 생산 착수에 들어간다면($x_{i,t} > 0$), 제품 생산비용은 고정비용과 변동비용으로 나누어진다. $s_{-}c_i$ 는 주문비(Setup Cost)로서 생산 로트와 무관하게 발생하는 고정비용이다. 생산단가에 생산 로트 크기를 곱한 값, $p_{-}c_i \times x_{i,t}$ 는 변동비용이

다. 식 [14]는 제품 i 가 t 월 초에 수량 $x_{i,t}$ 으로 생산 착수에 들어갈 때의 생산 비용의 합계를 나타낸다. 생산비용의 반은 계약금으로 t 월 초에 지급되고, 나머지 반은 잔금으로 인수되는 시점인 $(t + LT_{p_i})$ 월 초에 지급된다. 지급 시점 중심으로 표현해보자. t 월 초에 지급되는 계약금은 t 월 초에 생산 계약된 제품의 계약금이고, t 월 초에 지급되는 잔금은 $(t - LT_{p_i})$ 월 초에 생산 계약된 제품의 잔금이다. 식 [15]는 t 월 초에 지급해야 하는 제품 i 의 계약금, [16]은 t 월 초에 지급해야 하는 제품 i 의 잔금으로서, 전술한 바와 같이 계약 시점은 $t - LT_{p_i}$ 이고, 인수 시점은 t 이다. 식 [17]과 [18]은 원료 구입비의 계약금과 잔금에 관한 제약식들이다. 원료 j 의 t 월 초 구입 계약물량이 $y_{j,t}$ 라면 구입비 총액은 $r_{-c_j} \times y_{j,t}$ 이 된다. 본 연구는 제품과 마찬가지로 구입비 총액의 50%는 계약 시점에, 나머지 50%는 원료 인수 시점에 지불한다고 가정한다. 식 [17]은 t 월 초에 지불해야 하는 원료 j 의 계약금, $DP_R(j,t)$ 을 나타내고 있다. 식 [18]은 t 월 초에 지불해야 하는 원료 j 의 잔금을 나타내고 있는데, 이 잔금은 $t - LT_{r_j}$ 시점에 계약된 물량에 대한 잔금이며, 이 원료는 t 월 초에 인수된다. t 월에 지출되는 금액은 t 월에 지급해야 하는 제품과 원료의 계약금과 잔금의 합계이다. 식 [19]는 월별 지출의 합계가 미리 설정된 현금 지출의 한도, $UB_Cash_Outflow$ 를 초과할 수 없음을 나타낸다. 식 [20]은 t 월 초의 현금흐름(cash flow)은 t 월 초 판매금의 합계에서 제품과 원료의 계약금과 잔금을 제한 값임을 보여주고 있다. 식 [21]은 제품의 생산량과 원료의 구입량이 비음이어야 함을 나타낸다. DR 은 월 할인율을 의미한다. 본 연구에서 t 는 월을 나타내는 자연수로서 1부터 시작하며, 모든 현금흐름이 월 초에 발생한다고 가정한다. 이 경우 1월 초를 기준으로 현재가치(Present Value)를 구한다면, 현재가치를 구

하기 위한 할인계수(Discount Factor)는 $\frac{1}{(1+DR)^{t-1}}$ 이 된다. 식 [1]은

본 연구의 목적함수가 순현재가치(NPV) 최대화 문제임을 보여준다.

본 연구는 제품의 월별 수요($d_{i,t}$)와 원료의 월별 최대 공급 수량 ($rm_SPLY_{j,t}$)이 확률적인 경우를 다룬다. 그러므로 본 연구는 제품 수요와 원료 구매의 불확실성 하의 NPV 최대화 문제이다.

제 4 장 알고리즘

본 연구는 다품목 제품의 생산 일정과 원료 구매 일정을 다룬다. 제품의 시점별 수요는 확률적이며, 원료의 구매 가능 여부 또한 시점별로 확률적이다. 본 연구의 모형에서 목적함수는 순현재가치(NPV) 최대화이다. 제품의 수요량과 원료 구매 가능 여부가 사전에 알려져 있다면 최적의 생산 및 구매 일정이 존재하지만, 수요와 원료 구매에 불확실성이 있는 경우에는 최적의 일정이 존재할 수 없다. 예를 들어, 6개월 동안의 수요를 대비해서 제품을 1,000개 생산한다고 하자. 만약 수요가 1,000개라면 모든 수요를 충족하고 불필요한 재고는 하나도 없게 된다. 그렇지만 수요가 300개라면 불필요한 재고가 700개 생기고, 수요가 1,900개라면 재고 부족으로 900개의 제품 판매 기회를 상실하게 된다. 다시 말해, 제품 생산의 적절성 정도는 생산 이후에 발생하는 수요에 따라 결정된다. 원료의 구입에도 동일한 문제가 발생한다. 제품 생산에 필요한 원료가 충분히 준비되어 있지 않다면, 필요한 수량의 제품을 만들 수 없다. 이때 원료를 주문하려 해도 원료 품질 사태로 인해 원료 수급 자체가 어려울 수 있다. 이런 상황을 피하기 위해 원료를 충분히 준비할 수도 있다. 그렇지만 계획이 변경되어 제품 생산량이 축소된다면, 원료의 재고가 쌓이게 되고 재고 상태로 일정 시간이 흐르면 원료 유효기간이 경과하여 원료는 사용하지도 못하고 폐기될 수도 있다.

본 연구에서는 제품의 수요와 원료의 품질이 확률적인 경우를 다룬다. 제품의 월별 수요 예측치와 원료의 품질 확률이 주어졌다고 가정한다. 본 연구의 목적은 제품 수요와 원료 공급의 불확실성 하에 제품 생산과 원료 구입의 합리적인 규칙을 탐색하는 데 있다. 규칙 탐색을 위해 아래의 두 모듈을 개발한다.

모듈 1. 제품 수요와 원료 공급량의 시나리오

모듈 2. 규칙 개발과 시나리오에 적용, 그리고 평가

제품 수요와 원료 구입에 불확실성이 없다면, 제품 생산과 원료 구입의 규칙에 따른 NPV는 오직 하나만 존재한다. 제품 수요와 원료 구입에 불확실성이 있는 경우는 동일한 규칙을 적용해도 제품 수요와 원료 품질이 어떻게 발생하느냐에 따라 NPV가 달라진다. 그러므로 제안하는 규칙을 평가하고 개선하기 위해서는 제품 수요/원료 공급 시나리오가 다수 필요하다.

모듈 1. 제품 수요와 원료 공급량의 시나리오

장기간에 걸친 제품의 월별 수요는 성장률, 계절적 요인, 기념일 효과 등으로 설명되는 부분들과 위의 요인으로 설명되지 않는 부분으로 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서는 제품 수요의 성장률, 계절적 요인, 기념일 효과 등을 수요의 모수(Parameter)라 하고, 설명되지 않는 부분을 오차(Error)라 부른다. 본 논문에서는 오차의 확률분포가 알려져 있다고 가정하자. 제품별 수요의 모수와 오차의 확률분포를 특정했으므로, T 개월 동안의 월별 제품 수요를 생성할 수 있다.

건강기능식품의 주원료는 생약 성분이어서, 원료가 품질되는 경우가 가끔 발생한다. 원료 재고가 충분치 못하고 시장에서 원료를 구입할 수도 없으면, 그 원료를 주성분으로 하는 제품은 원료를 구할 때까지 생산할 수 없게 된다. 경험 축적을 통해 원료가 품질될 확률을 사전에 알고 있다고 가정한다. 품질이 아닌 경우 회사가 필요한 양에 비해 시장의 공급량은 매우 크고, 품질인 경우 시장의 공급량은 0이다. 그러므로 정상적

으로 원료가 공급되는 달의 시장 공급량은 ∞ 으로, 품절인 달의 시장 공급량은 0으로 표기할 수 있다. 품절이 발생할 확률을 알고 있으므로, T 개월 동안의 월별 시장 공급량을 생성할 수 있다.

본 연구에서는 위와 같은 방법으로 생성된 제품 수요와 원료 공급량을 시나리오라 부른다. [표 4-1], [표 4-2], [표 4-3]은 제품 10개 수요와 원료 5개의 공급량에 대한 3개의 시나리오의 예시이다. (첫 7개월간의 월별 데이터만 출력되었다.)

[표 4-1] 시나리오 1의 월별 제품 수요와 원료 공급량

		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월
제품	1	12.59	17.22	23.67	21.78	26.51	25.30	23.63
	2	48.18	50.17	76.39	83.42	86.85	111.13	137.70
	3	9.59	36.57	40.18	52.46	45.45	36.56	41.05
	4	71.11	57.56	55.10	64.34	92.47	125.25	113.58
	5	22.23	21.94	25.58	19.73	17.27	13.06	13.02
	6	51.42	25.35	47.81	30.05	17.95	65.23	48.43
	7	28.07	27.09	22.97	30.10	23.57	28.52	23.18
	8	39.66	47.25	36.14	45.91	40.87	33.38	26.79
	9	118.36	139.33	142.39	139.54	98.73	127.74	82.49
	10	88.36	65.66	51.65	22.77	44.46	48.88	46.90
원료	1	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	2	100,000	100,000	0	100,000	100,000	100,000	100,000
	3	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	4	100,000	100,000	100,000	100,000	0	100,000	100,000
	5	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

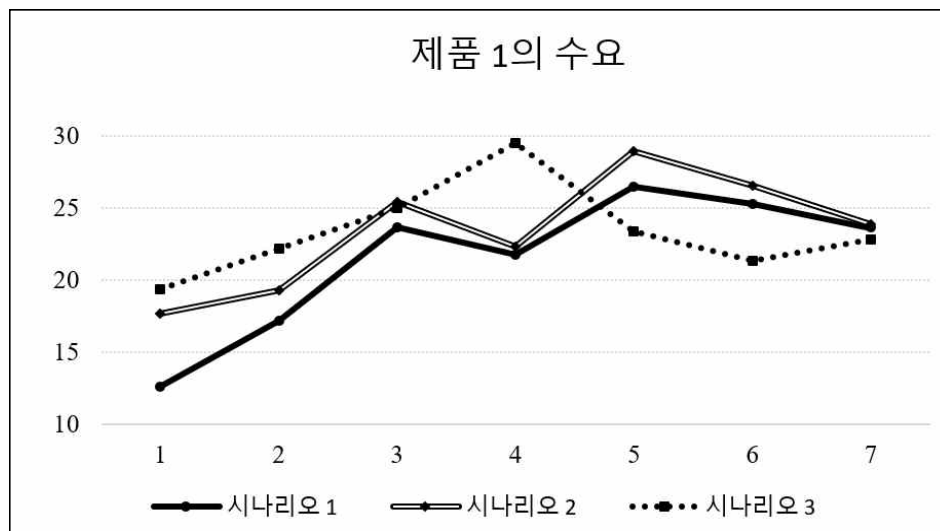
[표 4-2] 시나리오 2의 월별 제품 수요와 원료 공급량

		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월
제품	1	17.70	19.32	25.42	22.35	28.92	26.58	23.85
	2	62.39	33.37	55.54	85.73	96.22	120.26	128.38
	3	28.28	33.35	48.64	43.68	60.43	60.47	40.86
	4	54.63	44.28	44.13	76.71	84.40	122.44	130.65
	5	15.76	19.07	19.70	14.51	15.46	13.45	9.17
	6	65.84	26.08	42.17	32.47	27.00	48.67	67.66
	7	24.69	27.56	29.81	26.73	30.02	30.43	22.75
	8	35.23	39.82	35.60	40.17	34.87	37.34	22.21
	9	120.05	177.68	132.48	146.69	98.94	115.95	77.22
	10	81.38	71.14	54.25	31.02	43.83	47.27	60.43
원료	1	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	2	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	3	100,000	0	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	4	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	5	100,000	100,000	100,000	100,000	0	100,000	100,000

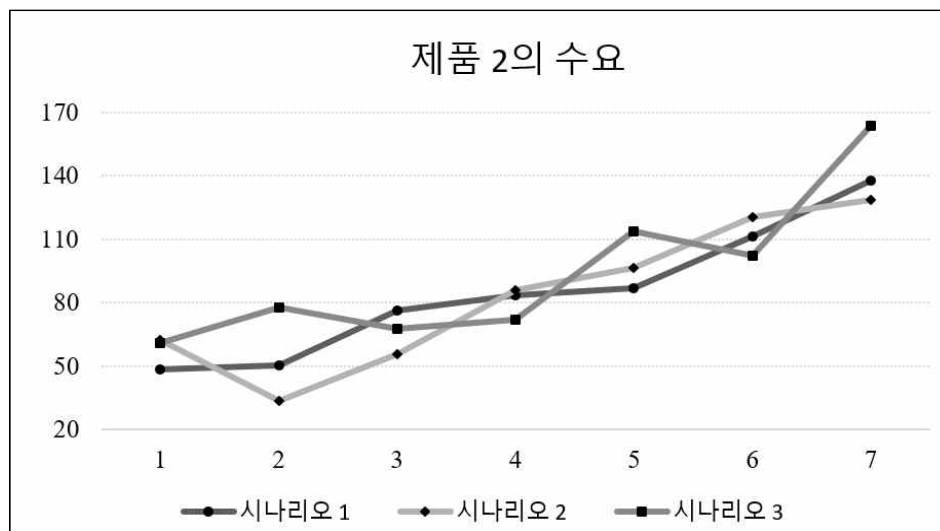
[표 4-3] 시나리오 3의 월별 제품 수요와 원료 공급량

		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월
제품	1	19.38	22.20	24.99	29.49	23.37	21.32	22.80
	2	60.91	77.87	67.52	72.09	113.73	102.08	163.60
	3	35.99	31.46	25.68	46.77	56.92	38.70	62.59
	4	56.38	54.09	57.21	82.84	81.58	104.36	121.09
	5	17.89	20.99	16.72	18.55	16.75	13.00	13.10
	6	36.01	34.07	33.05	22.40	36.19	47.73	56.87
	7	20.68	28.76	25.08	28.71	28.32	26.35	21.18
	8	41.07	35.92	46.92	42.84	45.70	32.08	29.43
	9	157.25	160.68	167.47	132.22	111.67	137.51	132.10
	10	71.12	56.10	53.04	47.02	49.80	30.58	50.40
원료	1	100,000	-	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	2	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	3	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	-	100,000
	4	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
	5	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

시나리오별로 제품 수요와 원료 공급량은 달리 생성된다. [그림 4-1]은 제품 1의 시나리오별 수요를, [그림 4-2]는 제품 2의 시나리오별 수요를 보여준다.



[그림 4-1] 제품 1의 시나리오별 수요



[그림 4-2] 제품 2의 시나리오별 수요

예시로서 3개의 시나리오가 제시되었지만, 시나리오의 수가 많을수록 제품 수요의 확률분포에 가까워지므로 충분히 많은 수의 시나리오가 생성되어야 한다.

모듈 2. 규칙 개발과 시나리오에 적용, 그리고 평가

본 연구에서 다루는 문제는 다기간의 의사결정문제이다. 구체적으로 본 연구는 해당 월의 초에 그 월의 제품 생산량과 원료 구매량을 결정하는 문제이다. 문제의 기간이 T 개월이라면, 총 T 번의 의사결정이 순차적으로 이루어진다. 이런 측면에서 본 문제는 T 단계 문제라 할 수 있다.

현 시점을 t 라 하자. t 월의 제품 생산량의 의사결정은 t 월 이후의 제품 예측 수요량과 제품의 재고량에 따라 이루어지며, t 월의 원료 구매량은 t 월 이후의 원료 수요량과 원료 재고량에 의해 결정된다. 만약 T 월 동안의 제품 수요량과 원료 품질 여부가 사전에 알려져 있다면, 최초의 시점에 1월부터 T 월까지의 월별 제품 생산량과 원료 구매량을 한 번에 작성할 수 있다. 미래 시점의 제품 수요량과 원료 품질 여부가 사전에 확정된 값이 아니라면 미래 시점의 제품 생산량과 원료 구매량은 실제 제품 수요량과 원료 품질 여부에 따라 수정되어야 한다. 정리하면, 미래 제품 수요와 원료 품질 여부를 예측하여 제품 생산과 원료 구매 계획을 수립하고, 일정 시간이 경과할 때마다 실제 수요와 품질 여부를 반영하여 계획을 재수립하여야 한다. 이와 같은 프로세스는 일정 주기로 반복된다.

본 연구는 1개월마다 제품의 수요와 원료 품질 상태가 확정되는 경우를 다룬다. 그러므로 제품의 생산과 원료 구입의 시간 단위는 1개월이다.

본 연구는 T 개월 동안의 월별 제품의 생산량과 원료의 구입량을 결정하는 문제를 다룬다. 생산과 구입에 관한 의사결정 규칙의 우수성은 NPV로 결정되며, NPV는 T 개월 동안의 제품의 수요와 원료의 품질 여

부에 따라 결정된다. 제품의 수요량과 원료의 품질 여부는 확률적으로만 존재하므로, 실제 발생할 수 있는 수요량/품질 여부의 경우의 수는 매우 크다. 수요량/품질 여부에 따라 NPV가 확정되므로, 의사결정 규칙에 따른 NPV는 하나의 값이 아니라 확률분포를 이루게 된다.

T 개월 동안의 제품의 월별 수요량과 원료의 품질 여부를 시나리오라 하자. 시나리오 별로 T 개월 동안의 제품 생산과 원료의 구입에 관한 의사결정 규칙은 아래와 같은 절차로 적용된다.

시나리오 진행 서브루틴

Step 1. 초기화 - 전체 일정 작성

1월부터 T 월까지의 제품 수요 예측치와 원료 품질 확률을 고려하여 1월부터 T 월까지의 제품 생산 일정과 원료 구매 일정을 작성한다.

$t = 0$. Goto Step 2.

Step 2. 가상의 시간 진행과 잔여 일정 재작성 $t = t + 1$

2.1 $t = t + 1$ (시간을 1개월 경과)

만약 $t > T$ 면, Goto Step 3.

2.2 $(t-1)$ 월의 제품 수요와 원료 품질 여부 확정

$(t-1)$ 월의 제품 수요와 원료 품질 여부를 시나리오의 $(t-1)$ 월 값으로 확정한다. 이때 $(t-1)$ 월의 제품 판매량이 확정되며 이에 따라 $(t-1)$ 월의 폐기량과 월말 재고가 확정된다. 특정 원료가 품질되었으면 $(t-1)$ 월에 체결된 그 원료의 구매 계약이 취소된다.

2.3 t 월부터의 잔여 일정 Update

2.2에서의 변경분을 고려하여 t 월부터 T 월까지의 일정을 재

작성한다. Goto Step 2.

Step 3. NPV 계산 및 종료

$t = 1$ 부터 T 까지의 현금 흐름으로부터 NPV를 확정한다. 종료한다.

하나의 시나리오가 진행될 때마다 산출물로 그 시나리오의 NPV가 도출된다. 규칙 A에 100개의 시나리오를 적용하면, 100개의 NPV가 도출된다. 다른 규칙 B에 동일한 시나리오들을 적용하면, 또 다른 100개의 NPV가 산출된다. 산출된 두 NPV 분포를 비교하여 어떤 규칙이 더 우수한지를 판단할 수 있다.

4.1 하위 문제들의 정의와 도출

본 연구는 3.3 문제의 수식화를 정의한 문제로, 두 종류의 확률변수가 존재한다. 하나는 제품의 월별 수요, $d_{i,t}$ 이고 다른 하나는 원료의 월별 시장 공급량, $rm_SPLY_{j,t}$ 이다. 본 연구는 제품의 월별 수요의 예측치와 원료의 월별 품질 확률이 주어진 경우를 다루고 있다.

4.1.1 확정적 문제 [DP]의 정의와 도출

3.3 문제의 수식화에서 정의된 문제를 $[P]$, 두 확률변수들을 상수로 대체한 문제를 $[DP]$ 라 하자. 즉 $[P]$ 는 확률적 문제(Stochastic Problem)이지만, $[DP]$ 는 확정적 문제(Deterministic Problem)이 된다.

$[DP]$ 는 다음과 같은 방식으로 확정한다.

(1) 확률변수 $d_{i,t}$ 는 예측치 $ed_{i,t}$ 로 대체한다.

예로서, 제품 1의 3월 수요는 평균이 50, 표준편차가 3인 정규분포를 따른다고 하자. 이때 3월 수요의 기댓값은 50이다. 이 경우,

$ed_{1,3} = 50$ 이다. 그런데 제품 품질로 인한 손실이 제품 재고 부담보다 크다면, 제품의 안전재고(Safety Stock)를 모형에 반영할 수도 있다.

- (2) 확률변수 $rm_SPLY_{j,t}$ 는 품질이면 0, 아니면 매우 큰 값이다. 품질 확률이 비교적 낮은 경우, 시장 공급량의 기댓값은 품질 가능성을 제대로 반영하기 어렵다. 예를 들어, 원료 2의 1회 주문량은 적으면 200, 아주 많으면 1,000이라 하자. 품질이 아닌 경우, 원료 2의 시장공급량은 5만이고, 7월 품질 가능성은 0.02라 하자. 이 경우, 원료 2의 7월 공급량의 기댓값은 $50,000 \times (1-0.02) + 0 \times 0.02 = 49,000$ 이 된다. 주문량이 최대 1,000인 점을 고려하면, 원료 공급량의 기댓값은 품질의 가능성을 전혀 반영하지 못한다. 이 경우도 품질 대비의 목적으로 원료의 안전재고를 모형에 반영할 수 있다.

정리하면, $[P]$ 의 제품 수요와 원료 공급의 불확실성을 아래와 같이 예측치와 안전재고로 대체하여 $[DP]$ 을 도출한다. 제품 i 의 t 월말 안전재고는 $P_Safety_{i,t}$, 원료 j 의 t 월말 안전재고는 $R_Safety_{j,t}$ 라 하자.

- (1) $d_{i,t}$ 는 예측치 $ed_{i,t}$ 로 대체
- (2) $rm_SPLY_{j,t}$ 는 $erm_SPLY_{j,t}$ 로 대체 (여기서 $erm_SPLY_{j,t} = \infty$)
- (3) 제품의 안전재고 제약조건 추가: $P_I_{it}^e \geq P_Safety_{i,t}$
- (4) 원료의 안전재고 제약조건 추가: $R_I_{j,t}^e \geq R_Safety_{j,t}$

$ed_{i,t}$ 는 주어진 값이지만, 안전재고량 $P_Safety_{i,t}$ 와 $R_Safety_{j,t}$ 는 의사결정자가 정해야 하는 값들이다. 그러므로, $[DP]$ 는 안전재고량 또는 안전재고 수준에 따라 상당히 다른 문제가 된다. 예를 들어 안전재고수준을

낮추면 재고부담은 감소하지만 품질 확률이 증가하고, 안전재고수준을 높이면 품질 확률은 감소하지만 재고부담은 증가한다.

4.1.2 t 월별 문제 $[DP^t]$ 의 정의와 도출

$[DP]$ 의 분석기간은 $t = 1$ 부터 T 까지다. 본 알고리즘에서 가상의 시간은 $t = 1$ 로 시작하여 $t = T$ 가 될 때까지 t 를 1개월씩 증가시켜 본다. 매 시점마다 잔여 기간에 대한 제품 생산과 원료 구입에 대한 일정을 재작성한다. 예를 들어, $t = 1$ 이라면 잔여 기간은 1부터 T 까지며, $t = 3$ 이라면 잔여 기간은 3부터 T 가 된다. 잔여 기간에 따라 문제가 달라지므로, $[DP^t]$ 는 잔여기간인 t 부터 T 까지인 $[DP]$ 라 하자.

$[DP^1]$ 은 잔여기간이 1부터 T 까지이므로, $[DP]$ 와 동일한 문제이다. 현재 시점은 1개월이 진행되어 $t(t > 1)$ 월 초라 하자.

4.1.2.1 추정계수 갱신

경과된 1개월 간 영향을 받는 예상 계수들은 $ed_{i,t-1}$ 와 $erm_SPLY_{j,t-1}$ 이다. 이들 값들을 시나리오의 값들로 대체한다. 시나리오에 이미 결정되어 있는 값들을 실제(actual) 값 $ad_{i,t-1}$, $arm_SPLY_{j,t-1}$ 이라 하자. 다시 말해 $(t-1)$ 월의 제품별 수요와 원료별 시장 공급량은 추정치에서 확정된 실제값이 된다.

- (1) $ed_{i,t-1}$ 는 $ad_{i,t-1}$ 로 대체
- (2) $erm_SPLY_{j,t-1}$ 는 $arm_SPLY_{j,t-1}$ 로 대체; $erm_SPLY_{j,t-1}$ 는 ∞ 이고, $arm_SPLY_{j,t-1}$ 는 품질 상황이면 0, 아니면 ∞ 의 값을 갖는다.

4.1.2.2 의사결정변수 보정

($t-1$)월의 의사결정변수는 $x_{i,t-1}$ 과 $y_{j,t-1}$ 이다. 원료 구입의 착수를 의미하는 $y_{j,t-1}$ 의 경우, j 번째 원료가 $t-1$ 월에 품질되면 원료 구입 계약은 취소되어야 한다. 예로서 $y_{3,5} = 500$ 이라 하자. $rm_SPLY_{3,5} = \infty$ 이면 $y_{3,5} = 500$ 으로 확정, 품질로 $rm_SPLY_{3,5} = 0$ 이면 $y_{3,5} = 0$ 으로 수정되어야 한다. i 번째 제품의 착수를 의미하는 $x_{i,t-1}$ 의 경우는 이미 확보된 원료들을 대상으로 제품 생산 착수에 들어가므로 $x_{i,t-1}$ 의 값은 그대로 확정된다.

(1) $x_{i,t-1}$ 은 그대로 확정

(2) $y_{j,t-1}$ 는 다음과 같이 보정한다.

If $rm_SPLY_{3,5} = \infty$, $y_{j,t-1}$ 은 그대로 확정

Else (품질) $y_{j,t-1} = 0$ 으로 수정

4.1.2.3 종속변수 보정

($t-1$)월의 예상 추정치들과 의사결정변수 값이 변함에 따라 재고, 판매 가능 수량 등의 종속변수들의 값을 보정해야 한다.

4.2 [DP^t]의 해법

DP^t 는 기간 t 부터 T 까지의 기간을 대상으로 $x_{i,t}$ 와 $y_{j,t}$ 를 결정하는 문제이다. 본 연구에서는 휴리스틱 알고리즘을 개발하여 [DP^t]의 해를 구한다.

4.2.1 $[DP^t]$ 의 휴리스틱 알고리즘의 약속

본 연구에서 $[DP^t]$ 의 휴리스틱 알고리즘은 아래와 같이 약속될 수 있다.

- (1) 최초의 초기해 생성, Goto 2
- (2) 개선규칙을 사용하여 현재 해의 반복 개선
 - 더 이상 개선되지 않으면, Goto 3
- (3) 새로운 초기해의 생성, Goto 2

위의 모듈은 미리 설정한 시간이 경과될 때까지 반복된다.

4.2.1.1 최초의 초기해 생성

Step 1.

If $t = 2$ 라면,

If $t = 1$ 에서 원료 품질 발생하지 않았으면,

최초의 $[DP^{t-1}]$ 에서의 x 와 y 를 초기해로 한다. 종료한다.

Else $\{t = 1$ 에서 원료 품질 발생 $\}$ $t = 1$ 에서 원료의 품질이

발생하였고, 품질로 인해 생산에 원료 부족이 발생한 제품은 가용한 원료 수준에 맞춰 생산량을 줄인다.

{예로서, $x_{i,\tau} = 1,500$, $Unit_i = 500$, 현 원료 재고에서 최대 생산수량 = 1,150이면, $x_{i,\tau} = 1,000$ 으로 한다.}

Else ($t = 1$) 모든 x 와 y 를 0으로 한다. Goto Step 2.

Step 2. 제품별로 $\tau = t$ 부터 T 개월까지

- (1) 품질 수량을 계산한다.

$$\text{Max}(ed_{i,t} - P_{i,t}^b, 0)$$

품질수량 > 0이면, Goto 2, 아니면 다음 τ 로 진행

(2) τ 월 생산 착수 필요 수량 = $\tau + LT_{p_i}$ 월 품질 수량

{ τ 월 생산에 착수하면, $\tau + LT_{p_i}$ 에 인수}

$temp_x = \tau$ 월 생산 착수 필요 수량

$Unit_i$ 단위로 생산량을 구한다.

$$temp_x = \text{int}(temp_x / Unit_i) + 1$$

{생산단위가 500이고 필요한 수량이 1,250이면, $3 \times Unit_i$ 만큼 생산해야 한다.}

{현 $temp_x$ 는 원료 재고와 현금 지출 제한을 고려하지 않은 생산량이다.}

(3) τ 월 초에 생산착수 수량 $x_{i,\tau} = temp_x$ 로 하여 현금 흐름과 원료 재고를 Update한다.

If 현금흐름과 원료 재고의 제약조건을 충족하면, $x_{i,r}$ 을

$temp_x$ 로 확정하고, 관련 계수들을 Update한다. 다

음 τ 로 진행한다.

ElseIf 현금 흐름에는 문제가 없고 원료 재고만 부족하면, 해당

원료들을 $\tau - LP_{r_j}$ 개월 초에 구입한다. 가능하면

($\tau - LP_{r_j}$ 이 t 이고, 이 시점의 현금 흐름에도 문제없으

면), 해당 원료들의 시점 $\tau - LT_{r_j}$ 에서의 구입량을 현 부

족분으로 결정하고, 관련 계수들을 Update한다. 하나의 원

료라도 필요한 수량만큼 확보하는 것이 불가능하면, Goto

(4)

Else {현금 지출 제약 조건에 위배되면}, Goto (4)

(4) 생산수량 $temp_x$ 를 $Unit_i$ 만큼 줄어본다.

$$temp_x = temp_x - Unit_i$$

If $temp_x > 0$, Goto (3)

Else $x_{i,\tau} = 0$, 다음 번 τ 로 진행한다.

$t > 1$ 인 $[DP^t]$ 의 경우, $[DP^{t-1}]$ 의 의사결정을 최대한 반영하여 초기해를 작성한다. $(t-1)$ 월에 확정된 실제 수요는 시점 t 이후의 x 와 y 의 실행가능성(생산에는 필요한 원료 준비 여부와 그리고 기간별 현금 지출의 합계에 대한 제한)에는 어떤 영향도 끼치지 않는다. 그러므로 $(t-1)$ 월에 원료 품절이 발생하지 않은 경우, $[DP^{t-1}]$ 에서 결정된 t 이후의 x 와 y 로 $[DP^t]$ 를 삼는다면, 이 해(solution)는 실행가능한 해이다.

$(t-1)$ 월의 원료 품절은 시점 t 이후의 x 에 영향(원료 부족으로 생산 불가 또는 축소)을 끼칠 수도 있다. 품절이 발생한 경우, 생산량을 원료 재고 수준에 맞춰 감소시켰으므로 위와 같이 조정된 x 와 y 는 실행가능한 해이다.

4.2.1.2 해의 개선규칙

본 논문에서 소개하는 해의 개선 규칙들은 이웃탐색(Neighbor Search) 휴리스틱이면서 동시에 그리디(Greedy) 휴리스틱이다. 의사결정변수인 제품 전체의 생산 계획이나 원료 전체의 구매 계획을 전면적으로 수정하는 것이 아니라 부분 계획의 수정을 시도한다는 점에서 이웃탐색 휴리스틱에 속하며, 시도한 결과 해가 개선될 때만 해를 수정한다는 점에서 그리디 휴리스틱에 속한다.

(1) 개선규칙 1. 제품 i 품절시, x 증산

제품 i 가 τ 개월 초에 품질이 발생한다고 하자. τ 월의 품질을 감소시킬 수 있는 가장 늦은 생산 착수 월은 $\tau-LT_{p_i}$ 이며, 가장 빠른 생산 착수 월은 $\text{Max}(t, \tau-LT_{p_i} - \text{Exp}_{p_i}+1)$ 이다. 예를 들어 품질 발생 = 12월, 생산 리드타임 = 2개월, 유통기한 = 6개월, $t = 1$ 월이라 하자. 10월 초에 생산 착수하면 12월 초에 제품이 인수되지만, 11월 초 생산 착수분은 12월 초까지 인수되지 못한다. 그러므로 12월의 품질을 감소시킬 수 있는 가장 늦은 생산 착수 월은 $\tau-LT_{p_i}$ 이다. 1월에 생산 착수분은 3월에 인수되지만, $3+6-1=8$ 월 말까지만 유통 가능하며 $3+6=9$ 월 초에는 유통기한이 초과된다. 그러므로 12월 초의 품질을 감소시킬 수 있는 최초의 생산 착수 월은 $=\text{Max}(1, 12-2-6+1=4) = 5$ 월이다. (5월 초 생산 착수하면 7월 초 제품 인수, 12월 말까지 유통 가능하다.)

From $k = \tau-LT_{p_i}$ to $\text{Max}(\tau-LT_{p_i} - \text{Exp}_{p_i}+1)$ Step -1

- (1) k 월 $Unit_i$ 만큼 생산계약분을 증가시킬 수 있고
- (2) (1)의 변경이 목적함수값을 개선시킨다.

(1)과 (2)를 충족하는 k 가 존재하면,

$$x_{i,k} = x_{i,k} + Unit_i$$

(원료 추가 구매가 필요하면, y 값들도 따라 변경한다.)

k 월에 $Unit_i$ 만큼 x 를 증가시킬 때의 변화는 다음과 같다.

- (a) k 월(생산 착수월)과 LP_{p_i} 월(제품 인수월)에 현금 지출이 증가한다.

If 현 $x_{i,k} = 0$ 이면, $0.5 \times (s_{-c_i} + p_{-c_i} \times Unit_i)$

Else (현 $x_{i,k} > 0$ 이면), $(0.5 \times p_{-c_i} \times Unit_i)$

(b) 원료 j 가 제품 i 에 필요 원료면 ($rm_{ij} > 0$)

k 월에 제품 i 증산에 필요한 j 의 수량 = $rm_{i,j} \times Unit_i$

현재 k 월에 가용한 j 재고 = $R_{i,t}^b - rm_{s_{j,k}}$

k 월까지 추가 인수되어야 할 j 의 수량, $Add_{j,k}$

= $\text{Max}(0, rm_{i,j} \times Unit_i - (R_{i,t}^b - rm_{s_{j,k}}))$

If $Add_{j,k} > 0$ (추가 구매해야함 한다면)

구매 착수해도 k 월 초까지는 인수되고, 유통기한에도 지장이 없으며, 현 t 이상인 월은 아래 기간이다.

$(k - LT_{r_j})$ 부터 $(\text{Max}(t, \tau - LT_{p_i} - Exp_{p_i}))$ 월

$(k - LT_{r_j})$ 에 구매 계약하면, k 월 초에 인수된다.

가상 시간이 현재 t 이므로, 가상 시점보다 이전 시점에서
는 구매 계약 불가(t 보다 이전 월 계약 불가)

$(k - LT_{p_i} - Exp_{p_i})$ 보다 이전에 구매 계약하면, 유효기간이 남지 않는다. ($(k - LT_{p_i} - Exp_{p_i})$ 이전 월에 계약 불가)

그러므로 구매 계약일은 t 와 $(\tau - LT_{p_i} - Exp_{p_i})$ 중
Max 보다 앞 설 수 없다.

이 기간에 속한 특정 월에 $Add_{j,k}$ 만큼 구매한다고 하자.

이때 발생하는 현금 지출은 다음과 같다.

l 월에 $0.5 \times r_{-c_j} \times Add_{j,k}$ (계약금)

$(l + LT_{r_j})$ 월에 $0.5 \times r_{c_j} \times Add_{j,k}$ (잔금)

$x_{i,k}$ 값을 $Unit_i$ 만큼 증가시킬 수 있다면, k 이후의 모든 월에 대해 제품 i 와 관련된 종속 변수들(LP , dc_p 등)은 모두 개정되어야 하며, 이에 따른 Cash Outflow도 재계산되어야 한다. 계산 결과, 목적함수값이 개선된다면 $x_{i,k} = x_{i,k} + Unit_i$, 제품 i 생산에 필요한 원료 중 $Add_{j,k} > 0$ 인 원료는 위의 조건을 충족하는 l 월에 추가 구매한다. $y_{j,l} = y_{j,l} + Add_{j,k}$

(2) 개선규칙 2. 제품 i 감산

$x_{i,\tau} > 0$ 이고 $\tau \geq t$ 이고, $x_{i,\tau}$ 를 $Unit_i$ 만큼 줄여본다. 감산하는 경우, 현금 지출이 감소하므로, 현금 지출에 대한 제약조건은 모두 충족된다. $x_{i,r}$ 을 감소시키면, 제품 i 를 생산하는데 소요된 원료들이 $rm_{i,j} \times Unit_i$ 만큼 덜 필요하고, 그만큼씩 원료들의 구매량도 취소시킬 수 있다. 제품 i 의 τ 월의 생산량을 $Unit_i$ 만큼 감소시키고 이에 따른 원료들의 구매량도 감소시켜 본다. 감산시 목적함수값이 개선된다면, $x_{i,\tau} = x_{i,\tau} - Unit_i$ 로 하고 감산에 따른 자원들의 구매량도 취소시킨다.

(3) 개선규칙 3. 생산을 조기 착수

$x_{i,\tau} > 0$ 이라 하자. 제품 생산 계약월은 τ 이고, 제품 인수월은 $\tau + LT_{p_i}$ 이다. 제품 인수월 이전에 품질이 발생한다면, 제품의 계약월을 당겨 본다. k ($< \tau$) 보다 이전에 생산 계약하는 것이 가능하고 목적함수를 개선한다면, τ 월의 생산 계약분만큼 k 월에 증산하고 τ 월의 생산 계획을 취소한다. $x_{i,k} = x_{i,k} + x_{i,\tau}$, $x_{i,\tau} = 0$

k 월에 증산할 때의 Cash Outflow와 필요한 자원의 구매에 관한 사항은

개선규칙 (1)과 동일하다. τ 월에 생산 계획된 물량이 취소되면, τ 월의 잔금과 $(\tau - LT_{p_i})$ 월의 계약금은 각각 $0.5 \times (s_{-c_i} + p_{-c_i} \times x_{i,r})$ ($x_{i,r}$ 은 취소된 수량이다.)이며, $x_{i,r}$ 에 투입된 원료들은 구매 취소되어야 하며, 이때 관련 구매비용들도 취소되어야 한다.

(4) 개선규칙 4. 생산을 지연

개선규칙 4는 개선규칙 3의 역이다. 유통기한이 경과하여 제품의 폐기가 발생하는 경우에 적극 검토할 수 있다.

$x_{i,\tau} > 0$ 이고, $(\tau + LT_{p_i})$ 월부터 k 개월간 재고가 $(x_{i,\tau} + P_{Safety_{i,t}})$ 이상이면, $x_{i,r}$ 의 생산 물량을 월 $r+1, r+2, \dots, r+k$ 월 중의 월로 이월시킨다. 예를 들어, $l \in \{r+1, r+2, \dots, r+k\}$ 이면, $x_{i,l} = x_{i,l} + x_{i,r}$, $x_{i,r} = 0$ 으로 해본다. 이러한 제품 i 의 생산 계획 변경과 이에 따른 원료들의 구매 계획 변경까지 모두 감안했을 때 이러한 계획 변경이 가능하고 목적함수값이 개선된다면, $x_{i,l} = x_{i,l} + x_{i,r}$, $x_{i,r} = 0$ 으로 하고 관련된 원료들의 구매 계획도 변경한다.

(5) 개선규칙 5. 생산량 분할

$x_{i,\tau}$ 의 생산량이 $2 \times Unit_i$ 이상이고, 생산 계획이 없는 τ 이후의 월 l 이 있다고 하자. ($l > \tau$, $x_{i,\tau} = 0$) $x_{i,\tau}$ 을 $Unit_i$ 만큼 감소시키고 $x_{i,l}$ 의 생산계획량을 $Unit_i$ 로 할 때 현금 지출의 제약조건을 충족하고, 필요한 원료들을 모두 준비할 수 있으며, 목적함수값이 개선된다고 하자. 이 경우 $x_{i,\tau} = x_{i,\tau} - Unit_i$, $x_{i,l} = Unit_i$ 로 하고, 생산 계획 변경에 따른 원료들의 구입 계획도 따라 변경한다.

(6) 개선규칙 6. 생산량 통합

개선규칙 5의 역이다. 두 인접한 생산 계약월 τ 와 l 이 있다고 하자. ($\tau < l$, $x_{i,r} > 0$, $x_{i,l} > 0$) $x_{i,l}$ 의 수량을 $x_{i,\tau}$ 에 포함시켜 본다. ($x_{i,r} = x_{i,r} + x_{i,l}$, $x_{i,l} = 0$) 이러한 제품 i 의 생산 계획 변경과 이에 따른 원료 구입 계획이 현금 지출 제약 조건에 위배되지 않고, 필요한 원료들을 모두 준비할 수 있으며, 목적함수값이 개선된다고 하자. 이 경우, $x_{i,r} = x_{i,r} + x_{i,l}$, $x_{i,l} = 0$ 로 하고, 생산 계획 변경에 따른 원료들의 구입 계획도 따라 변경한다.

4.2.1.3 새로운 초기해 생성

위에서 언급한 개선규칙들이 더이상 개선된 해를 찾는데 실패하면, 기존의 해에서 양수의 $x_{i,t}$ 중 일부를 0으로 만들어, 새로운 초기해를 생성한다. 여기서, 기존의 생산 또는 구입 계획을 취소할 확률을 c_p 라 하자. c_p 와 난수를 사용하여 기존의 해로부터 새로운 해를 생성하는 알고리즘은 아래와 같다.

c_p 의 값이 주어졌다고 하자. 여기서, $Rand$ 는 0~1 사이의 난수(Random Number)이다.

```
From  $\tau = t$  To  $T$ 
    From  $i = 1$  to  $M$ 
        If  $x_{i,\tau} > 0$  And  $Rand < c\_p$ ,  $x_{i,\tau} = 0$ 
    Next
Next
```

기존의 생산 일정을 부분적으로 취소하여, 새로운 초기해를 완성한다.
여기서 생성된 초기해는 다음 모듈의 개선규칙을 통해 보다 나은 일정으로 발전하게 된다.

제 5 장 모의실험

본 연구에 제시된 알고리즘 모형의 우수성과 효율성을 검증하기 위해 모의실험을 하였다.

본 연구는 제품 수요와 원료 공급에 불확실성이 존재하는 건강기능식품의 제품 생산과 원료 구입 문제를 다룬다. 제품 수요의 변동과 짧지 않은 생산 리드타임, 그리고 유통기한으로 인해 생산 시점과 생산량을 결정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 잘못된 생산시점과 생산량은 제품의 품질 또는 과잉 재고의 결과를 초래한다. 원료 수급의 불확실성으로 인해 생산계획의 어려움이 가중된다. 생약 성분의 특성상 날씨 등의 영향으로 일정기간 공급이 되지 못하는 경우가 있기 때문이다. 그러므로 본 연구에서 다루는 제품의 생산/원료의 구입 문제는 이중의 불확실성을 다루고 있다. 수요의 변동에 따라 제품 판매량이 달라지고, 이에 따라 월별 현금 흐름이 좋았다가 나빠지기도 하며, 원료의 수급 현황에 따라 생산 자체가 중단되기도 한다. 이러한 불확실성을 반영하기 위해 본 연구는 화폐의 시간가치(Time Value of Money) 개념을 목적함수에 도입하여, 목적함수를 순현재가치(NPV) 최대화로 하였다.

본 연구는 제품 수요와 원료 공급에 불확실성이 있는 상황에서 제품 생산과 원료 구입에 대한 최적의 생산/구매 일정을 수립하는 문제를 다룬다. 본 연구는 이 문제의 해를 구하는 휴리스틱 기법을 소개한다. 소개한 기법이 특정 상황에서만 유효한지를 검증하기 위해 주어진 정보를 기반으로 다양한 시나리오를 생성하여 시나리오별로 소개한 기법을 적용해 보고자 한다.

본 모의실험에서 알고리즘은 Microsoft Office Professional Plus 2016 Excel VBA(Visual Basic for Applications) 언어로 코드를 작성하였으

며, 연산의 수행은 AMD Ryzen 7 2700X Eight-Core Processor 3.70 GHz 환경에서 진행하였다.

5.1 모의실험 조건 설정

5.1.1 데이터 생성 기본구성

모의실험의 조건은 같은 환경과 같은 조건에서 생성된 데이터를 통해 실험하였으며 시뮬레이션을 위한 데이터 셋의 기본적인 구성은 [표 5-1]과 같다.

[표 5-1] 데이터 셋의 기본구성

기호	설명	Basic Problem
N_Product	제품의 수	10
N_RM	원료의 수	7
N_Month	분석 기간 (월)	36
N_Scenario	시나리오의 수	20
LT_P	제품 생산 리드타임(월)	2
LR_RM	원료 구매 리드타임(월)	1
Exp_P	제품 유통기간(월)	18, 24
Exp_RM	원료 유효기간(월)	24
Stockout_Rate	특정월에 원료 품질이 시작될 확률	0.1
Stockout_Len	품질 지속 개월 수	5
Salvage_Rate	원료/상품 재고 잔존가치율	0.8
CO_Limit	월별 현금 지출 상한	10,000
Penalty	CO_Limit 초과분에 대한 Penalty	0.5
DC_Rate	연 할인율	0.10

[표 5-1]의 파라미터를 사용하여 생성한 문제들을 Basic Problem이라

하였다. Basic Problem에서 제품의 수는 10이며, 원료의 수는 7이고, 분석 기간은 36개월이다. 제품 생산에 필요한 리드타임은 2개월, 원료 구입에 필요한 리드타임은 1개월이다. 전체 제품 중 40%의 유통기간은 18개월이고 나머지 60%의 유통기간은 24개월이다. 원료의 유효기간은 24개월이다. 특정 월에 품질이 시작될 확률은 0.1이다. Basic Problem은 일단 품질이 발생하면, 품질이 5개월간 지속되는 경우를 가정하였다.

본 모의실험에서 분석기간은 36개월이다. 분석기간 종료시점에서 상품 재고는 가격의 80% 수준에서, 원료 재고는 구입가의 80% 수준으로 모두 판매되는 것으로 가정하였다. 월별 현금 지출의 상한은 10,000으로 하였으며, 현금 지출액이 상한을 초과한 경우 초과분에 대해 Penalty를 0.5씩 부과하였다. 현금 지출 상한을 초과하는 것이 허용되지 않는 경우는 Penalty를 ∞ 로 설정하면 된다. 본 연구에서 현금 흐름에 대한 연 할인율은 10%이다.

[표 5-2]는 제품별 필요한 원료의 종류와 수량이며, 난수 발생을 통해 임의로 생성하였다. 제품별 필요한 원료의 종류는 2 아니면 3으로서, 2일 확률과 3일 확률은 같으며 평균은 2.5개이다. 제품 i 생산에 원료 j 가 필요하다고 하자. 이 경우, 필요한 수량은 $\{1, 2, 3\}$ 중 하나이며 각 원소가 선택될 확률은 $1/3$ 로 같다.

[표 5-2] 제품별 필요 원료의 수

	분포/집합	설명
제품당 필요한 원료의 수	$\{2, 3\}$	각 제품이 필요로 하는 원료의 수는 평균 2.5개이며, 최소 2, 최대 3이다.
제품 i 에 원료 j 가 필수인 경우, i 하나당 필요한 j 의 수량	$\{1, 2, 3\}$	원소 중 택일 (선택 확률은 동일)

5.1.1.1 원료 단가, 제품 비용과 가격

(1) 원료 단가

원료의 단가는 최소값이 0.010이고 최대값이 0.200인 일양분포에서 임의로 추출하였다.

(2) 제품 가격

제품의 가격은 필요한 원료의 종류, 수량, 단가와 원료비 비중을 사용하여 아래와 같이 결정한다. 여기서 원료비 총액이란 각 제품 1개 생산에 필요한 원료의 비용 합계를 말한다. 제품별 원료비 비중은 최소값이 0.1이고 최대값이 0.175인 일양분포에서 임의로 추출하였다.

- 제품별 원료비 총액을 구한다.
- 제품별 원료비 비중을 구한다.
- 제품 가격은 원료비 총액을 원료비 비중으로 나누어 구한다.

예로서, 제품 i 의 가격을 결정한다고 하고, i 의 제품 1개 생산에 원료 2가 1 단위, 원료 3이 3 단위, 원료 7이 2 단위 필요하고, 원료들의 단가는 0.15, 0.05과 0.10이라 하자.

- 원료비 총액은 $0.15(1) + 0.05(3) + 0.10(2) = 0.5$ 이다.
- 최소값이 0.10, 최대값이 0.175인 일양분포로부터 구한 원료비 비중이 0.121이라 하자.
- 원료비 총액 = 0.5, 비중 = 0.121이라면,

$$\text{제품 가격} = \text{원료비 총액} / \text{원료비 비중} = 0.5 / 0.121 = 4.13$$

(3) 제품별 단위 생산비용과 생산 주문비

제품 생산의 주문비용(Setup Cost)과 단위 생산비는 다음과 같이 생성하였다.

- 제품별 단위 생산비용 = 제품 가격 $\times U(0.05, 0.075)$
- 제품별 생산 주문비 = (최초 4개월 간의 예상 수요) \times 단위 생산비

$$\text{용} \times 0.3$$

본 모형에서 제품의 단위 생산비는 제품 가격에 일정 계수를 곱하여 구하였으며, 사용된 계수는 최소값이 0.05, 최대값이 0.075인 일양분포로부터 추출하였다. 제품별 생산 주문비는 최소 4개월간의 예상 수요에 단위 생산비용과 0.3을 곱하여 구하였다. 예를 들어, 제품 가격이 4.13이고 위에서 언급한 계수가 0.1165라면, 제품의 단위 생산비용은 $4.13 \times 0.0583 = 0.2406$ 이 된다. 최소 4개월간의 예상 수요의 합이 4,000이라면, 제품의 생산 주문비는 $4,000 \times 0.2406 \times 0.3 = 288.7$ 이 된다.

[표 5-3]은 원료 단가, 제품 가격, 제품 단위 생산비용 및 주문비 등을 정리한 것이다.

[표 5-3] 제품과 원료 계수들

	분포/집합/공식	설명
원료 단가	$U(0.01, 0.20)$	일양분포
제품 가격에서 원료비 비중	$U(0.10, 0.175)$	일양분포
제품 가격	원료비 총액 / 제품에서 원료비 비중	계산식
제품 단위 생산비용	제품 가격 $\times U(0.05, 0.075)$	일양분포
제품 생산 주문비	(최소 4개월 간의 예상 수요) \times 단위 생산비용 $\times 0.3$	계산식

5.1.1.2 제품의 수요

제품의 수요는 아래의 모형을 사용하여 생성하였다.

제품 i 의 m 월 수요

$$= m\text{월 추세 수요} + m\text{월 계절 효과} + m\text{월 무작위성}$$

여기서, (m 월 추세 수요 + m 월 계절 효과)는 m 월 수요의 추정치가 되

고, m 월 무작위성은 m 월 수요의 오차가 된다.

(1) 최초의 월 수요와 추세 수요

제품별 최초의 월 수요는 최소값과 최대값이 100에서 1,000인 일양분포에서 무작위로 추출하였다. 제품의 추세 수요는 제품의 연성장률에 따라 결정된다. 제품은 연성장률에 따라 3개의 그룹으로 분류하였다. 첫 번째 그룹은 고속 성장하는 제품 그룹, 두 번째 그룹은 성장 정체된 그룹이고, 세 번째 그룹은 성장이 퇴보하는 그룹이다. 각 그룹의 비중은 0.30, 0.40과 0.30으로 설정하였다. 각 그룹의 연성장률은 다음과 같이 추출하였다.

(1) 첫 번째 그룹의 제품 연성장률: $U(0.05, 0.25)$

(2) 두 번째 그룹의 제품 연성장률: $U(-0.10, 0.10)$

(3) 세 번째 그룹의 제품 연성장률: $U(-0.20, 0.00)$

예로서, 제품 i 의 최초 월수요는 200이고 연성장률은 0.15라 하자. 연성장률을 g_y , 월성장률을 g_m 이라 하자. 연성장률이 주어졌을 때, 월성장률은 $g_m = \sqrt[12]{1+g_y} - 1$ 이므로, $g_y = 0.15$ 이면, $g_m = 0.0117$ 이 된다. 첫 13달 동안의 추세 수요는 [표 5-4]와 같다.

[표 5-4] 최초 월수요 200, 연 성장률 0.20일 때의 추세 수요

월	추세 수요
1	200.0
2	202.3
3	204.7
4	207.1
5	209.5
6	212.0
7	214.5
8	217.0

9	219.5
10	222.1
11	224.7
12	227.3
13	230.0

(2) 계절 효과

제품별 계절성은 피크가 되는 계절과 월 수요 대비 증감율을 사용하여 생성하였다. 계절성으로 인한 월 수요 대비 증감율은 최소값이 0.10, 최대값이 0.40인 일양분포에서 무작위로 추출하였다. 예를 들어, 7월의 추세 수요는 214.5이고 그 제품은 7월에 계절적 효과가 피크가 되며 수요 대비 20%의 추가 수요가 계절적 요인으로 생긴다고 하자. 이 경우 7월의 계절 효과는 $214.5 \times 0.20 = 42.9$ 이 된다. 그러므로, 7월 수요의 추정치는 7월 추세 수요 + 7월 계절 효과 = $214.5 + 42.9 = 257.4$ 가 된다.

월별 추세수요와 수요 추정치는 [표 5-5]와 같다.

[표 5-5] 추세 수요, 계절 효과와 수요 추정치

월	추세 수요	계절효과 증감율	계절효과	수요 추정치
1	200.0	-0.20	-40.00	160.00
2	202.3	-0.17	-35.05	167.30
3	204.7	-0.10	-20.47	184.24
4	207.1	0.00	-0.00	207.11
5	209.5	0.10	20.95	230.49
6	212.0	0.17	36.72	248.71
7	214.5	0.20	42.90	257.37
8	217.0	0.17	37.58	254.57
9	219.5	0.10	21.95	241.48
10	222.1	0.00	0.00	222.10
11	224.7	-0.10	-22.47	202.23
12	227.3	-0.17	-39.38	187.96
13	230.0	-0.20	-46.00	184.00

(3) 무작위성

본 논문에서 월별 수요의 무작위성 또는 월별 수요 오차는 평균이 0이고 표준편차가 Rand_Sigma인 정규분포를 따른다고 가정한다. 그러므로 Rand_Sigma가 커지면 수요의 변동성이 커지고, Rand_Sigma가 작으면 수요의 변동성 또한 작아진다.

수요의 변동성 크기에 따라 데이터를 생성하기 위해 본 연구에서는 Rand_Sigma가 월별 수요 추정치의 5%인 경우부터 60%인 경우까지를 다루었다. 월별 수요의 추정치가 주어졌다면, Rand_Sigma가 0.20인 경우의 수요 오차는 평균이 0이고, 표준편차가 (월별 수요 추정치 \times 0.2)인 정규분포를 따른다. 1월부터 36개월까지의 수요 오차를 1월부터 36개월까지의 수요 추정치에 더한 값을 시나리오 수요라 하자. 1월부터 36개월까지의 수요 오차를 구할 때마다 새로운 시나리오 수요를 생성할 수 있게 된다.

[표 5-6] Rand_Sigma = (추정치) \times 0.2의 시나리오 수요

월	수요 추정치	Rand_Sigma	시나리오 수요				
			1	2	3	4	5
1	160.0	0.20	159	154	132	202	179
2	167.3	0.20	191	130	109	129	273
3	184.2	0.20	162	174	137	199	208
4	207.1	0.20	170	211	211	240	193
5	230.5	0.20	242	228	187	294	305
6	248.7	0.20	240	229	276	315	363
7	257.4	0.20	264	312	345	203	212
8	254.6	0.20	310	334	334	258	339
9	241.5	0.20	347	207	216	335	172
10	222.1	0.20	172	208	160	237	252
11	202.2	0.20	202	226	191	179	242
12	188.0	0.20	207	140	212	200	165
13	184.0	0.20	120	222	112	236	210

[표 5-6]은 Rand_Sigma가 월별 수요 추정치의 20%인 경우의 5개의 시

나리오 수요들을 보여주고 있다.

[표 5-7] Rand_Sigma = (추정치)×0.4의 시나리오 수요

월	수요 추정치	Rand_Sigma	시나리오 수요				
			1	2	3	4	5
1	160.0	0.4	161	214	7	103	102
2	167.3	0.4	124	218	150	172	115
3	184.2	0.4	152	231	213	249	204
4	207.1	0.4	17	292	196	250	166
5	230.5	0.4	181	442	217	238	302
6	248.7	0.4	204	230	181	154	176
7	257.4	0.4	119	333	211	418	232
8	254.6	0.4	191	150	292	272	110
9	241.5	0.4	249	142	261	372	196
10	222.1	0.4	204	329	295	167	321
11	202.2	0.4	124	187	214	270	149
12	188.0	0.4	282	147	201	172	240
13	184.0	0.4	71	214	122	84	119

[표 5-7]은 Rand_Sigma가 월별 수요 추정치의 40%인 경우의 5개의 시나리오 수요들을 보여주고 있다. Rand_Sigma가 월별 수요 추정치의 20%인 경우와 비교하면, 시나리오 수요 간의 차이가 상당히 커졌음을 알 수 있다.

[표 5-8] 제품 수요 생성 파라미터

	분포/집합	설명
Start_D	U(100, 1,000)	1월(최초 달)의 수요
성장률 그룹	성장 .30, 보통 .40, 퇴보 .30	제품 그룹의 확률
G_Rate - 성장 그룹	U(0.05, 0.25)	제품의 연성장률
G_Rate - 정체 그룹	U(-0.10, 0.10)	제품의 연성장률
G_Rate - 퇴보 그룹	U(-0.20, 0.00)	제품의 연성장률
Peak_S_Month	{1, 2, ..., 12}	Seasonality 최고 수요 월
Peak_S_Rate	U(0.1, 0.4)	평균 대비 Season 수요 비율
Rand_Sigma	수요 추정치의 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 60%	수요 오차의 표준편차

[표 5-8]은 제품의 월별 수요를 생성하는 데 사용된 파라미터들을 정리한 것이다.

5.1.2 불확실성 대처를 위한 조절 계수

본 모의실험에서는 원료의 수급과 제품의 수요에 존재하는 불확실성에 대처하기 위해 두 종류의 조절 계수를 사용하였다.

첫 번째 조절계수는 제품의 생산계획을 수립할 때 사용되는 제품의 수요 추정치에 관한 계수이며, 이 계수를 수요 계수라 하자. 제품의 실제 수요에서 추정치를 제한 값을 수요 오차라 하자. 실제 수요가 추정치보다 상당히 크거나 반대로 상당히 작은 경우도 있는 경우라면, 수요 오차의 분산이 큰 경우에 해당한다. 이와는 달리 실제 수요가 추정치에서 벗어나는 정도가 상대적으로 작은 경우는, 수요 오차의 분산이 작은 경우에 해당한다. 예를 들어, 어떤 제품의 10월 수요의 추정치는 200이고, 표준오차는 50이라 하자. 이 경우, 수요 200을 기준으로 생산 계획을 수립하는 것이 타당할까? 아니면 250을 기준으로 계획을 수립하는 것이 타당할까? 본 연구에서는 수요 추정치에 일정 계수를 곱한 값을 사용하였으며, 사용된 수요 계수는 1.00, 1.10, 1.20, 1.30과 1.40이다. 예를 들어, 수요 추정치가 200이고 수요 계수가 1.30이라면 계획 수립에 사용된 수요는 260이고, 수요 계수가 1.0이란 원 추정치를 그대로 사용한 경우이다.

두 번째 조절계수는 원료의 안전재고 수준에 관한 계수이며, 이 계수를 안전재고 계수라 하자. 안전재고 수준을 결정하기 위해 본 연구에서는 최초 4개월간 제품들의 수요를 파악하고 그 수요에 사용된 원료별 수량을 산정한다. 예를 들어, 3종류의 제품이 존재하고, 제품 1, 2와 3의 첫 4개월 간의 수요를 100, 500과 200이라 하자. 제품 1에는 원료 1이 3단위, 제품 2에는 원료 1이 2단위, 제품 3에는 원료 1이 5단위 필요하다면, 첫

4개월간의 수요에 동원된 원료 1은 $100(3) + 500(2) + 200(5) = 2,300$ 이 된다. 이와 같은 방식으로 첫 4개월간 제품 수요에 필요한 원료별 수량을 산정할 수 있다. 본 연구에서 원료의 안전재고 수준은 (첫 4개월간 소요된 수량)을 기준으로 하며, 사용된 안전재고계수는 0.0, 1.0, 2.0, 3.0과 4.0이다. 안전재고 계수가 0.0이란 기간별 주어진 안전재고는 0을 의미하며, 안전재고 계수가 3.0이란 안전재고 수준이 (첫 4개월간 소요된 수량)의 300%임을 의미한다.

5.2 모의실험 결과

5.2.1 Basic Problem Set과 조절 계수 조합

모의 실험에 사용된 문제의 특성과 해법에 적용된 계수들을 살펴 보고자 한다.

5.2.1.1 Basic Problem Set의 약술

Basic Problem Set은 총 5개의 문제들로 구성되어 있으며, 각 문제에서 제품의 수는 10이고 원료의 수는 7이며, 총 분석기간은 36개월이다. 각 제품마다 36개월간의 월별 예상 수요, 가격, 생산 로트, 생산 주문비와 생산 단가, 생산 리드타임, 유통기한 최초 재고가 주어져 있고, 각 원료마다 36개월 간의 월별 품질 확률, 원료 구입 단가, 원료 구입 리드타임, 유통기한과 최초 재고가 주어져 있다. 월별 지출액의 한도와 이를 초과했을 때의 패널티가 알려져 있으며, 현금 할인율이 주어져 있다.

총 6개의 Basic Problem Set이 생성되었다. 6개 Set의 차이는 시나리오 수요를 생성할 때 사용된 Rand_Sigma에만 있다. 첫 번째 Set의 Rand_Sigma는 수요 추정치의 5%이고, 나머지 Set의 Rand_Sigma는 수요 추정치의 10%, 20%, 30%, 40%와 60%이다. Set의 각 문제마다 총

20개의 시나리오가 수요가 생성되었다. 예를 들어, Rand_Sigma가 수요 추정치의 40%라면, 평균이 0, 표준편차가 Rand_Sigma인 정규분포로부터 20개의 수요 오차를 발생시키고, 수요 추정치에 20개의 수요 오차를 더하여 20개의 시나리오 수요를 생성하였다.

5.2.1.2 사용한 조절계수 조합

두 조절계수들을 아래와 같이 적용하여 Basic Problem Set에 속한 다섯 문제들의 해를 구하였다.

(제품의) 수요 계수: 1.00, 1.10, 1.20, 1.30, 1.40

(원료의) 안전재고 계수: 0.00, 1.00, 2.00, 3.00

수요 계수의 수는 5이고, 안전재고 계수의 수는 4이므로, 각 문제에 적용된 (수요 계수, 안전재고 계수)의 조합은 (1.00, 0.00), (1.00, 1.00), ..., (1.40, 3.00)과 같이 총 20개의 조합이 가능하다.

5.2.2 Rand_Sigma 변화에 따른 최적 조절 계수 조합과 기법 비교

Rand_Sigma 변화에 따라 최적의 NPV를 산출하는 조절 계수 조합은 어떻게 달라지는 지 그리고 Rand_Sigma의 변화 속에 본 연구에서 제시하는 기법이 유효한 가를 검토하고자 한다.

5.2.2.1 Rand_Sigma 변화에 따른 최적 조절 계수 조합

본 연구에서는 Rand_Sigma에 따라 시나리오 수요의 변동이 결정된다. Rand_Sigma가 수요 추정치의 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 그리고 0.6일 때의 Basic Problem Set을 생성하였으며, 각 Set은 5개의 문제로 구성되고, 각 문제는 총 20개의 시나리오를 갖고 있다. 그러므로 Rans_Sigma 별로 Basic Problem Set은 $5 \times 20 = 100$ 개의 하위 문제로 이루어져 있다.

Rand_Sigma = 수요 추정치 × 0.05일 때의 계수 조합별 NPV 평균은 [표 5-9]와 같다. 수요 계수가 1.0, 안전재고 계수가 0.0일 때의 100개 하위 문제의 NPV 평균은 488,777이다. NPV 평균이 최대가 되는 계수 조합은 수요 계수가 1.0, 안전재고 계수가 2.0으로서, NPV 평균은 504,095이다.

[표 5-9] Rand_Sigma = 수요 추정치 × 0.05일 때의 계수 조합별 NPV 평균

SR\DP	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	Avg	Max
-	488,777	492,624	492,180	494,227	494,557	492,473	494,557
1.00	491,068	491,638	493,784	496,584	496,142	493,843	496,584
2.00	504,095	503,977	502,766	500,835	499,456	502,226	504,095
3.00	504,048	503,390	501,847	499,610	497,845	501,348	504,048
4.00	501,279	500,458	498,777	496,385	493,945	498,168	501,279
Avg	497,854	498,417	497,871	497,528	496,389		
Max	504,095	503,977	502,766	500,835	499,456		

Rand_Sigma = 수요 추정치 × 0.2일 때의 계수 조합별 NPV 평균은 [표 5-10]과 같다. NPV 평균이 최대가 되는 계수 조합은 수요 계수가 1.1, 안전재고 계수가 3.0이다.

[표 5-10] Rand_Sigma = 수요 추정치 × 0.20일 때의 계수 조합별 NPV 평균

SR\DP	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	Avg	Max
-	556,188	562,609	569,918	572,387	576,923	567,605	576,923
1.00	567,452	575,769	577,189	582,023	579,622	576,411	582,023
2.00	592,290	593,291	593,215	590,555	586,653	591,201	593,291
3.00	592,807	594,000	591,574	589,157	585,078	590,523	594,000
4.00	589,645	590,892	588,357	585,386	581,301	587,116	590,892
Avg	579,676	583,312	584,051	583,902	581,915		
Max	592,807	594,000	593,215	590,555	586,653		

Rand_Sigma 변화에 따른 최적의 계수 조합은 [표 5-11]과 같다.

[표 5-11] Rand_Sigma 별 최적 계수 조합

SR\DP	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
-					
1.00					
2.00	0.05			0.60	
3.00	0.10	0.20	0.30, 0.40		
4.00					

[표 5-11]에서 Rand_Sigma가 수요 추정치 $\times 0.05$ 일 때 최적의 조합은 수요 계수 1.0, 원료 안전재고 계수 2.0이며, Rand_Sigma가 수요 추정치 $\times 0.60$ 일 때 최적의 조합은 수요 계수 1.3, 원료 안전재고 계수 2.0이다. 분석에 사용된 Basic Problem Set의 특징은 원가 대비 가격이 높아 제품의 품질로 인한 손실이 재고 부담보다 큰 경우이다. 다시 말해 제품 수요의 변동이 커질수록 제품의 재고량이 큰 것이 유리하다. 그러므로 제품 수요의 변동이 커질수록 최적의 계수 조합은 수요 계수가 큰 쪽으로 이동하고 있다. 그렇지만 원가 대비 가격이 낮아 판매 마진이 극히 작고 할인율이 극히 높은 경우라면, 제품 품질로 인한 손실보다 제품 재고비용이 더 높을수도 있다. 이런 경우라면 제품 수요의 변동성에 따른 최적 계수 조합은 위의 표와는 정반대 양상을 보일수도 있다. 즉 수요 변동성이 높아지면 수요 계수가 1 미만일 때 최적일 수도 있다.

본 연구의 의의는 주어진 파라미터 하에 어떤 계수 조합이 유리한 가를 찾을 수 있으며, 수요의 변동에 따라 최적 계수 조합의 이동 추이를 확인할 수 있다는 데에 있다.

5.2.2.2 단순 생산 계획과 본 연구의 휴리스틱 기법의 비교

본 연구에서는 제품 수요와 원료 안전재고에 관한 계수들을 사용하여 최적의 NPV를 찾아낸다. 만약 이러한 계수들의 조합을 사용하지 않고 제품의 품질이 예상되고 필요한 원료가 확보될 때 필요한 수량만큼 제품을 생산한다면 어떻게 될까? [표 5-12]은 Rand_Sigma별로 두 기법으로 제품을 생산할 때의 NPV 비교이다.

[표 5-12] Rand_Sigma별 두 기법 비교

Rand_Sigma	단순 생산 계획	본 연구 기법
0.05	428,386	504,095
0.10	503,392	616,674
0.20	459,327	594,000
0.30	418,961	520,700
0.40	370,463	445,976
0.60	511,849	661,263

어떤 Rand_Sigma의 경우에도 본 연구에서 제시한 기법으로 찾아낸 NPV 평균이 제품의 품질이 예상되고 필요한 원료가 확보될 때 필요한 수량만큼 제품의 생산할 때의 NPV 평균보다 항상 우월했으며, 이것으로 본 연구에서 제시하는 기법의 우월성이 입증되었다.

5.2.3 Rand_Sigma = 수요 추정치 × 0.3 일 때의 파라미터 변화에 따른 최적 조절 계수 조합

Rand_Sigma를 제외한 다른 파라미터들의 변화도 살펴볼 필요가 있다. 여기서는 Rand_Sigma가 수요 추정치 × 0.3일 때, 원료의 품질 지속 기간 등의 다른 파라미터들이 변화될 때 최적 조절 계수의 조합이 어떻게 변경되는지를 살펴보고자 한다.

먼저 Rand_Sigma = 수요 추정치 × 0.30일 때 Basic Problem Set의 계수 조합별 NPV 평균은 [표 5-13]과 같다.

[표 5-13] Rand_Sigma = 수요 추정치 × 0.30일 때의 계수 조합별 NPV 평균

SR\DP	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	Avg	Max
-	494,640	502,919	505,253	508,320	508,184	503,863	508,320
1.00	501,473	503,927	508,145	512,997	512,755	507,859	512,997
2.00	515,853	519,197	519,229	519,798	517,667	518,349	519,798
3.00	517,916	520,585	520,700	519,177	516,565	518,989	520,700
4.00	515,418	518,382	518,101	516,230	513,821	516,390	518,382
Avg	509,060	513,002	514,286	515,304	513,798		
Max	517,916	520,585	520,700	519,798	517,667		

NPV 평균은 수요 계수 1.2, 원료 안전재고 계수가 3.0일 때 520,700로서, 최고의 NPV 평균이다.

5.2.3.1 Stockout_Len 변화에 따른 최적 조절 계수 조합

원료의 품질 지속 기간, Stockout_Len은 Basic Problem Set에서 5로 설정되어 있다. 이 값이 2와 8로 변경될 때의 최적 조절 계수 조합과 NPV 평균은 [표 5-14]와 같다. 원료 품질 기간이 2개월인 경우, 수요 계수 = 1.3, 원료 안전재고 계수 = 1.0일 때 NPV는 523,328로 최대 NPV가 된다. 원료 품질 기간이 8개월인 경우, 수요 계수 = 1.1, 원료 안전재고 계수 = 3.0일 때 NPV는 519,730으로 최대 NPV가 된다. 원료 품질 기간이 짧아지면 원료 안전재고 수준이 낮아지고, 기간이 길어지면 원료 안전재고 수준이 증가함을 보이고 있다.

[표 5-14] Stockout_Len(SL)별 최적 조합과 NPV 평균

SR\DP	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
-					
1.00				SL = 2 NPV 평균 = 523,328	
2.00					
3.00		SL = 8 NPV 평균 = 519,730	Basic SL = 5 NPV 평균 = 520,700		
4.00					

5.2.3.2 DC_Rate 변화에 따른 최적 조절 계수 조합

현금의 할인율, DC_Rate는 Basic Problem Set에서 0.10으로 설정되어 있다. 이 값이 0.01과 0.20으로 변경될 때의 최적 조절 계수 조합과 NPV 평균은 [표 5-15]와 같다. 할인율이 0.01인 경우, 수요 계수 = 1.1, 원료 안전재고 계수 = 3.0일 때 NPV는 599,628로 최대 NPV가 된다. 할인율이 0.20인 경우, 수요 계수 = 1.2, 원료 안전재고 계수 = 2.0일 때 NPV는 454,833으로 최대 NPV가 된다.

할인율은 현금 흐름의 평가에 영향을 끼친다. 할인율이 0.01이면 최대 NPV는 599,628, 0.10이면 520,700 그리고 0.20이면 454,833으로 할인율이 높아지면 NPV는 감소하게 된다. 뿐만 아니라 원료 재고 수준이 낮아지는 경향을 보인다.

[표 5-15] DC_Rate(DR)별 최적 조합과 NPV 평균

SR\DP	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
-					
1.00					
2.00			DR = 0.20 NPV 평균 = 454,833		
3.00		DR = 0.01 NPV 평균 = 599,628	Basic DR = 0.10 NPV 평균 = 520,700		
4.00					

5.2.3.3 Price 변화에 따른 최적 조절 계수 조합

제품 가격의 변화에 따라 최적 조절 계수 조합이 어떻게 변화하는지를 살펴보고자 한다. [표 5-16]은 Price에 따른 최적 조합과 NPV 평균이며, Price가 0.5배가 경우, 수요 계수 = 1.1, 원료 안전재고 계수 = 2.0일 때 NPV는 199,032로 최대 NPV가 된다. Price가 10배가 되는 경우, 수요 계수 = 1.3, 원료 안전재고 계수 = 4.0일 때 NPV는 6,353,186으로 최대 NPV가 된다.

Price가 높아지면 최적 NPV는 증가한다. Price의 증가는 마진율의 증가로 이어지므로, 재고 비용 대비 품질 비용이 커진다. 그러므로 제품 품질이 감소되도록 원료 안전재고 수준이 증가하고 수요 계수 또한 증가하는 경향을 보인다.

[표 5-16] Price에 따른 최적 조합과 NPV 평균

SR\DP	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
-					
1.00					
2.00		Price *= 0.5 NPV 평균 = 199,032			
3.00			Basic Price *= 1 NPV 평균 = 520,700		
4.00				Price *= 10 NPV 평균 = 6,353,186	

제 6 장 결 론

본 연구는 건강기능식품 분야의 원료 구입과 제품 생산에 관한 문제를 다루었다. 이 분야의 특성으로는 천연 성분의 원료 수급이 불안정하다는 점과 제품의 수요에 변동성이 크다는 점을 들 수 있다. 원료가 품질될 리스크를 줄이는 방법으로 안전재고를 충분히 확보하는 것도 가능하지만, 원료 자체가 고가이어서 안전재고량을 늘리면 제작사의 유동성에 문제가 발생할 수도 있으며, 유통 기간 내에 원료를 소진하지 못하면 폐기해야 하는 경우도 발생한다. 물론 안전재고 수준을 낮추면 원료 구입으로 인한 유동성 문제를 완화할 수 있고 유통 기간 경과로 원료를 폐기하는 리스크는 확연히 줄일 수 있지만, 제품의 생산이 급격히 이루어지는 경우 원료 부족으로 제품 수요를 충족시키지 못할 위험 또한 증가하게 된다. 이러한 문제점은 제품의 생산에서도 같은 방식으로 대두된다. 충분한 수량의 제품을 계획 생산하면 수요를 충족시키지 못해 발생하는 품질의 위험을 감소시킬 수 있지만, 제품의 생산에 투입된 자금으로 인해 현금 흐름에 문제가 발생할 수도 있고 제품을 유통기간 내에 소진하지 못하면 재고를 폐기해야 할 수도 있다. 이와 반대로 최소한의 수량만을 생산한다면 품질의 위험이 증가하며 경쟁이 심한 건강기능식품 시장의 특성을 고려할 때 시장 점유율의 하락을 초래할 수 있다. 원료 공급망이 안정될수록 그리고 제품 수요에 대한 예측이 정교해질수록 이와 같은 문제점은 해소될 수 있지만, 건강기능식품의 원료는 천연 원료이어서 원료 공급망이 획기적으로 안정될 가능성은 매우 낮다. 건강기능식품은 필수재가 아닌 관계로 수요의 변동성이 일반 의약품에 비해 상대적으로 높으며 이런 현상은 단기간에 소멸될 가능성이 거의 없다. 그러므로 원료 공급과 제품 수요의 불확실성을 통제하면서 원료 구입에서 제품 생산

그리고 판매에 이르는 과정에 발생하는 현금 흐름의 순현재가치를 제고하는 기법이 필요하다.

본 논문은 건강기능식품 분야에서 원료 구입부터 제품 생산과 판매에 이르는 의사결정과정에 대해 수학적으로 모형화하고, 건강기능식품 분야의 다양한 불확실성을 체계적으로 반영하는 시뮬레이션 기법을 제안하였으며, 모의실험 데이터를 활용하여 제안한 기법의 유효성을 검증하여, 건강기능식품 분야의 다양한 파라미터들이 NPV에 어떤 영향을 끼치는지를 분석하였다.

6.1 연구의 결과

본 연구는 제품의 생산 단위가 로트의 배수로 한정되어 있는 문제를 다룬다. 생산 계획 기간과 제품의 수가 매우 작은 경우는 짧은 시간 내에 최적의 생산 계획을 수립하는 것이 가능할 수도 있지만, 계획 기간과 제품의 수가 증가하면 해의 영역이 기하급수적으로 증가하여 제한된 시간 내에 최적해를 찾는 것은 불가능할 수도 있다. 그런 이유로 본 연구는 비교적 짧은 시간 내에 만족할만한 수준의 해를 도출하는 휴리스틱 기법을 고안하여 사용하였다. 제안한 휴리스틱은 두 종류의 조절계수를 도입하여 원료의 공급과 제품의 수요에 관한 불확실성에 대처하도록 하였다. 첫 번째 조절계수는 제품 수요의 변동성에 관한 계수이고, 두 번째 조절계수는 원료 공급의 불확실성에 관한 계수이다. 어떤 계수 조합이 가장 큰 NPV를 산출하는지를 테스트하기 위해 문제마다 5개의 시나리오를 작성하였다. 두 계수 조합마다 5개의 시나리오에 적용하여 결과를 구했고, 5개의 NPV 평균이 가장 높은 조합이 그 문제의 가장 좋은 계수 조합으로 선정하였다.

건강기능식품에서 원료의 구입부터 제품 생산 그리고 판매에 이르는

과정을 살펴보고 NPV를 결과물로 도출하였다. 그러므로 1본 연구는 불확실성 하의 NPV 최대화 문제라 할 수 있다. 본 연구에서 다룬 NPV 문제는 건강기능식품의 생태계 환경에 따라 그 성과가 영향을 받는다. 원료의 품질 빈도는 NPV에 부의 관계를, 재고의 잔존가치 비율은 NPV에 정의 관계를, 기간별 현금 지출의 상한액은 NPV에 정의 관계를, 상한액을 초과할 때 발생하는 Penalty는 NPV에 부의 영향을 그리고 할인율은 NPV에 부의 영향을 미친다는 것을 모의실험을 통해 확인하였다.

본 연구의 성과는 문제 파라미터와 NPV 사이의 정 또는 부의 관계를 확인에 그치지 않는다. 두 종류의 조절 변수 조합을 충분한 수의 시나리오에 대응시켜 NPV를 구해 보았는데, 이를 정리하면 각기 다른 조건의 건강기능식품 회사들도 자사의 제품군과 환경을 모형화하고 충분한 모의 실험을 통해 그 회사에 적합한 조절 변수 조합을 찾을 수 있음을 의미하며, 이는 그 회사의 NPV를 증대시킬 수 있음을 뜻한다.

6.2 연구의 시사점

본 연구의 모형은 주어진 불확실성 하에 조절계수 조합을 활용하여 최적의 원료 구매 및 제품 생산의 의사결정을 도출한다.

본 모형은 원료의 구매부터 제품의 판매에 이르는 전 과정을 모형화하였고, 관련된 계수들을 상당수 포함하고 있기 때문에 계수들에 관한 분석에 이용될 수 있다. 예를 들어, 특정 제품의 유통 기간을 24개월에서 30개월로 연장할 때의 경제적 가치를 쉽게 구할 수 있다. 24개월일 때의 NPV에서 36개월 일때의 NPV를 제한 값이 유통기간 단축으로 인한 경제적 가치가 되기 때문이다. 제품의 성분을 개선하는 프로젝트에도 적용될 수 있다. 개선에 투입되는 비용을 정당화시키기 위해 그 제품의 예상 수요는 어느 정도 증가하여야 하는가와 같은 질문에도 본 모형은 사용

될 수 있다. 이와 같이 본 모형은 간단한 응용 또는 수정을 통해 다양한 상황에 적용될 수 있다는 장점이 있다.

본 모형의 특징은 구매부터 생산, 판매에 이르는 경영 활동을 현금 흐름으로 파악했다는 점이다. 건강기능식품 분야는 경영 전문정보보다는 건강 관련 전문성에 강점이 있는 경영진들이 다수 존재한다. 이 모형은 그런 경영진들에게 구매부터 판매에 이르는 경영 현상을 시점별로 요약 정리하여 정보를 제공하고 더불어 기업의 경영에 많은 기여를 할 수 있다.

6.3 연구의 한계 및 향후 연구과제

본 연구는 비교적 적은 수의 제품군을 대상으로 모의실험을 수행했으며, 모의실험에 사용된 시나리오의 수도 다양한 모든 경우를 다 포함하기에는 다소 적다는 한계를 갖는다. 보다 폭넓고 유효한 추론을 위해 제품의 수와 시나리오의 수를 확대하여 실험할 필요가 있다.

본 연구에서는 제품의 시점별 수요의 평균치는 알려져 있고, 실제 수요는 평균치에 오차를 더하여 발생하는 것으로 하였다. 실제의 경우, 제품의 시점별 수요의 평균치가 부정확하게 추정되는 경우도 있고, 제품 수요의 패턴이 시간이 경과함에 따라 변경되는 경우도 빈번하다. 그러므로 제품의 시점별 수요의 평균치가 알려져 있는 경우 이외의 다른 경우도 모형에 반영할 필요가 있다. 또한 본 모형에서는 제품의 수요가 서로 독립적이라 가정하였다. 제품의 수요가 종속적인 경우도 고려할 필요가 있다.

지금까지 언급한 사항들은 본 연구의 한계점이며, 추가적인 연구를 통해 보다 많은 상황에 유효한 모형의 확장이 필요하다.

참 고 문 헌

[국내 문헌]

- 김기영. (2005). *물류기초를 위한 재고관리*. 효민.
- 백인섭. (2019). *자원 제약을 고려한 프로젝트 일정문제: 재작업 가능한 활동이 있는 경우*, 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 안태호. (1998). 자원제약을 고려하며 기간단축이 가능한 복수의 양식을 지닌 단일 프로젝트의 일정문제. *한국컴퓨터정보학회논문지*, 3(4), 154-163.
- 유경열, 최홍석, & 정대율. (2021). 항공기 제조업에서 생산계획 동기화를 통한 데이터기반 구매조달 및 재고관리 방안 연구. *정보시스템연구*, 30(1), 151-177.
- 통계청. (2023년 10월 24일). 건강기능식품 생산현황. *e-나라지표*.
https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=3051

[국외 문헌]

- Ahmed, W., Hasan, M., Hoque, A., & Alam, M. J. (2018). Impact of free cash flow on profitability: An empirical study on pharmaceutical company. *Journal of Jessore University of Science and Technology ISSN*, 2521, 5493.
- Al Hayek, M. A. (2018). The relationship between sales revenue and net profit with net cash flows from operating activities in Jordanian industrial joint stock companies. *International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management*

Sciences, 8(3), 149-162.

Almeida, H., Campello, M., & Weisbach, M. S. (2004). The cash flow sensitivity of cash. *The Journal of Finance*, 59(4), 1777-1804.

Alzidani, M. (2021). *Optimization of the scheduling strategy using meta-heuristics approach in the context of cellular manufacturing with multiples products* (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).

Arnold, J. R., Chapman, S. N., & Clive, L. M. (2008). *Introduction to materials management*. Pearson Education.

Asadujjaman, M., Rahman, H. F., Chakraborty, R. K., & Ryan, M. J. (2021). An immune genetic algorithm for solving NPV-based resource constrained project scheduling problem. *IEEE Access*, 9, 26177-26195.

Banks, J. (2005). *Discrete event system simulation*. Pearson Education India.

Bhatnagar, R., & Sohal, A. S. (2005). Supply chain competitiveness: measuring the impact of location factors, uncertainty and manufacturing practices. *Technovation*, 25(5), 443-456.

Blazewicz, J. (1978). Complexity of computer scheduling algorithms under resource constraints. In *Proc. of meeting AFCET-SMF on Applied Mathematics, 1978*.

Burggräf, P., Adlon, T., Minderjahn, R., Schäfer, N., & Fassmer, T. (2023). Application of stochastic risk simulation to increase depth of production planning. *International Journal of Naval Architecture*

and Ocean Engineering, 100545.

Dadaneh, D. Z., Moradi, S., & Alizadeh, B. (2023). Simultaneous planning of purchase orders, production, and inventory management under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 265, 109012.

Doersch, R. H., & Patterson, J. H. (1977). Scheduling a project to maximize its present value: A zero-one programming approach. *Management Science*, 23(8), 882-889.

Dolgui, A., & Prodhon, C. (2007). Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 269-279.

Epstein, M. J., & Pava, M. L. (1992). How useful is the statement of cash flows?. *Strategic Finance*, 74(1), 52.

Finishtya, F. C. (2019). The role of cash flow of operational, profitability, and financial leverage in predicting financial distress on manufacturing company in Indonesia. *Jurnal Aplikasi Manajemen*, 17(1), 110-117.

Fortuin, L. (1981). A comparison of SIC and MRP, two methods for material procurement in industry. *European Journal of Operational Research*, 6(4), 386-392.

Gaonkar, R., & Viswanadham, N. (2004, April). A conceptual and analytical framework for the management of risk in supply chains. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004* (Vol. 3, 2699-2704). IEEE.

- Gelders, L. F., & Van Wassenhove, L. N. (1981). Production planning: a review. *European Journal of Operational Research*, 7(2), 101–110.
- Glover, F. (1989). Tabu search—part I. *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190–206.
- Guan, F., Mittoo, U. R., & Zhang, Z. (2021). Investment to cash flow sensitivity: evidence from manufacturing and energy sectors. *Emerging Markets Finance and Trade*, 57(8), 2206–2229.
- Huang, M. C., Yen, G. F., & Liu, T. C. (2014). Reexamining supply chain integration and the supplier's performance relationships under uncertainty. *Supply Chain Management: An International Journal*, 19(1), 64–78.
- Hult, G. T. M., Craighead, C. W., & Ketchen, Jr, D. J. (2010). Risk uncertainty and supply chain decisions: a real options perspective. *Decision Sciences*, 41(3), 435–458.
- Jasim, R. M. (2023). Hybride Particle Swarm Optimization to Solve Fuzzy Multi-Objective Master Production Scheduling Problems with Application. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 11(1s), 201–208.
- Jin, X. H., & Doloi, H. (2008). Interpreting risk allocation mechanism in public - private partnership projects: an empirical study in a transaction cost economics perspective. *Construction Management and Economics*, 26(7), 707–721.
- Koulouris, A., & Kotelida, I. (2011). Simulation-based reactive

- scheduling in tomato processing plant with raw material uncertainty. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 29, 1020–1024). Elsevier.
- Kroese, D. P., Brereton, T., Taimre, T., & Botev, Z. I. (2014). Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 6(6), 386–392.
- Kumar, R., Sharma, A. K., & Tewari, P. C. (2015). Cost analysis of a coal-fired power plant using the NPV method. *Journal of Industrial Engineering International*, 11, 495–504.
- McCue, M. J. (1997). Small hospitals with positive cash flow: Why are they winners?. *Medical Care Research and Review*, 54(1), 32–60.
- Motlagh, A. J. (2013). Accounting: Cash flow statement. *IOSR Journal of Business and Management*, 7(4), 109–116.
- Nguyen, T. H. D. (2020). *The optimization of the lean supply chain management using meta-heuristic approach* (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- Nwasuka, N. C., & Uchechukwu, N. (2023). Computer-based Production Planning, Scheduling and Control: A Review. *Journal of Engineering Research*.
- Patterson, J. H., Talbot, F. B., Slowinski, R., & Weglarz, J. (1990). Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource-constrained scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 49(1), 68–79.

- Plewa Jr, F. J., & Friedlob, G. T. (1995). *Understanding cash flow*. John Wiley & Sons.
- Rahman, A., & Sharma, R. B. (2020). Cash flows and financial performance in the industrial sector of Saudi Arabia: With special reference to Insurance and Manufacturing Sectors. *Investment Management & Financial Innovations*, 17(4), 76.
- Realdi, R., & Siregar, B. A. (2022). The Effect Of Ownership And Cash Flow On Company Value With Debt Policy As Mediation In Pharmaceutical Companies. *Strategic Management Business Journal*, 20(1), 16–25.
- Saif Ul Islam, M., Meo, M. S., & Usman, M. (2022). The relationship between corporate investment decision and firm performance: Moderating role of cash flows. *Journal of Public Affairs*, 22(2), e2445.
- Sánchez-Rebull, M. V., Ferrer-Rullan, R., Hernández-Lara, A. B., & Niñerola, A. (2020). Six Sigma for improving cash flow deficit: a case study in the food can manufacturing industry. *International Journal of Lean Six Sigma*, 11(6), 1105–1126.
- Scherer, F. M. (2001). The link between gross profitability and pharmaceutical R&D spending. *Health Affairs*, 20(5), 216–220.
- Seyfi, S. A., Yılmaz, G., Yanıkoğlu, İ., & Garip, A. (2022). Capacitated Stochastic Lot-sizing and Production Planning Problem Under Demand Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 2731–2736.
- Shank, J. K. (1996). Analysing technology investments—from NPV to

- strategic cost management (SCM). *Management Accounting Research*, 7(2), 185-197.
- Simangunsong, E., Hendry, L. C., & Stevenson, M. (2012). Supply-chain uncertainty: a review and theoretical foundation for future research. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4493-4523.
- Sun, L., Heragu, S. S., Chen, L., & Spearman, M. L. (2009, December). Simulation analysis of a multi-item MRP system based on factorial design. In *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)* 2107-2114. IEEE.
- Thompson, G. M. (1995). Labor scheduling using NPV estimates of the marginal benefit of additional labor capacity. *Journal of Operations Management*, 13(1), 67-86.
- Tordecilla, R. D., Juan, A. A., Montoya-Torres, J. R., Quintero-Araujo, C. L., & Panadero, J. (2021). Simulation-optimization methods for designing and assessing resilient supply chain networks under uncertainty scenarios: A review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 106, 102166.
- Wetekamp, W. (2011, September). Net Present Value (NPV) as a tool supporting effective project management. In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems* (Vol. 2, 898-900). IEEE.
- Yang, K. K., Talbot, F. B., & Patterson, J. H. (1993). Scheduling a project to maximize its net present value: an integer programming

- approach. *European Journal of Operational Research*, 64(2), 188-198.
- Zaman, F., Elsayed, S., Sarker, R., Essam, D., & Coello, C. A. C. (2021). An evolutionary approach for resource constrained project scheduling with uncertain changes. *Computers & Operations Research*, 125, 105104.
- Zhang, H., Jiang, Z., & Guo, C. (2007, October). Simulation based real-time scheduling method for dispatching and rework control of semiconductor manufacturing system. In *2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2901-2905. IEEE.
- Chris B. Murphy. (2023). Cash Flow Statement: What It Is And Examples. *Investopedia*.
<https://www.investopedia.com/investing/what-is-a-cash-flow-statement/>