

포장용 필름 제조공장의 작업 우선순위 결정을 위한 시물레이션 분석

유형기 · 서동원[†]

Simulation Analysis for Job Sequences in a Packaging Film Manufacturing Plant

LIU JIONGKAI · Dong-Won Seo[†]

ABSTRACT

The packaging plastic manufacturing (blown film) industry has long developed in China, but most of them are small/medium-sized enterprises, and it is very rare to have appropriate operation plans suitable for their own business. The packaging plastic manufacturing industry (blown film) follows a typical Make-To-Order method, and the sequence of processing orders is very important. Waste of materials incurred by frequent conversions of production cannot be avoided, and generally, related costs incurred during conversion production are also different. Therefore, this study developed a job sequence determination model for improving operating profits using @RISK simulation software, compared and analyzed 3 actionable clustering treatment methods proposed by technical managers and field experts under the actual situation of the factory.

Key words : Packaging film manufacturer, Make-To-Order(MTO), Job Sequence, Transition Cost, Product Clustering

요약

포장용 플라스틱 제조산업은 중국에서 오랫동안 발전해 왔지만, 대부분이 중소기업으로 자 기업의 상황에 맞는 적절한 운영방안을 가지고 있는 경우는 매우 드물다. 포장용 플라스틱 제조산업은 대표적인 주문생산 방식을 따르는 산업으로 생산 과정에서 주문의 처리순서는 매우 중요하다. 잦은 제품별 전환생산으로 발생하는 재료의 낭비는 피할 수 없으며, 일반적으로 제품 간 전환생산 시에 발생하는 관련 비용도 상이하다. 따라서 본 연구는 포장용 플라스틱 필름 제조산업에서 운영수익 향상을 위한 작업 우선순위 결정 모형을 @RISK 시물레이션 소프트웨어를 활용하여 개발하고, 기술관리자와 현장 전문가로부터 공장의 실제 상황을 고려하여 제안된 3가지 실행 가능한 군집화 우선순위 처리 방안을 비교·분석하였다.

주요어 : 포장용 플라스틱 필름 제조산업, 주문생산, 작업 우선순위, 전환비용, 제품 군집화

1. 서론

제조업의 생산 및 운영방식은 산업의 특성과 고객 주문에 대한 처리방식에 따라 크게 MTS(Make-To-Stock)와 MTO(Make-To-Order)로 나눌 수 있다. MTS는 시장 수요 예측을 바탕으로 계획적으로 생산하고 제품의 재고

를 유지하는 생산방식으로 고객화(customization: 제품을 특정 고객의 요구사항에 맞춰 생산하는 것) 정도가 낮고, 표준화를 통해 대량 생산하기 때문에 생산효율이 상대적으로 높다. 반면에, MTO는 고객의 주문에 맞추어 생산하는 주문생산 방식이다. 일반적으로 고객화가 강한 제품이나 표준화되지 않은 또는 소량의 표준화된 제품들의 혼합생산에는 주로 MTO 방식이 사용되고 있다. MTO 방식은 주문생산으로 생산라인의 유연성이 매우 중요하다.

포장용 플라스틱 필름 제조산업은 세계의 공장으로서 불리는 중국에서 오랜 기간 성장해 왔다. 2017년 중국 플라스틱 필름 산업의 총생산액은 약 1,863.87억 위안(32.6조 원)이며, 최근 몇 년 동안 플라스틱 필름 생산량은 해마

Received: 6 December 2021, **Revised:** 7 March 2022,
Accepted: 11 March 2022

[†] **Corresponding Author:** Dong-Won Seo
E-mail: dwseo@khu.ac.kr
School of Management, Management Research Institute,
Kyung Hee University

다 증가하여 연평균 증가 속도가 15%에 이른다. 2018년 중국 플라스틱 필름 산업 총생산액은 2,191.86억 위안(38.3조 원)이고 그중 포장용 플라스틱 필름의 총생산액은 1,471.92억 위안(25.7조 원)으로 산업 총생산액의 67%를 차지하고 있다(Chen, 2019).

포장용 필름 제조 공장이 처리해야 할 주문은 종류가 매우 다양하고 주문량의 변화가 큰 반면에, 기술 장벽이 높지 않아 경쟁이 상당히 치열한 상황이다. 따라서 공장의 수익 개선을 위해 비용 절감이 절실하며, 그 일환으로 전환 시 발생하는 낭비로 인한 비용을 감소시키는 것이 더욱 중요하다.

또한 주문이 처리되는 기계와 작업순서에 따라 전환비용이 다르게 나타나는데, 이는 작업순서와 기계 의존적인 일정계획문제(scheduling with sequence and machine dependent setup time/cost)로 분류된다. Yalaou and Chu(2003)는 작업순서의 의존적인 준비시간을 갖는 동종 병렬기계의 총 작업완료시간 최소화 문제가 NP-hard임을 증명하였다. 주철민과 김병수(2012)는 작업순서와 기계 의존적인 준비시간을 갖는 이종병렬기계의 일정계획 역시 NP-hard임을 언급하고 유전 알고리즘을 활용하여 효과적인 작업할당 방법을 제안하였다. 하지만 이러한 연구들은 고정된 수요를 대상으로 작업일정에 대한 수리모형을 통해 작업지연을 최소화하는 작업일정을 결정하는 연구로, 수요의 변동을 고려하지 못하고 있다. 기존 연구와 본 연구와의 차이점은 주문 수요의 변동성에 대한 고려 여부라고 할 수 있다. 본 연구에서는 수요의 변동과 전환비용을 함께 고려한 개선된 일정계획을 도출하기 위한 시뮬레이션을 분석을 수행하였다.

포장용 플라스틱 필름에 대한 수요는 주문 별로 제품 종류와 크기, 두께, 양이 매우 다양하여 수요 예측이 어렵다(Cheng, 2020). 따라서 대부분의 포장용 플라스틱 필름 제조공장은 주문생산 방식(MTO을 채택하고 주문의 접수순서에 따라 작업순서를 결정하는 것이 일반적이다(Ma, 2013). Gopura and Jayawardane(2012)는 플라스틱 필름의 제조부터 인쇄, bagging(플라스틱 필름 롤을 가공해 상품을 포장할 수 있는 봉지로 만드는 과정), 품질검사, 실제 포장까지의 프로세스를 분석하여 시뮬레이션 모델링을 통해 주문의 최적 처리시간을 찾는 시뮬레이션 도구를 개발하였다.

Qiu and Burch(1997)는 다중기계와 다중제품 환경에서 변동 셋업(준비) 비용이 존재하는 경우에 대해 생산순서를 결정하는 계층적 생산 계획(HPP: hierarchical production planning) 및 스케줄링 모델을 소개하였다.

김은갑(2019)은 복수 고객군을 갖는 주문생산 제조기업을 대상으로 에너지소비효율 최적화와 생산순서 등을 통합적으로 수립하는 문제를 제안하였다. 주문수용, 작업순서 등 통제가 기업수익에 미치는 영향을 분석하기 위하여 마코프 의사결정 모형을 제시하고, 가치 반복알고리즘을 사용하여 분석하였다. 최용희와 황승준(2019)은 국내 판유리 제조공장의 고정된 월간 주문을 대상으로 우선순위 규칙에 따라 납기 준수 관련 핵심 성과지표를 시뮬레이션을 통해 비교·분석하였는데, 주문 특성을 사전에 고정함으로써 주문의 변화(수, 양 및 순서 등)를 고려하지는 않았다.

플라스틱 필름의 대부분 원자재는 화학제품과 석유의 가공품으로, 낭비되는 원자재들은 100% 재사용할 수 없으며 일부 재활용하더라도 추가적인 가공이 필요하여 에너지와 자원의 낭비를 피할 수 없다. 플라스틱 재활용 및 사용효율에 관한 연구(e.g., Nakahashi and Ozaki, 2007)도 많이 있지만, 현황을 보면 개발된 여러 처리 방법은 재활용 효율이 예상보다 높지 않다(Zhang and Yang, 2021). 따라서 생산 단계에서 플라스틱 원자재를 높은 효율로 사용하는 것이 중요하다. Li et al.(2017)은 POE (polyolefin elastomer) 첨가량이 필름의 기능에 미치는 영향을 연구하였다. 하지만 생산 효율성을 높이고 비용과 낭비를 줄이는 방법이나 제안은 언급되지 않았다.

조선, 제철 등 대규모 산업의 생산계획에 관한 연구는 꾸준히 되어 왔지만, 비교적 소규모 산업인 포장용 필름 제조업의 작업 우선순위에 관한 연구는 찾기 어렵다. 현재 많은 플라스틱 필름 제조공장이 가지고 있는 큰 문제점은 체계적이고 과학적인 운영 방법에 따라 운영되지 못하고, 작업의 우선순위와 같은 중요한 운영정책이 관리자의 경험과 주관적인 판단을 통해 결정되고 기준이 명확하지 않다는 것이다. 제품들의 전환생산 과정 중에 낭비는 불가피하지만 적절한 작업 우선순위를 적용한다면 수익개선과 더불어 자원과 에너지도 절약할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 포장용 플라스틱 필름 제조산업의 실제 운영 데이터를 활용하여 비용, 에너지와 자원 소모를 고려한 시뮬레이션 모형을 개발하고, 총 수익을 최대화하는 실행 가능한 작업 우선순위를 도출하는 것이다.

2. 포장용 플라스틱 필름 제조공장 현황

본 연구는 중국의 강소성(江苏)에 있는 플라스틱 포장

용 필름 제조공장(XLBZ)을 대상으로 한다. 회사는 2002년 설립되었으며 2021년 기준 약 90억원의 매출과 40여 명이 근무하고 있는 중소기업이다. 동종 업계 내 다른 회사들과 비교해 기술과 운영방식이 성숙되어 있으며, 현지에서 영향력 있는 대표적인 공장 중 하나이다.

포장용 플라스틱 필름 제조산업은 주문 고객(기업)이 많고 주문의 유형과 종류가 다양하기 때문에 수요 예측이 매우 제한적이다. 예를 들어, 알루미늄 도금의 필요 여부, 분말 포장의 정전기 방지 여부, 식품 포장의 고온 내성(100℃이상, 120℃이상 등)의 필요 여부 등 요구되는 규격이 매우 다양하다. 고온 상태에서 포장하고 냉동 보관 및 유통하는 식품이 많아서 내열뿐만 아니라 저온과 고온 내성이 모두 필요한 것도 있다. 이외에도 제품마다 두께와 크기, 색상이 모두 고객의 요구에 따라 다를 수 있을 것이다. 따라서 플라스틱 필름 제조산업 대다수 공장은 MTO방식을 채택하고 있다.

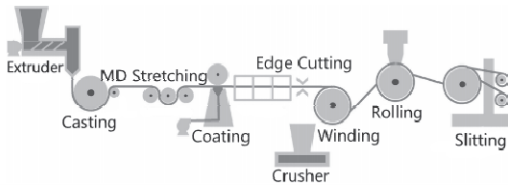


Fig. 1. Plastic film production process

Fig. 1은 일반적인 플라스틱 필름 생산 프로세스를 나타내고 있으며, 공정은 건조, 연삭(grinding), 압출(extrusion), 주조(casting), 세로 스트레치(MDS: machine direction stretching), 코팅, 가로 스트레치(TDS: transverse direction stretching), 에지 커터(edge cutter), 와인딩(winding) 및 슬리팅(slitting)으로 구성된다.

하나의 주문이 완료되면, 다음 주문의 생산을 위한 전환과정을 거치게 된다. 전환과정에서 각 주문의 요구 규격(재질, 폭, 두께, 크기 등)에 맞게 필요 원자재의 특성에 따라 원자재의 투입 비율을 조정하여 새로운 주문의 요구 사항에 맞을 때까지 기계를 조정하는 과정을 거치게 된다. 이와 관련된 비용을 전환비용으로 정의하였다. 생산이 전환될 때 공정의 일부(예, MDS와 TDS 등에서 재조정이 필요하며 이 과정에서 불가피한 낭비(새로운 주문에 요구 사항에 맞을 때까지 생산된 필름)가 발생한다. 적절한 작업 우선순위를 적용한다면 전환과정에서 발생하는 낭비를 줄일 수 있다.

XLBZ 공장에는 현재 5대의 기계가 있으며 1호기와 2

호기는 공장 설립 초기에 구매되어 각각 하루 3,100kg과 2,800kg의 생산능력을 갖추고 있다. 3호기와 4호기는 공장이 발전하면서 도입되었으며 생산능력은 각각 하루 5,200kg, 4,300kg이다. 공장 발전과 함께 주문 지연을 개선하고 더 높은 생산능력을 위해 2019년 생산능력이 하루 10,500kg인 최신형인 5호기가 도입되었지만, 코로나19로 인한 소비감축으로 2020년 주문량과 생산량은 예측치에 훨씬 미치지 못한 상황이다. 5호기는 신형 산업기기로 생산성이 높고 품질과 안정성이 기존 기계보다 훨씬 뛰어나며, 전기요금과 다른 고정 비용도 절감된다. 일반적으로 고객도 새로운 기기의 사용을 선호하고 기대하기 때문에, 주문에 맞추어 생산할 때 기계의 상태와 성능에 따라 5번 기계를 우선으로 사용하며 부족할 경우 구형-소형 기계를 사용하는 순서로, 기계 사용순서는 5-3-4-1-2로 가정하였다. 제품생산은 주문 처리순서와 기계 배정순서에 따라 이루어지면, 당일 미생산 주문은 다음 날 우선 생산 처리된다.

3. 시뮬레이션모형 설계

본 연구에는 공장의 실제 데이터를 바탕으로 비용 절감을 통해 수익을 증대시키는 현장에서 실행 가능한 작업 우선순위 결정을 목표로 하고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 포장용 필름 제조공장의 대부분이 중소기업으로 기업의 상황이 이론적 결과를 바로 적용하기에 적합하지 않으며, 자 기업의 상황에 맞는 적절한 운영방안을 가지고 있지 못하다. 따라서 본 연구에서는 기업으로부터 획득할 수 있는 실제 데이터(주문 수와 주문량, 전환비용 및 에너지 사용 비용 등)를 기반으로 시뮬레이션모형을 개발하고 분석을 수행하였다. 시뮬레이션모형은 MS사의 엑셀을 기반으로 하는 스프레드시트 시뮬레이션 소프트웨어인 @RISK 8.2와 오피스 365를 활용하였다. 시뮬레이션 루틴은 Table 1과 같이 3단계의 흐름으로 볼 수 있다.

분석 초기에 주문이 많아 당일 생산이 불가한 경우와 주문의 계절적 변동을 반영하기 위해 1개월(30일)을 모형으로 설계하였지만, 주문에 대한 일별 기록이 구체적으로 보존되어 있지 않아 본 연구에서는 주문의 계절 변동을 고려하지 못하였다. 후속 연구에서는 추가적인 자료 확보와 분류를 통해 계절 또는 분기별 주문 변동성을 반영한 연구를 진행할 계획이다.

시뮬레이션 시행의 대략적인 절차는 Table 1에 소개되어 있다.

Table 1. Simulation Procedure

Step	Details	Method	Tools
1	Data preprocessing	Manipulate raw data Assign product family	Microsoft Excel
2	Create total daily order number/order list	Order frequency data in step 1	Microsoft Excel, @RISK 8.2
3	Sort by production discipline	Generated order list in step 2	
4	Search order volume and related data	Sorted order number in step 3 Find the corresponding volume data in step 1.	
5	Assign machine and Update production capacity	Order volume in step 4 Updated machine condition Transfer unfulfilled orders to next day	
6	Identify order type and machine number	Order type data in step 4 Running machine number in step 5.	
7	Calculate the transition cost	Search transition cost based on the types of current and next orders in transition cost table	
8	Net profit calculation	Calculate profit based on the production costs and price in step 1 and the transition cost in step 7	

3.1 주문 데이터

구체적인 세부 자료(주문 고객, 주문량, 주문 규격 등)가 남아있는 공장(XLBZ)의 2020년 2월부터 12월까지 11개월의 주문 관련 데이터를 분석에 사용하였다(Fig. 2). 과거 11개월 동안의 총 주문 건수는 수만 개에 이르며, 종류별로는 약 4,000여 가지가 된다. 계산의 복잡성을 감소시키기 위해 주문 중 연간 주문 횟수가 일정 수량 이상인 것들만 고려하였으며, 4,000여 개의 주문들을 다시 54개의 유형으로 분류하였다(Order no.). 각 유형별 주문량으로는 주문 데이터 전처리를 통해 분류된 주문의 최빈값(Order Quantity MODE)을 사용하였다. 비용과 수익을 산출하기 위해 단위당 판매가격과 소모되는 원자재 비용, 전기료, 수익을 각 주문 유형별로 정리하였다. 또한 주문 빈도를 유형별로 분류하여 각 주문 유형별 빈도수(frequency)를 계산하였다.

Order no.	Customer Company	PF1	PF2	Order Quantity (kg) MODE	Frequency	Selling price per unit (kg/₩)	Material cost per unit (kg/₩)
1	customer 1	1	3	2486.80	107	9.01	7.18
2	customer 1	2	2	961.70	119	9.20	7.40
3	customer 1	3	1	1153.30	64	9.48	7.40
4	customer 1	4	4	769.80	29	9.59	7.50
5	customer 1	5	5	384.60	23	17.30	12.00
6	customer 2	1	1	2689.80	98	9.05	7.00
7	customer 2	2	3	949.50	112	9.37	7.50
8	customer 2	3	2	1289.10	73	9.51	7.48
9	customer 2	4	4	769.90	84	9.63	7.60

Fig. 2. Order Data(partial)

3.2 군집화

군집화(clustering)를 통해 전환생산 시 발생하는 전환 비용을 감소시킬 수 있다. 색조는 매우 중요한 품질 요인

의 하나인데, 색이 있는 필름 생산에 필요한 컬러 마스터 배치(color master batch)의 핫멜트(hot melt) 냉각 속도는 투명 원자재에 사용되는 마스터 배치의 핫멜트 냉각 속도와 다르며(Kondratov et al., 2019), 용융 과정에서 컬러 마스터 배치와 일반 폴리에틸렌(polyethylene)의 융합 공정은 폴리에틸렌 및 기타 첨가제의 융합 공정과 다르다(Chen, 2016). 따라서 색상이 있는 제품을 함께 모아 생산하거나 유사한 색상 간에 전환 생산할 때 비교적 낭비가 적고 더 효율적으로 생산할 수 있다.

고분자 화학 분야의 연구와 공장 관리자와 기술 관리자와의 조연에 따라 제품들을 2가지 군집기준, 색상(군집 기준1), 용도(군집 기준2)으로 분류하였다.

기준 1(Table 2)에 따르면, 1번 제품은 일반 투명필름으로 특수한 요구 사항이 없는 제품을 포장할 수 있다. 2번 제품은 색상(통상적으로 유백색)이 있으면 일반 제품을 포장할 수 있는 필름이다. 3번 제품은 투명 제품으로 특수한 요구 사항이 있는 필름이다. 4번 제품은 색상이 있으며 특수한 요구 사항이 있는 필름이다. 5번 제품은 부가가치가 가장 높고 고객화 정도가 높은 제품인 동시에 기술 요구도가 가장 높은 특정 제품이다.

Table 2. Product family 1(PF1)

PF1-1	Transparency film
PF1-2	Colored film (e.g. milky white film)
PF1-3	Transparency film with special requirements
PF1-4	Milky white film with special requirements
PF1-5	Specific products with the highest added value

기준 2(Table 3)에 따르면, 1번, 2번, 3번 제품은 각각 식품 포장용 필름, 의약품 포장용 필름, 위생용품 포장용 필름이다. 4번 COVER와 생활용품 포장용 필름은 일부 유제품의 덮개 필름 혹은 기타 보호용 필름 제품이며 세제와 비슷한 생필품 포장도 가능하다. 5번 제품은 기준 1과 같은 부가가치가 가장 높고 고객화 정도가 높은 제품인 동시에 기술 요구가 가장 높은 특정 제품이다. 고객화 정도가 매우 높은 제품이기 때문에 더 세분화 분류하기는 어렵다.

Table 3. Product family 2 (PF2)

PF2-1	Film for food packaging
PF2-2	Films for pharmaceutical packaging
PF2-3	Film for packaging sanitary products
PF2-4	Film for packaging of covers and household goods
PF2-5	Specific products with the highest added value

3.3 제안된 작업 우선순위

군집화 기준(기준 1, 기준 2)에 따라 주문 유형을 5가지씩 분류하면 한 가지 군집 기준에 대해 최대 $120(=5!)$ 가지, 두 가지 군집 기준에 대해 총 $240(=2*5!)$ 가지의 작업 우선순위를 비교하여야 한다. 비교해야 할 우선순위의 경우의 수가 매우 많아 실험의 복잡성 감소와 실험 결과의 실행 가능성을 높이기 위해, 관리자 및 현장 경험이 많은 근무자와의 인터뷰를 진행하였다. 그들로부터 운영 방식의 복잡성과 원재료의 낭비를 고려하여 실행 가능성이 높다고 판단된 다음 3가지 작업 우선순위를 제안받았다.

제안된 작업 우선순위는 군집기준 1에서 12345와 13245, 군집기준 2에서 32415이다. 따라서 본 연구에서는 이들 3가지 작업 우선순위와 현재 사용 중인 주문 접수순(선착순)을 비교·분석하였다. 같은 군집 내의 작업 우선순위는 주문량이 적은 순으로 작업 우선순위를 배정하였다. 이는 주문량이 적은 주문부터 생산하면 기계가 안정되기까지 시간이 상대적으로 짧고 문제 발생 시에 보다 빠르게 대처할 수 있어 큰 손실을 초래할 가능성이 낮기 때문이다.

3.3.1 군집기준 1: PF1-12345

작업 우선순위 12345가 선택된 이유는 앞서 언급한 화학 분야의 연구 결과에 따라 유사한 색상의 제품들이 상대적으로 전환이 빠르고 낭비가 적음에 있다. 1번 제품은 투입되는 원료의 종류가 가장 적고, 2번 제품은 기본

원자재와 함께 색상 첨가제가 일정 비율로 투입되어야 한다. 3번 제품은 투입 원자재 종류가 상대적으로 많으며, 4번 제품은 투입 원자재 종류가 많고 색상 첨가제도 투입되어야 한다. 5번 제품은 가장 많은 종류의 원자재를 필요로 하고 요구되는 기술 수준이 높다. 원자재의 투입이 단순한 것에서 복잡한 것으로 생산이 진행됨에 따라 기계의 상태가 더 안정되고 상대적으로 단순한 제품에서 복잡한 제품으로 전환될 때 품질도 더 안정적이다.

3.3.2 군집기준 1: PF1-13245

작업 우선순위 13245가 선택된 이유는 앞서 설명한 12345의 경우와 유사하며 1번과 3번은 같은 색상 제품으로 전환 생산할 때 기술적인 요구가 상대적으로 더 낮고, 모든 생산팀이 작업할 수 있기 때문이다.

3.3.3 군집기준 2: PF2-32415

작업 우선순위 32415가 선택된 이유는 3번 제품은 물티슈, 휴지 등과 비슷한 위생용품 포장 필름으로 기술 요구가 낮다. 2번 제품은 의약품 포장 필름으로 공장 생산 현장에 대한 위생에 대한 요구는 높지만, 생산과정에서의 어려움은 적은 편이다. 4번 제품은 cover와 생활용품 포장 필름으로 종류가 많고 특정 사양에 대한 요구가 많아서 요구되는 기술 수준이 상대적으로 높다. 1번 제품은 식품 포장 필름으로 식품의 종류가 다양하고 식품의 특성에 따라 구체적 요구 사양이 다르다. 예를 들어, 뼈가 있는 식품을 담으면 포장 필름이 튼튼해야 하며 촉감은 부드러워야 한다. 어떤 제품은 고온 상태로 포장되지만 냉동 보관해야 할 때는 필름이 고온 내성과 저온내성이 모두 필요하다. 5번 제품은 기준 1의 5번과 같은 제품으로 고객화 정도가 높고 가장 많은 종류의 원자재 필요하며 기술 요구가 높으므로 마지막에 생산하는 것이 더 효과적이다.

3.4 주문 생성

주문 데이터에 따르면 일별 주문 수는 20개를 넘지 않고 평균은 12개이므로, 일별 발생 주문 수는 절단된 포아송 분포 함수(=RiskPoisson(12, RiskTruncate(0,20)))를 이용하여 20개를 넘지 않도록 생성하였다. 각 주문의 유형은 유형별 빈도수에 대한 비율을 이용한 이산분포 함수(=RiskDiscrete())를 사용하여 실제 주문 분포가 잘 반영되도록 하였다.

Fig. 3은 생성된 일별 주문 수와 주문 번호를 보여주고 있다. 그림에서 생성된 주문번호가 중복되기도 하는데 이

는 고객이 하루에 같은 제품을 반복 주문한 것이 아니라 다른 종류의 제품이지만 유형 분류에 따라 동일한 주문 번호로 분류 처리된 경우이다.

Average number of orders per day		12						
Time/Day	1	2	3	4	5	6	7	
Number of orders	12	14	10	13	16	8	10	
1	28	23	36	43	2	44	42	
2	22	46	34	31	33	19	25	
3	1	32	26	16	34	17	11	
4	17	22	44	23	22	22	42	
5	47	40	12	12	45	43	27	
6	27	19	39	28	2	10	29	
7	9	10	46	46	7	16	53	
8	50	17	1	34	1	18	38	
9	41	39	9	31	26		24	
10	13	39	41	18	4		30	
11	46	14		18	8			

Fig. 3. Generated number of daily order and no.(partial)

3.5 군집기준에 따른 정렬

작업 우선순위의 비교를 위해 생성된 일간 주문(주문 번호)을 추가 정렬 없이 작업순서를 배정하면 현행의 선착순 순위를, 엑셀의 =SORTBY() 함수를 이용하여 제안된 3가지 군집기준 각각에 따라 정렬하여 순위를 재배정하면 제안된 군집기준에 맞는 작업 우선순위를 얻을 수 있다(Fig. 4). 현재 정렬 함수인 =SORT()와 =SORTBY() 함수는 오피스365에서만 제공된다.

day1 Sort by product family				day2 Sort by product family			
Product family	PF ranking	Product family	PF ranking	Product family	PF ranking	Product family	PF ranking
36	24	53	2	31	10	39	3
41	31	39	3	52	32	16	4
17	18	11	8	16	4	43	5
12	15	22	14	54	21	31	10
29	34	12	15	21	11	21	11
39	3	2	17	44	23	22	14
11	8	17	18	50	52	17	18

Fig. 4. Sort by product family and sequence(partial)

3.6 비용 및 순이익 계산

수익계산에서 매우 중요한 부분이 전환비용이다. 전환비용은 전체 순이익에 미치는 영향이 큰 것으로 판단되어 이전부터 전환생산이 일어날 때마다 전환에 따른 낭비량(생산기계를 통해 측정 가능)을 근무자가 기록해 왔으며, 기록된 낭비량과 투입 원재료의 단위당 가격을 이용하여 기기별 전환비용의 산출이 가능하다. 본 연구에서는 이미 산출되어 있는 전환비용 자료를 그대로 사용하였다.

Table 4은 전환생산의 유형을 소개하고 있으며, 각 군집 제안의 전환비용은 Table 5와 Table 6에 나와 있다. 전환비용은 기계와 전환 유형에 따라 다르다. 엑셀 모형

에서 각 기계의 운전상태에 따라 해당 전환비용을 찾고 확인하는 과정이 필요하다(=MATCH(), =INDEX() 함수 활용).

본 연구에서는 주문 데이터에 있는 다양한 비용 자료로부터 방안별로 월간 수익, 전기요금, 전환비용, 기계 예열비용 등 셋업 비용과 월별 고정운영비(점검과 유지비용 등)를 통해 공장의 월간 순이익을 계산하였다.

Table 4. Transition type of PF1 and PF2

transition path	transition type (PF1)	transition type (PF2)
1 → 1	S	S
1 → 2	C	IFM
1 → 3	SP	IFP
1 → 4	SC	IFL
1 → 5	SF	STF
2 → 1	C	IFM
2 → 2	S	S
2 → 3	SC	THI
2 → 4	SP	ILH
2 → 5	SF	STM
3 → 1	N	IFP
3 → 2	C	THI
3 → 3	S	S
3 → 4	SC	ILH
3 → 5	SP	STP
4 → 1	C	IFL
4 → 2	N	ILH
4 → 3	SC	ILH
4 → 4	S	S
4 → 5	SP	STL
5 → 1	N	STF
5 → 2	C	STM
5 → 3	S	STP
5 → 4	SC	STL
5 → 5	S	S

※ S: same transition, N: normal transition, SP: special transition, C: color transition, SC: special color transition, SF: specific transition, SM: same transition, IFL: item transition - food & living, IFM: item transition - food & medical, IFP: item transition - food & personal care, THI: transition of health item, ILH: item transition - living & health, STF: specific transition - food, STM: specific transition - medical, STP: specific transition - personal care, STL: specific transition - living

Table 5. Transition type and transition cost for each machine (PF1)

Transition production type	Cost by conversion type (PF1) (according to machine number) (unit: yuan)				
	M1	M2	M3	M4	M5
N	75	70	90	83	95
C	115	98	133	123	156
SP	87	79	97	91	106
SF	98	92	113	97	128
S	23	23	28	25	30
SC	143	138	167	146	197

※ The above content is the name of the process by which one product is converted into another product when transition production. The name is defined by the factory.

Table 6. Transition type and transition cost for each machine (PF2)

Transition production type	Cost by conversion type (PF1) (according to machine number) (unit: yuan)				
	M1	M2	M3	M4	M5
IFL	97	80	118	105	138
IFM	82	77	97	90	102
IFP	115	98	133	123	156
S	23	23	28	25	30
THI	75	70	90	83	95
ILH	80	75	95	88	100
STF	99	82	120	107	140
STM	104	98	125	112	145
STP	143	138	167	146	197
STL	134	129	158	137	188

※ The cost data are all from the factory workshop. M1, M2, M3, M4, M5: machine number

4. 결과분석

4.1 시뮬레이션 결과

현재 사용 중인 주문 접수순(FIFS)과 제안된 3가지 작업 우선순위(PF1-12345, PF1-13245, PF2-32415)를 비교하기 위해 동일한 난수를 사용하였으며, 시뮬레이션 실행을 5,000회 수행하였다. 시뮬레이션 실행에는 실행 전 준비시간(@RISK의 smart sensitivity 기능이 켜있는 경우) 20분을 포함하여 약 70분 소요되었다.

Table 7. Simulation results

Iterations: 5000 times					
Sequence	FIFS (current priority method)	PF1 (product family 1)		PF2	
	First come first served	12345	13245	32415	
Total Profit					
Mean	553068	567945	571000	558092	
Std.	32461.8	32976.6	32950.9	31816.3	
Confidence Interval					
95%	Lower	552168	567030	570086	557209
	Upper	553968	568859	571913	558974
Percentile					
5%	499938	513879	516980	506155	
10%	510790	524588	527830	516754	
25%	530910	545729	548713	536391	
50%	553397	567930	571131	558200	
75%	575645	590892	593861	579878	
90%	593775	609460	612671	598634	
95%	605591	621541	624697	610361	

Table 7은 각 작업 우선순위에 따른 평균 월간 순이익에 대한 시뮬레이션 결과이다. 순이익 값의 계산에 인건비, 발주비용, 공장건물, 감가상각비 등 작업 우선순위 결정에 관련이 없는 비용은 포함되지 않았다. Table 7의 각 작업 우선순위별 순이익에 대한 95% 신뢰구간을 보면, 작업 우선순위 “PF1-13245”가 가장 큰 순이익을, 그다음으로 “PF1-12345”, “PF2-32415”의 순서이고, 마지막으로 “주문 접수순(FIFS)”이 됨을 알 수 있다. 각 신뢰구간의 겹침이 없기 때문에 우선순위로 유의한 차이가 있는 것으로 볼 수 있다. 또한 분산분석 결과(유의수준 5%)로부터 4가지 작업 우선순위에 따른 평균 순이익이 유의한 차이를 보임을 알 수 있다(Table 8).

4.2 최적 선택 가능성

시뮬레이션 결과로부터 제안된 3가지 작업 우선순위 모두가 유의미하게 나왔으며, 그중 “PF1-13245”를 작업

Table 8. ANOVA table

Anova: Single Factor						
SUMMARY						
Groups	Count	Sum	Average	Variance		
FIFS	5000	2765340844	553068.1689	1053767085		
PF1-12345	5000	2839722939	567944.5877	1087453054		
PF1-13245	5000	2854997614	570999.5227	1085764650		
PF2-32415	5000	2790457817	558091.5634	1012278624		
ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1.05138E+12	3	3.50461E+11	330.6808389	1.3936E-209	2.60535323
Within Groups	2.11921E+13	19996	1059815853			
Total	2.22435E+13	19999				

우선순위 방안으로 선택하는 것이 가장 큰 순이익 증가를 가져올 수 있다.

Table 9은 5000회의 시뮬레이션 수행에서 각 작업 우선순위 방안이 가장 큰 순이익을 낸 확률로, 순이익에 대한 평균 크기를 비교하는 대신에 시뮬레이션 시행마다 가장 큰 순이익을 낸 작업 우선순위 방안의 비율(가장 좋은 방안이 된 경우의 수)을 의미한다. 결과에 따르면 4개의 작업 우선순위 중 PF1-13245가 가장 월등한 성과를 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 9. Probability of the best one

Sequence	FIFS	PF1-12345	PF1-13245	PF2-32415
Probability of the best one	0.0006	0.0090	0.9882	0.0022

4.3 현실적 운영방안 추천

PF1-1번 제품에서 PF1-2번 제품으로의 전환생산은 컬러 마스터 배치만 추가하는 경우가 대부분이다. 반면에 PF1-1번 제품에서 PF1-3번 제품으로의 전환생산은 고객의 요구 사양과 제품 레시피에 따라 해당 원자재를 투입해야 한다. PF1-3번 제품에서 PF1-4번 제품으로의 전환생산은 컬러 마스터 배치를 먼저 투입하고 두께와 크기만 조정하면 되는 경우가 있다. 상대적으로 PF1-1번 제품에서 PF1-2번 제품으로의 전환생산이 더 쉽고 낮은 숙련도를 필요로 한다고 할 수 있다. 따라서 수익 차이가

크지 않기 때문에 공정의 난이도와 작업의 숙련도를 고려한다면, PF1-12345 작업 우선순위 기준을 먼저 적용하고, 향후 작업자의 숙련도 향상에 따라 PF1-13245 작업 우선순위를 적용하는 것이 바람직할 것이다.

수익관점에서 작업 우선순위 PF2-32415가 PF1-12345와 PF1-13245보다 낮지만, 계절성을 고려한다면 더 좋은 방안이 될 수 있다. 현장 전문가는 언제나 계절성을 갖는 제품(마스크, 핫팩 등)이 있고 그러한 제품에 대한 대량 주문이 단기간에 발생할 수 있기 때문에 제품 용도에 따른 PF2-32415 순서로 작업 우선순위를 하는 것이 더 효과적인 경우도 있다고 조언하고 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구는 포장용 플라스틱 필름 제조산업을 대상으로 제품 군집화를 통해 전환비용의 감소를 이루고 수익을 증가시키는 적용 가능한 작업 우선순위 방안을 제시하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 제안된 우선순위 방안은 현재까지 사용되어 온 주문접수 순과 비교하여 수익개선이 크지는 않지만, 추가 투자 없이 운영방식의 변화만으로 얻은 (통계적으로 유의한) 순이익 증가를 보여주고 있다. 한편 2021년 12월부터 공장은 방안 PF-12345를 임시로 채택하여 운영 중에 있으며 전월(2021.11.01~ 2021.12.01) 대비 순이익이 월 9,871위안(185만원) 증가하였다.

보다 장기적이고 구체적인 자료를 활용하여 제품 수요

의 계절성과 생산에 필요한 원자재 및 에너지 비용에 대한 계절성을 함께 고려한 작업 우선순위 방안에 대한 연구도 흥미로울 것이다.

References

- @RISK (2021) <http://www.palisade.com/risk> (Accessed July 9, 2019).
- Chen, J. (2016) “Modified Yttrium Hydroxide/MC Nylon Nanocomposites and Scaling Effects in Multilayer Polyethylene Films”, University of South Florida.
- Chen, W.-G. (2019) “Annual Report on Plastic Film Manufacturing”, China Foresight Industry Research Institute, vol. 3, No. 6, pp. 368-374.
- Cheng, Q. (2020) “Packaging industry with a long way to go”, China New Era, vol. 10, No. 2, pp. 42-45.
- Choi, Y.-H. and S.-J. Hwang (2019) “Design of a simulation model for the establishment of a production plan of the order production method: Focusing on the plate glass manufacturing process”, Journal of Industrial Management Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 64-73.
(최용희, 황승준 (2019) “주문생산 방식의 생산계획 수립을 위한 시뮬레이션 모델 설계 : 판유리 제조 공정을 중심으로”, 산업경영시스템학회지, Vol. 42, No. 1, pp. 64-73.)
- Gopura, R. and T. Jayawardane (2012) “Analysis, Modeling and Simulation of a Poly-Bag Manufacturing System”, Engineering, Vol. 4, No. 5, pp. 256-265.
- Joo, C. M. and B. S. Kim (2012) “Genetic Algorithm with an Effective Dispatching Method for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Sequence Dependent and Machine Dependent Setup Times”, IE interfaces, 25(3), pp. 357-364.
(추철민, 김병수 (2012), “작업순서와 기계 의존적인 작업준비시간을 고려한 이종병렬기계의 일정계획을 위한 효과적인 작업할당 방법을 이용한 유전알고리즘”, 산업공학, 25(3), pp. 357-364.)
- Kim, E. (2019) “A study on the optimization of energy consumption efficiency and the integrated implementation of production sequence, production speed and order acceptance control in a custom-made manufacturing system with multiple customer groups”, Journal of the Korean Society for Production Management, Vol. 30, No. 4, pp. 391-405.
(김은갑 (2019) “복수고객 군을 갖는 주문생산 제조 시스템에서 에너지소비효율 최적화와 생산순서, 생산속도 및 주문수용 통제의 통합 구현에 관한 연구”, 한국생산관리학회지, Vol. 30, No. 4, pp. 391-405.)
- Kondratov, A. P., V. Yakubov, V. and A. A. Volinsky (2019) “Recording digital color information on transparent polyethylene films by thermal treatment”, Applied optics, Vol. 58, No. 1, pp. 172-176.
- Li, C.-H., J. He, X.-Y. Wang, Q. Bao, S.-J. Gao and Y.-X. Zhang (2017) “The influence of POE on the properties of PET extrusion blown film”, Engineering Plastics Application, Vol. 45, No. 7, pp. 107-110.
- Ma, Y. (2013) “Analysis of the basic contradictions and countermeasures in the packaging industry”, Oriental Corporate Culture, vol. 12, No 5, pp. 204-213.
- Nakahashi, J. and Y. Ozaki (2007) “Eco-efficiency analysis on the treatment of plastic containers and packaging”, Research Presentation of the Waste Society, vol. 18, pp. 89-90.
- Qiu, M.-M. and E.-E. Burch (1997) “Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, multi-machine environment”, International Journal of Production Research, vol. 35, No. 11, pp. 3023-3042.
- Yalaoui, F. and Chu, C. (2003), “An efficient heuristic approach for parallel machine scheduling with job splitting and sequence-dependent setup times, IIE Transactions, 35(2), pp. 183-190.
- Zhang, Y.-X. and T. Yang (2021) “Thinking on the construction of plastic packaging waste classification, collection and management system”, China Plastics, Vol. 35, No. 8, pp. 21-32.



유형기 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0344-1819> / liujiongkai@naver.com)

2016 경희대학교 회계세무학과 학사
2020~ 현재 경희대학교 일반대학원 경영학과 석사과정

관심분야 : 생산관리, 생산전략, 품질경영, 시뮬레이션 응용



서동원 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3894-4691> / dwseo@khu.ac.kr)

1991 성균관대학교 산업공학과 학사
1996 성균관대학교 대학원 산업공학과 석사
2002 Georgia Institute of Technology, 산업시스템공학 박사
2003~ 현재 경희대학교 경영대학 경영학과 교수

관심분야 : 확률과정론, Series Expansion, (Max,+)-algebra, 시뮬레이션 응용, 수익경영