Korean Chem. Eng. Res., 58(2), 209-223 (2020)
https://doi.org/10.9713/kcer.2020.58.2.209
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

화학 산업에서 수학적 최적화 기법을 적용한 사례

김은용 · 허순기† · 이규황 · 이호경

LG화학 기술연구원 미래기술연구센터
34122 대전광역시 유성구 문지로 188
(2020년 1월 29일 접수, 2020년 3월 13일 수정본 접수, 2020년 3월 23일 채택)

Applications of Mathematical Optimization Method for Chemical Industries

Eun-Yong Kim, Soon-Ki Heo†, Kyu-Hwang Lee and Hokyung Lee

Future Technology Research Center LG Chem. Ltd., 188 Moonji-Ro, Yuseong-gu, Daejeon 34122, Korea
(Received 29 January 2020; Received in revised form 13 March 2020; accepted 23 March 2020)

요 약

석유화학 제품, 컴파운드(Compound), 전지, IT 소재, 첨단소재, 제약 등 다양한 제품 군의 사업을 보유하고 있는 화학 회사에서 각 사업 부분에 있어 수요 예측, 물류, 생산, 재고, 원재료 공급의 SCM (Supply Chain Management)은 사업의 손익과 직접적으로 연결되기 때문에 그와 관련된 최적화와 시스템 역량 수준은 매우 중요하다. 본 연구는 다양한 사업 군에서 각각의 SCM이나 비효율적 영역을 개선하는 등의 역량을 고도화하기 위해 원재료를 공급하고, 제품을 생산하기 위한 공급/생산 계획 등에 있어서 수학적 최적화 방법을 적용한 사례에 관하여 다룰 것이다. 그리고 학술적인 연구에 그치는 것이 아니라 계획 수립 담당자가 실제로 자신의 일부 업무에 활용하는 것이 중요하므로 이를 위해 추가적으로 필요한 사항들을 서술하였고 각각의 적용 성과를 표현하였다. 소개가 될 사례의 첫 번째에서는 편광판 생산에 있어서 원재료 로스(Loss)를 최소화하는 것을 기반으로 하는 공급계획 최적화, 최적 손익 사업 운영계획, 편광판 연신 생산 공정의 스케줄(Schedule) 최적화를 다룰 것이다. 두 번째 사례로는 PO (Poly Olefin) 공정의 생산성 극대화를 위한 생산/포장계획 최적화에 관하여 다룰 것이고, 세 번째 사례로는 전지 생산에 있어서 전극 모델 교환을 최소화 시키는 생산계획 최적화에 대해 다룰 것이다. 네 번째로는 석유화학 특성상 선박으로 대부분의 원료 입하 및 제품 출하를 하기 때문에 한정된 부두에 여러 가지 원료 입고와 제품 출하를 위한 선박이 접안 하는 일정을 최적화 한 사례를 다룰 것이며, 마지막으로 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 반제품 생산에 있어서 제품 Change를 최소화 하는 생산계획 최적화를 다룰 것이다.

Abstract – Executions of SCM in a chemical company of which divisions produce petrochemicals, compounds, batteries, IT material and medicine directly affect their own profit. Execution level of SCM or optimization is very important. This work presents activities of SCM and optimization of inefficient issues in several industrial divisions using mathematical optimization method. The meaning is not only academic research but also making a useful tool which active partner deals with in his work. It is explained how to do *beforehand and afterward* optimization problem. The benefits are mentioned in the sections. The first of examples would be cover supply plan optimization, optimal profit business plan, and scheduling of a stretching process of polarizer based on minimizing raw material loss in polarizer production. The second example would be cover the optimization of production/packaging plans to maximize productivity of Poly Olefin processes, and the third example is minimization of transition loss in the production of battery electrodes. The fourth example would be cover scheduling of vessel approaching to berth. Because transportation of large portion of raw material and products of petrochemical industry is dealt with vessel, scheduling of vessel approaching to berth is important at the shore of large difference of tide. The final example would be scheduling problem to minimization of change over time of ABS semi products.

Key words: SCM, Chemical Company, Mathematical Optimization

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sklight@lgchem.com
‡이 논문은 POSTECH 이인범 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

글로벌 시장에서 경쟁이 심화되고, 시장 경쟁에서 우위에 있기 위해 원가를 절감하려는 노력으로 Supply Chain은 더욱 복잡하고 긴밀해 졌다. 따라서 제조업에 있어서 수요 예측, 물류, 생산, 재고, 원재료 공급의 SCM은 사업의 손익과 직접적으로 연결되며, 그 역량 수준은 매우 중요하다. 학술적으로 많이 연구되어 온 공급계획, 생산계획 및 더 나아가 전체 Supply Chain에 수학적인 최적화 이론이 실제로 현장에 적용 되고 있다. 특히 비용 절감과 이익 극대화를 위하여 최적의 공급계획 및 생산계획, 최적의 운송망 수립, 최적의 제품-설비 조합 등에 대한 분석이 중요한 관심사로 되고 있다. 수학적 최적화 방법을 통하여 일정 계획을 수립하는 스케줄링(Scheduling) 문제를 비롯하여 플래닝(Planning)의 관점에서 사이트간 공장 건물간 물류 이송 비용을 최적화하는 이슈들은 실제로 제조회사에서 절실하게 필요로 하고 있는 부분이다. 그에 비하여 실제 업무에서는 선임자에게 배운 대로 또는 경험적인 판단을 통해서 결정하고 실행하기 때문에 비효율적인 요소가 많이 있다. 또한 물류 이송을 실행하는 사업장 등 물류 허브를 보유한 회사 외에는 최적화된 상용 시스템을 보유하거나 최적화 개념을 제대로 활용하는 회사는 많지 않은 게 현실이다. 수학적 최적화 시스템 정의를 위해서는 최종 제품, 중간 제품뿐만 아니라 원재료까지 포함하는 전체 사업의 구조와, 제품의 특성에 따라서 수많은 경우의 수들이 발생하므로 수식으로 모형화 할 때 그 구조와 업무의 특성을 잘 파악하고 변수들을 정의해야 한다. 수학적인 최적화 이론은 원재료 공급, 생산, 운송, 물류 부분의 전 SCM에 적용되고 있고, 계층적인 수준으로 중장기 계획(Strategic), 단기 계획(Tactical), 실행계획(Operational)의 전 범위에 걸쳐 활용 가능하지만, 실제로는 명문화된 데이터의 부재와 입력해야 할 마스터 정보가 너무 많거나 고객의 수요 계획처럼 자주 변한다거나 하는 이유로 시스템을 갖추고 있어도 실제로는 사용하지 않는 사례가 많이 있다.

본 연구는 생산 현장에서 실제로 필요한 부분까지 개발 범위에 포함하여 최적화의 개념이 부족한 사람들도 편리하게 활용할 수 있도록 구성한 시스템 사례를 소개하고자 한다. 수학적 모형화 자체는 2000년대에 발표된 학술지[1-5] 수준으로도 충분하도록 정의했기 때문에, 그리고 민감한 정보 등의 노출을 조심해야 할 필요가 있기 때문에 자세한 설명들은 생략할 수 있음을 독자들이 이해해줄 것이라 생각한다.

2. 편광판 생산의 원재료 로스 최소화

편광판은 TV, Notebook, Mobile, Tablet 제품과 같은 디스플레이(Display) 패널의 중요한 부품으로써 흡수축이라고 하는 제품 특성이 서로 직교하도록 하나의 디스플레이 패널에 두 개의 편광판 완제품이 공급될 수 있게 판매된다. 편광판 생산 공정은 Fig. 1과 같이 롤(Roll) 형태의 원재료에 편광특성을 부여하는 연신, 코팅, 라미 공정의 전공정과, 편광 특성을 부여한 롤 형태의 반제품을 타겟이 되는 디스플레이 패널의 사이즈로 가공하는 재단, 출하 공정의 후공정으로 나뉠 수 있다.

여기서 전공정에서 후공정으로 진행되는 재단공정에서는 SCM 상의 이슈가 생기는데 이는 제품으로 재단하는 과정에서 원재료 로스가 발생하는 것과 제품의 수량 단위가 변경되는 것이 주요 이슈이다.

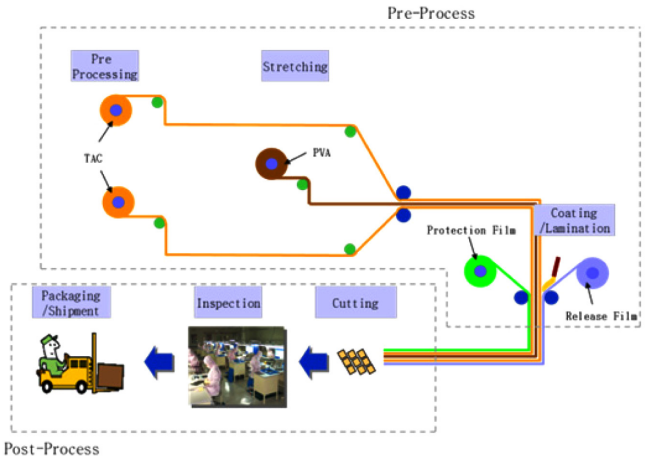


Fig. 1. Polarizer Manufacturing Process.

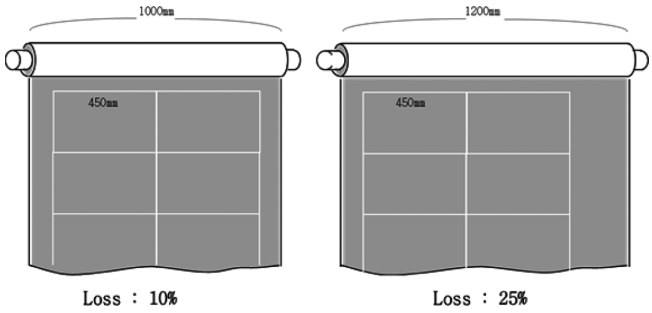


Fig. 2. Raw material Loss in Polarizer Cutting Process.

롤 형태의 원재료의 폭이 다양하고, 그로부터 재단되는 제품의 사이즈가 다양하기 때문에 제품 사이즈 별 최적 롤 원재료 폭이 존재한다. 또한 원재료 로스를 극소화 시키기 위한 방법으로 하나의 롤 원재료에 동일 특성을 가지는 두개의 서로 다른 사이즈 제품을 복합하여 재단하는 경우도 있는데 이러한 복합 재단을 이용하면 로스 발생을 줄일 수 있으나, 두 제품의 수요의 비율이 복합 재단을 통해 나오는 비율과 일치할 때 그 효과를 극대화 할 수 있고 그렇지 않은 경우에는 둘 중 하나의 제품은 재고로 쌓여 재고비용을 발생시킬 수 있다. 따라서 수요에 따른 최적 원재료 공급계획 및 생산계획은 원재료 로스와 밀접하게 연계되어 있고, 이러한 계획을 고도화하기 위해 중장기 계획(Strategic), 단기 계획(Tactical), 실행계획(Operational)의 전 범위에 걸쳐 수학적 최적화 기법을 활용하고 있다.

2-1. 편광판 공급계획 최적화

편광판 수요에 따라 단일재단 및 복합재단을 고려한 수요를 만족하면서 로스를 최소화 하는 최적의 원재료 공급계획을 수립하기 위한 수리모형 개발하였고 그 목적함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min.} & W_1 \cdot \sum_{d \in Dem} \text{shrt}_d + W_2 \\ & \cdot \Big(\sum_{\{s \in S\}} \text{combB}_s \cdot \text{SLoss}_s \cdot \text{Qty}_s \cdot \text{Width}_w \\ & + \sum_{\{m \in M\}} \text{combB}_m \cdot \text{Loss}_m \cdot \text{Qty}_m \cdot \text{Width}_w \Big) \end{aligned} \quad (1)$$

Shrt 변수는 기간에 따른 수요를 미충족 시키는 수량이다. 제품

하나에 대하여 투입 가능한 경우의 수는 단일 재단에 대해서는 투입 원단 폭의 종류에 따라 존재하고, 복합 재단의 경우에 대해서는 복합 가능한 다른 수요 제품 및 폭의 종류에 따라 가능 하며, 각각 가능한 경우의 수에 대한 로스가 다 다르기 때문에 단일 및 복합 재단의 경우에 따른 로스를 목적 함수에 추가하였다. W_1, W_2는 Multi-Objective 문제로써 수요 미충족량 및 로스에 대한 가중치로 가장 우선시 되야 하는 건 수요에 대한 충족이기 때문에 W_1에 대한 가중치를 크게 가져가도록 적용하였다.

편광판 생산 공정의 특성 상 롤 상태의 반제품이 재단 공정을 진행하면서 칩(Chip) 상태의 사각형 제품으로 변환된다. 이렇게 되면 원재료의 폭과 완제품의 사이즈 및 원재료의 공정 진행방향 대비 완제품이 잘려지는 각도, 즉 흡수축에 따라 생산되는 칩 상태의 제품 개수가 달라지며 또한 발생 되는 로스가 달라진다. 이러한 원단 폭에 따른 원단 길이당 생산 가능한 칩 제품 개수를 삼각함수를 이용하여 조합별로 파라미터(Parameter)를 생성하였고 또한 그 원재료 로스또한 산출하였다. 이는 단일 및 복합 재단으로 가능한 모든 조합에 대해 계산하였고, 이렇게 계산된 원재료 길이당 생산 칩 제품 개수 및 로스를 수식에 반영하여 모형화 하였다. 로스의 경우 위의 목적함수에 적용되며, 원재료 길이당 생산 칩 제품 개수의 경우는 수요 Balance 수식에 적용 되었다.

$$\sum_{\{d\in Dem\}} \mathrm{shrt}_d \geq \sum_{\{d\in Dem\}} \mathrm{DemQty}_d$$

$$-\sum_{k=0}^{t}\Bigg(\sum_{\{s\in S\}} \mathrm{qty}_{s,k}\cdot \mathrm{SPM}_s\cdot \mathrm{SYield}_s + \sum_{\{m\in M\}} \mathrm{qty}_{m,k}\cdot \mathrm{SPM}_m\cdot \mathrm{MYield}_m\Bigg) \quad (2)$$

위 수식에서 수요변수 DemQty 및 부족량 변수 Shrt 변수는 칩 수량이다. 반면 결정변수인 qty변수는 단일재단 혹은 복합재단 조합으로 어떠한 원단을 얼마의 길이만큼 투입할 것인지의 수량으로 단일 재단과 복합 재단 별로 해당 제품이 원재료 길이당 몇 장이 나오는지에 대한 환산자인 SPM_s, SPM_m을 통해 길이가 칩 수량으로 환산된다. 여기서 SYield 및 MYield는 공정 수율이다. 여기에 특정 제품의 가능한 폭 및 가능 가동 라인(Line), 라인 별 Capacity, 원재료 제약, 라인 우선순위, 인증 호기 제약 등의 현장 제약 등을 반영하여 MILP (Mixed Integer Linear Programming) 모형을 구축하였다. 전체 시스템은 사용자가 다양한 Case에 대해 시뮬레이션 할 수 있도록 Excel 기반의 MS-VBA (Microsoft Visual Basic Application)을 활용하여 Interface를 구축하였으며, 수학적 최적화에 대한 해는 CPLEX Solver를 활용한 GAMS (General Algebraic Modeling System) 프로그램으로 도출하였다. 아래 Fig. 3은 공급계획 최적화 UI (User Interface) 화면의 예시로 제품 수요를 기반하여 재고를 할당하고 부족량에 대해 최적 공급계획량을 산출하고 각 제품 별 가능한 단일/복합 조합 및 최적 선택된 조합에 대해 확인 및 수정을 할 수 있도록 되어 있다.

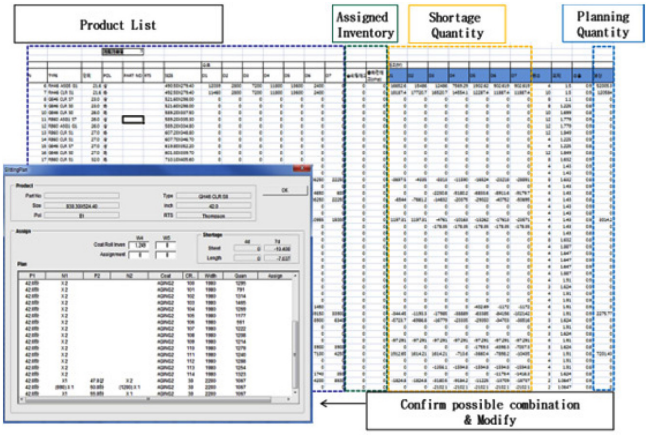


Fig. 3. Example of Supply Planning Optimization UI.

Fig. 4는 공급계획 적용 전후의 공급 계획의 비합리화를 통한 롤 변경 및 이로 인한 로스의 트랜드를 분석한 것이다. 보이는 것과 적용 시점 이후로 로스가 줄어 듦을 확인할 수 있었다. 하지만 계획의 이슈가 아닌 품질의 이슈로 인한 로스 또한 존재하여 적용 이후의 로스가 증가함도 확인하였다.

Set

· Dem: net demand 집합
· t: Timeslot 집합
· S: 단일 재단 조합 집합
· M: 복합 재단 조합 집합

Decision Variables

· qty_x: 단일/복합 조합 x (s or m)의 생산 수량(단위: m)
· combB_x: 단일/복합 조합 x (s or m)이 생산되었는지 여부를 나타내는 Binary 변수
· shrt_d: 수요 d (∈Dem)의 shortage 수량(단위: 장)

Parameters

· DemQty_d: 제품 수요량(단위: 장)
· Winth_w: 롤 w의 폭 길이(단위: m)

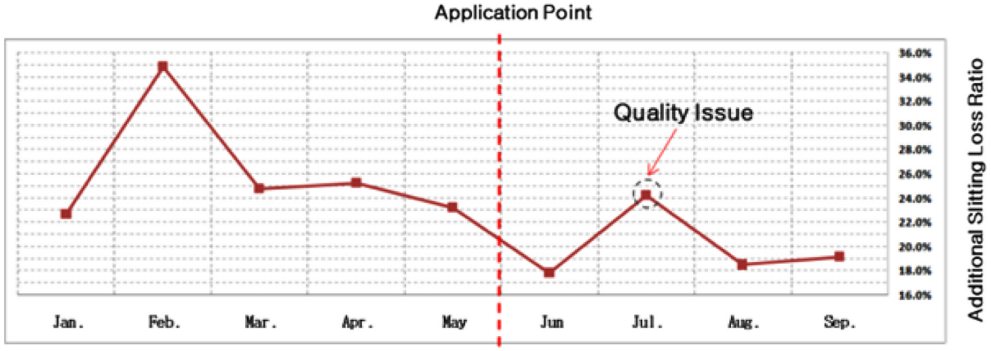


Fig. 4. Changes in Raw Material Loss Before and After Applying the System.

· W: 목적식에 반영할 가중치
· SPM_s: 단일 조합 s의 칩 제품의 m당 생산 가능 장수(단위: 장/m)
· $SLoss_s$: 단일 조합 s의 면적 로스 율(단위: %)
· $SYield_s$: 단일 조합 s의 칩 제품에 대한 통합 수율(단위: %)
· SPM_m: 복합 조합 m의 칩 제품의 m당 생산 가능 장수(단위: 장/m)
· $MLoss_m$: 복합 조합 m의 면적 로스 율(단위: %)
· $MYield_m$: 복합 조합 m의 칩 제품에 대한 대한 통합 수율(단위: %)

2-2. 연신계획 최적화

Fig. 1에 소개한 편광판 제조공정 중에서 TAC (Tri Acetyl Cellulose) 전처리 후 첫 공정인 연신 공정에서는 PVA (Poly Vinyl Alcohol) 필름을 길이방향으로 5배 정도 잡아당긴 후 투과도를 조절하는 과정을 거쳐서 기본 단위가 PVA보다는 훨씬 짧은 TAC 필름을 위 아래 붙여서 PVA을 보호하게 된다. PVA 원재료를 풀고 정상적으로 생산을 시작하기 까지 처음 원재료는 수 백 미터를 흘려야 한다. 원재료 필름을 5배로 잡아당겨서 생산하기 때문에 롤이 끝날 때 다음 원재료 롤을 연결시켜서 연속 생산하는 것이 불가능하다. PVA 잔량이 2천 미터 이상 남아있지 않은 것은 나중에 다시 생산에 투입하기 어렵다. 따라서 한 롤의 PVA는 끝까지 연속 생산하도록 계획을 수립하는 것이 로스를 최소화하면서 연신 생산성을 높이는 중요한 관리 지표가 된다.

연신 반제품은 80여 가지, 그 다음의 코팅 반제품은 500여 가지, 그 다음 라미 공정 반제품은 1,200 종류가 넘고 완제품은 2,000 가지 정도 된다. 다양한 고객에게 납기를 맞추기 위해서 각 공정 담당자들이 수시로 수요와 재고를 점검하고 생산 수율을 관리하여 제품 출하에 차질이 없도록 하고 있는데 여기서 연신 공정 생산계획에 수학적 최적화 시스템을 적용하였다. 연신 이후 패널 면에 점착제를 처리하고 점착제를 보호하는 이형필름을 붙이는 코팅, 패널 바깥 면에 보호필름을 붙이는 라미 공정 및 후공정으로 진행되는데 제품 요구 조건에 따라 점착제와 이형필름이 여러 가지이고 보호필름 또한 여러 가지이다. 최종 제품에 따라서는 연신 반제품은 같은 것을 사용할 수 있으나 코팅이나 라미 반제품은 다른 종류를 필요로 하기도 한다. 공정상 앞 단계의 반제품이 이후 공정으로 갈수록 여러 갈래로 나누어질 수 있다는 의미이다. 따라서 연신 계획 담당자의 하루 업무는 당일 새벽 6시에 집계된 완제품 및 반제품 재고를 파악하는 것으로 시작된다. 출하해야 하는 완제품의 재고와 반제품 재고를 분석해서 라미, 코팅, 연신 반제품 재고로 대응되는 양을 제외하고 순수하게 연신 생산이 필요한 양을 종류별로 산출하는 과정이 선행되어야 한다. 공장에서 생산 정보를 저장하고 모두가 조회할 수 있도록 사용하는 시스템과 개인 PC의 엑셀을 사용하여 이 과정이 한두 시간 정도 소요된다. 이 과정에서 동일 반제품을 여러 개의 완제품에 대응하여 생산할 수 있는데, 반제품의 폭이 다른 경우에는 완제품 재단에서 면적 효율이 달라질 수 있다. 연신 계획은 전공정에 대한 계획이므로 최적의 폭 선택의 이유가 있지만 앞선 예제와 다르게 단위는 모두 길이이다.

연신은 앞서 언급한대로 PVA 롤 한 개가 모두 끝나기 전에 생산을 중단하고 다른 원재료로 교체하는 것은 원재료 로스를 증가시키고 생산성을 많이 저하시키는 것이므로 PVA에 대한 계획을 먼저 최적화하고 그에 해당하는 제품의 상하TAC을 처리하는 연신 계획을 수립하도록 하였다. Fig. 5에 예시를 나타내었는데, A부터 E까지 5가지의 연신 제품의 3주간에 걸쳐 필요한 양이 각각의 사각형 길이로

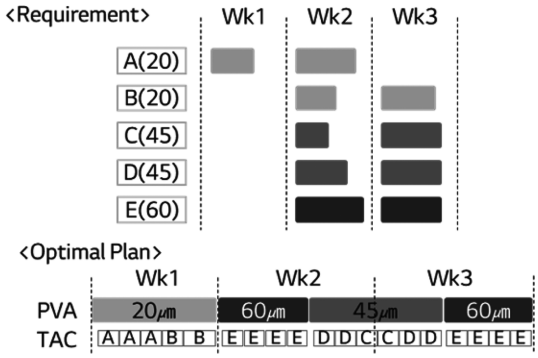


Fig. 5. Example of Stretching Plan Optimization.

표시되었다고 하고, 이때 PVA 두께는 각 제품명에 괄호로 표시된 대로 20, 45와 60 μm 세 종류라고 하자. 그러면 최적의 연신 계획에서는 한 종류의 PVA를 투입하면서 해당되는 제품을 납기에 맞도록 최대한 생산하도록 해야 할 것이다. 실제 계획에 있어서는 작은 양의 PVA를 중간에 투입할 수도 있도록 하였다. 주요 수식을 몇 개만 표현하면 아래의 식과 같다.

$$\mathrm{obj} \geq \sum_{W,V,Wk} \mathrm{vSH}_{W,V,Wk} \tag{3}$$

$$\mathrm{XV}_{W,V,L,K,N} \leq \mathrm{nTAC}_{W,V} \times \mathrm{ZV}_{W,V,L,K,N} \quad \forall (W,V,L,K,N) \tag{4}$$

$$\mathrm{ivP}_{W,V,Wk} = \mathrm{ivP}_{W,V,Wk-1} + \sum_{L,K,N_{\in \Sigma_T KWT_{K,Wk,T}}} \mathrm{XV}_{W,V,L,K,N} - \mathrm{DMv}_{W,V,Wk} = \mathrm{vSH}_{W,V,Wk} \quad \forall (W,V,Wk) \tag{5}$$

$$\sum_K \mathrm{XV}_{W,V,L,K,N} \leq \mathrm{VL}_{W,V} \quad \forall (W,V,Wk) \tag{6}$$

$$\sum_K \mathrm{XV}_{W,V,L,K,N} \geq \mathrm{fVp} \times \mathrm{VL}_{W,V} - \mathrm{bigM} \times \{1 - \mathrm{ZN}_{W,V,L,N}\} \quad \forall (W,V,L,N) \tag{7}$$

여기서 사용된 변수는 목적함수에 합으로 표현되는 PVA 부족량 $vSH_{W,V,Wk}$ 라인 L에서 N번째 PVA를 이용하여 K번째 timeslot에 생산하는 연신 반제품의 폭 W과 PVA두께 V의 생산량 $XV_{W,V,L,K,N}$ 값, 비슷한 의미로 생산할 때 1, 아닐 때 0의 값을 갖는 이진변수 $ZV_{W,V,L,K,N}$ 등이다. 이 문제에서 PVA 투입 계획을 결정한 $ZV_{W,V,L,K,N}$, $XV_{W,V,L,K,N}$ 값을 이용하여 연신 제품의 생산 계획을 수립할 수 있다. 두 번째 수학적 모델의 주요 수식은 아래와 같다.

$$\sum_N \mathrm{ZV}_{W,V,L,K,N} \geq \sum_{P_{\in (P,W,V)}} Z_{P,L,Wk,T} \quad \forall (W,V,L,K,Wk,\ \mathrm{T}_{\in (K,Wk,T)}) \tag{8}$$

$$\sum_N \mathrm{XV}_{W,V,L,K,N} \geq \sum_{P_{\in (P,W,V)}} \mathrm{X}_{P,L,Wk,T} \quad \forall (W,V,L,K,Wk,\ \mathrm{T}_{\in (K,Wk,T)}) \tag{9}$$

$$\mathrm{iv}_{P,Wk} = \mathrm{iv}_{P,Wk-1} + \sum_{L,\ T_{\in (Wk,T)}} \mathrm{X}_{P,L,Wk,T} - \mathrm{DM}_{P,Wk} + \mathrm{SH}_{P,Wk} \quad \forall (P,Wk) \tag{10}$$

$$\sum_{P,T_{\in (Wk,T)}} \mathrm{XV}_{P,L,Wk,T} \leq \mathrm{CpL}_{L,Wk} \quad \forall (L,Wk) \tag{11}$$

여기서는 연신 제품 생산량 $X_{P,L,Wk,T}$와 주차 별 생산 Capacity를 의미하는 $CpL_{L,Wk}$ 변수 등이 사용되었다.

개발한 시스템을 적용하고 현재 계획 담당자가 사용하게 하기 위해서 기초재고 정보를 읽고, 공정 별 반제품 재고가 출하해야 하는

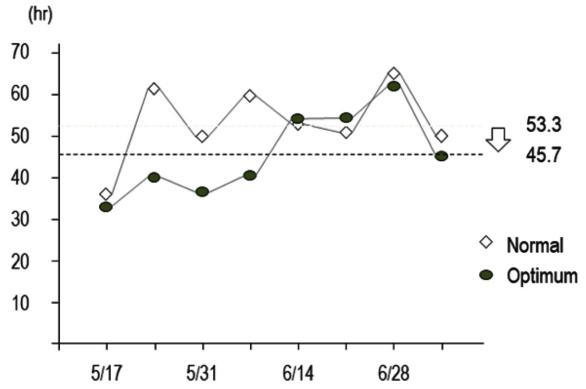


Fig. 6. Result of Stretching Plan Optimization.

각 완제품에 생산 가능한 지 분석하는 과정과 각 재고의 완제품 분배를 결정변수로 하여 면적효율을 최대화하는 과정도 포함하였다. 제품 출하계획과 완제품 및 반제품 당일 기초재고에서부터 시작하여 제품-재고 대응 가능한 경우를 모두 표현하고 연신 계획 최적화의 입력 값으로 여겨지는 연신 소요량을 산출하는 과정을 모두 시스템화 하였고, 사용자는 산출된 연신 소요량을 확인하고 엑셀 워크시트에 직접 수정된 값을 입력하고 연신 계획 최적화를 실행하도록 하였다. 최적화 Solver로 사용한 GAMS가 인터페이스 측면에는 단점이 있기 때문에 MS-VBA와 MS-Access DB (Microsoft Access Database)를 같이 사용하였다.

앞서 언급한 재고 분석을 통해 생산 필요량을 파악하는 과정과 일주일간 생산계획을 수립하는 업무가 담당자에게 최소 2시간 이상 소요되는데, 프로그래밍을 통한 자동화와 계획 최적화로 30분으로 줄어들었다. 연신 계획 최적화 결과에서는 제품 교환 시간이 Fig. 6에서 보인 것과 같이 두 라인에서 2주간 평균 53.3 시간에서 45.7 시간으로 감소 가능함을 알 수 있다. 여기에 보인 날짜는 계획 수립 날짜이며 각각에서 2주간의 담당자가 수립한 계획과 최적화 결과를 비교한 것이다. 계획이 수시로 변하기 때문에 계획 대비 실적을 비교하는 것은 왜곡될 소지가 많다. 이 결과는 감소된 제품 교환 시간 동안 추가 생산이 가능할 때의 생산액과 잔량으로 버려지는 PVA 로스 금액으로 환산하면 연간 27억원에 해당한다.

Set

· K: Timeslot
· L: 라인
· N: 같은 PVA 투입 수
· P: 연신 제품
· V: PVA 두께
· W: 원단 폭
· Wk: 납기의 week

Decision Variables

· $iv_{P,Wk}$: 주차 별 연신 제품 재고량
· $ivP_{W,V,Wk}$: PVA의 주차 별 재고량
· $vSH_{W,V,Wk}$: : 폭 W 두께 V인 PVA 의 Wk주차의 부족량
· $SH_{P,Wk}$: 연신 제품 P의 Wk주차의 부족량
· $X_{P,L,Wk,T}$: 라인 L에서 Wk주차의 연신 제품 P 생산량
· $XV_{W,V,L,K,N}$: 라인 L에서 폭 W 두께 V인 PVA를 N번째 투입하여 K번째 Timeslot에 생산하는 양
· $Z_{P,L,Wk,T}$: 연신 제품 생산량($X_{P,L,Wk,T}$)의 값이 양수일 때 1, 0일 때 0으로 표현되는 Binary 변수
· $ZN_{W,V,L,N}$: 라인 L에서 폭 W 두께 V의 PVA를 N번째 투입하면 1, 아니면 0으로 표현되는 Binary 변수
· $ZN_{W,V,L,K,N}$: 생산량($XV_{W,V,L,K,N}$)의 값이 양수일 때 1, 0일 때 0으로 표현되는 Binary 변수

Parameters

· $CpL_{L,Wk}$: 라인의 주차 별 생산 capacity
· fVp: PVA 한 Lot의 최소 사용 비율
· $DM_{P,Wk}$: 연신 제품 P의 Wk주차 수요량
· $nTAC_{W,V}$: 폭 W 두께 V인 연신 제품 생산 단위
· $VL_{W,V}$: 폭 W 두께 V인 PVA 한 Lot의 길이
· bigM: 충분히 큰 양 수

2-3. 편광판 최적원가

편광판의 제조공정은 다양한 폭의 원재료를 전처리를 통해 편광특성을 부여한 반제품을 만들고 이러한 반제품을 타겟 제품에 맞는 사이즈로 재단되는 공정으로 이루어 지기 때문에 똑 같은 제품이라 하더라고 전/후공정이 진행된 경로에 따라 제조 비용이 다를 수 있다. 따라서 개별 제품에 대한 원가를 추정하는 과정은 단순한 계산 방법으로 표현되지 못한다. 특히 A와 B라는 2개의 제품을 하나의 원단에서 생산을 하게 되면, 단일 생산에 비하여 A라는 제품은 수익성 상승이 되는 반면 B라는 제품의 수익성 하락이 될 수 있다. 하지만 전체 수익성이 증가하는 효과로 복합 재단을 통한 생산 작업이 의미가 있을 수 있다. 또한, 물량에 따라서 수익성이 바뀌게 되므로, 특정 폭에서 작업하는 것이 항상 좋은 것은 아니다. 무엇보다 공급계획과 이익률을 분석하는데 있어 원재료 로스를 통한 원가 변동에 있어서는 같은 의미이지만 판가를 고려한 제품간의 물량 비를 고려하였을 때는 원재료 로스를 감안한 최적의 생산방법이 수익률 기준으로 봤을 때는 Fig. 7와 같이 다른 결과를 나타낼 수 있다.

그래서, 수익을 극대화하기 위한 제품 간의 물량 조합이 존재하며, 적절한 물량 비율을 고려한 영업 물량의 수주와 생산이 필요하다. 또한 실적 기반으로 분석을 함에 있어서도 실적 생산에 있어서 폭 운영계획이 최적으로 되어 있는 지와 재단 사이트(Site)를 효과적으로 분배 하였는지에 대해 다양한 시뮬레이션 분석이 필요하다. 특히 여러 개의 전공정 라인을 가동하고, 후공정 라인도 사내뿐만 아

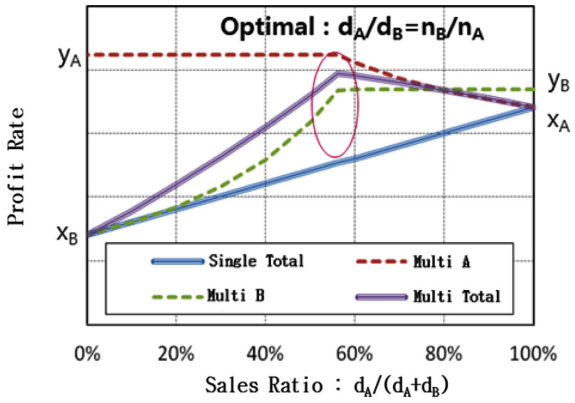


Fig. 7. Changes in Profit According to the Demand Ratio.

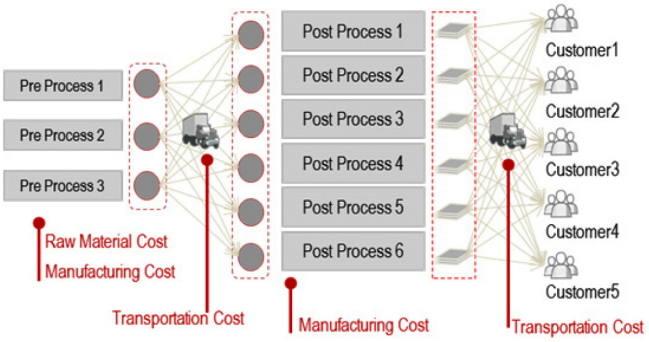


Fig. 8. Plant-Mix between Pre-process and Post-process.

니라 사외 업체를 통한 다양한 사이트에서 가동되고 있기 때문에 원가 측면에서 수익성을 극대화 하는 운영 전략에 대한 니즈(Needs)가 크다. Fig. 8은 이러한 편광판 생산의 다양한 전/후공정에서 발생하는 플랜트 믹스(Plant Mix)에 따른 제조원가가 달라질 수 있는 부분을 나타낸다.

$$\text{Min.}W_1 \cdot \sum_{d \in Dem} \text{shrt}_d + W_2 \cdot \left(\sum_{\{s \in S\}} \text{combB}_s \cdot \text{Cost}_s \cdot \text{Qty}_s + \sum_{\{m \in M\}} \text{combB}_m \cdot \text{Cost}_m \cdot \text{Qty}_m \right) \quad (12)$$

최적원가 분석에서의 목적함수는 shrt_d변수 즉 수요 미충족을 최소화 시키면서 단일 생산, 복합 생산 및 생산 경로에 따른 원가 변수인 $\text{combB}_x \cdot \text{Cost}_x \cdot \text{Qty}_x$를 최소화 시키도록 모형화 하였다.

단일 및 복합 재단에 따른 원가 파라미터를 Cost_s, Cost_m으로 단순화 하였는데, 공정 경로 및 생산 방식에 따른 원재료비, 전/후공정 제조경비, 제조 운송비, 판매 운송비를 세분화 하면 변수의 차원 및 문제 사이즈가 매우 커지기 때문에 데이터 전처리를 통해 단순화 하였다. 최적원가에서도 공급계획과 같이 수요 Balance를 모형화 하기 위해서 원재료 길이당 제품 장수에 삼각함수를 통한 전처리로 파라미터를 생성하여 적용하였다.

이 외에도 원재료 제약, 전/후공정 Capacity 제약, 전/후공정 Route 별 수율 변화 등의 제약을 반영하여 MILP 모형을 구축하였다. 전체 시스템은 사용자가 다양한 사업 제약조건에 대해 시뮬레이션 할 수 있도록 MS-VBA를 활용하여 Interface를 구축하였고, 수학적 최적화에 대한 해는 CPLEX Solver를 활용한 GAMS 프로그램으로 도출하였다.

Fig. 9과 같이 매월 실적과 최적원가에 대한 비교 분석을 통해 전

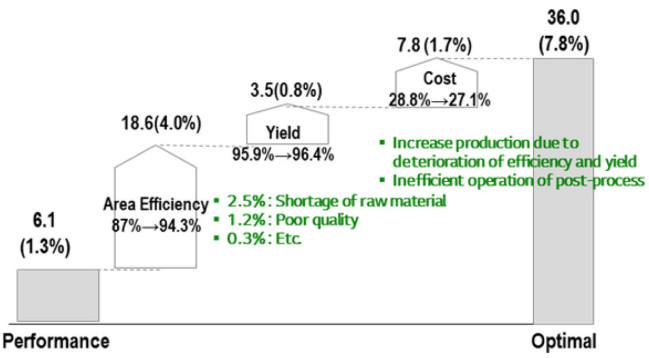


Fig. 9. Analysis of Perform. vs Optimal Operation through Program.

/후공정의 실질적으로 가능한 운영 전략을 수립함으로써 전공정의 경우 0.5~0.6%, 후공정의 경우 1.1~1.2%의 원가 절감을 확인할 수 있었다.

Set

· Dem: net demand 집합
· S: 단일 조합 집합
· M: 복합 조합 집합

Decision Variables

· qty_x: 단일/복합 조합 x (s or m)의 생산 수량(단위:m)
· combB_x: 단일/복합 조합 x (s or m)이 생산되었는지 여부를 나타내는 Binary 변수
· shrt_d: 수요 d (∈Dem)의 shortage 수량(단위:장)

Parameters

· Cost_x: 단일/복합 및 제조경로에 따른 m당 제조원가
· W: 목적 함수 별 가중치

3. PO 생산성 극대화

PO는 NCC로부터 생산된 Olefin 계열의 기초 유분을 중합하여 만들어지는 결정성 고분자 합성수지로써 주요 고분자 수요 중에서도 60%이상을 차지하는 생산 비중이 높은 제품이다. 특히 뛰어난 화학적 안정성과 무독, 무취의 친환경성, 재활용성, 가격대비 우수한 물성, 물성조절 용이성 등의 장점을 통해 다양한 용도로 사용된다. PO제품은 기초 유분 제품 및 기능에 따라 PE (Poly Ethylene), PP (Poly Propylene), EVA (Ethylene Vinyl acetate copolymer), POE (Poly Olefin Elastomer) 등으로 나뉜다. 각각의 제품군별 장단점에 따라 농업용 필름, 밧줄, 그물, 자동차 내외장재, 신발, 발포제, 가전 내/외장재, 카펫, 의료용품, 태양광 시트, 전선, 핫멜트 제품 등 그 사용범위가 매우 넓고 다양하다.

3-1. PO 생산공정

PO 생산 공정은 제품 군 및 공장에 따라 그 세부 공정에는 차이가 있지만 크게 압축, 중합, 분리/압출, 저장 및 포장의 단계로 이루어 진다.

Fig. 10에서 보는 것과 같이 납사(Naphtha) Cracking으로부터 생산된 에틸렌을 저압 순환된 미 반응 가스와 함께 1차 압축기에서 30->250 kg/cm^{2}으로 압축을 시키고, 이렇게 1차 압축된 가스를 고압 순환된 미 반응 가스와 함께 2차 압축기에서 250->1200->2000 kg/cm^{2}으로 압축 시킨다. 압축된 가스는 유기 과산화물 개시제와 함께 반응기로 들어가 설정된 압력 및 온도에서 Stirrer를 통한 믹싱과 함께 중합공정을 거친다. 중합공정 이후에는 미 반응 가스를 분리하여 압출 공정을 거치게 되어 펠렛(Pallet)형태로 PO를 입상화시킨다. 이때는 Grade에 따라 첨가제를 투입하기도 한다. 분리/압출까지의 공정을 거치면 PO 제품으로써의 특성을 가지는 제품이 완성이 되는데 여기까지는 하나의 Grade로 표현되는 반제품으로 사일로(Silo)에 저장되어 있다가 고객의 요구 제품에 따른 포장지를 선택하여 포장 공정을 거치게 되면 최종 제품이 된다. PO 생산 계획 수립은 크게 각 공장 별로 Grade에 대한 시간단위까지 고

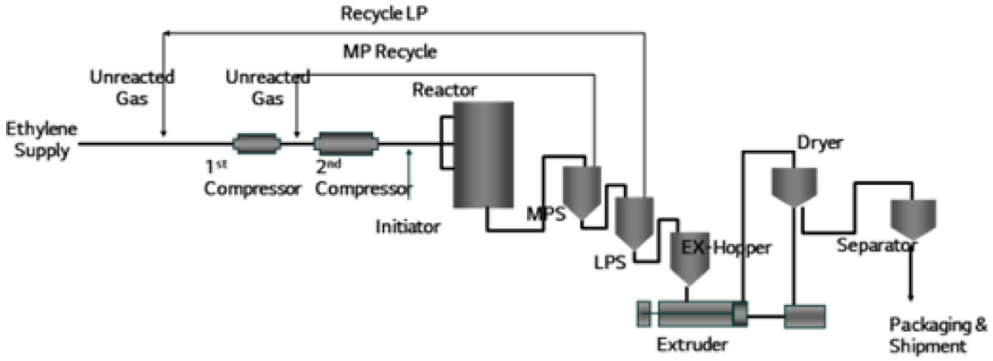


Fig. 10. Poly Olefin Manufacturing Process.

려된 일자 별 생산계획과 각 Grade별로 포장을 얼마만큼 해야 할지에 대한 포장계획으로 나뉠 수 있으며 이를 통해 생산 오더를 내리고 및 고객 별 수요에 부족 대응을 파악할 수 있다. 이러한 생산/포장계획을 통해 통해 생산 팀에서는 압축, 중합, 분리/정제 공정에서 Grade 반제품 별 생산을 진행하고, 물류 팀에서는 포장 공정을 거쳐 출하를 진행한다. 생산계획 수립에 있어 중요 이슈 중 하나인 납기를 만족하면서 Grade Change시 발생하는 OG (Off Grade) 발생량을 최소화하는 방향으로 최적화하여 계획을 수립해야 한다. 따라서 납기를 만족하면서 생산성을 극대화 하는 생산계획 수립을 위하여 수학적 최적화 기법을 적용하였다.

3-2. PO 생산계획

플랜트/라인 별 Grade 단위의 생산에 있어서 이슈는 1차적으로 고객에게 제품을 납기 함에 있어 차질이 없도록 포장을 위한 반제품을 생산하는 것이다. 또 하나의 중요 이슈는 Grade Change가 있을 시에 전/후 Grade에 따른 OG 제품 발생량이 다르기 때문에 OG 제품 발생을 최소화 함으로써 생산성을 극대화 하는 이슈가 있다. 따라서 생산계획에 있어 주요 목적은 판매계획의 제품을 동일 Grade로 묶어 Grade 단위 출하를 기준으로 한 납기를 만족시키면서 OG를 최소화하는 생산계획 수립에 있다.

$$\text{Min.} W_1 \cdot \sum_{t \in T} \text{shrt}_{t,i} + W_2 \cdot \sum_{t \in T} z_{t,k,i} - W_3 \cdot \sum_{t \in T} P_{t,k,i} \tag{13}$$

위에서 언급한 목적함수를 표현하면, 식 (13)과 같다. $\text{shrt}_{t,i}$는 수요에 대한 부족량을 최소화 시키는 변수이고, $z_{t,k,i}$는 Grade Change 횟수에 대한 변수이다. 또한 수요에 대한 부족량 및 OG 발생량을 최소화 하다 보면 생산에 대한 여유 Capacity가 있어도 생산을 하지 않을 수 있는 결과가 생기기 때문에 생산량을 극대화 하기 위하여 생산량 변수 $P_{t,k,i}$를 최소화 문제에 반하여 음수로 추가하였다. Grade Change Rule을 적용하기 위해 Grade Change 시 OG 발생으로 초기 생산량이 감소되는 제약조건을 다음과 같이 반영하였다. 또한 Grade Change 시 OG 발생 시간이 하루를 넘어갈 수 있기 때문에 최대 이틀까지 발생할 수 있는 경우를 반영하였다.

$$\sum_i P_{t,k,i}^{prod,in} \le y_{t,k,j} - l_{t,k}$$

$$l_{t,k} \ge c_{k,j,i}^{1} \cdot y_{t,k,j} + c_{k,j,i}^{1} z_{t,k,i} - c_{k,j,i}^{1}$$

$$l_{t+1,k} \ge c_{k,j,i}^{2} \cdot y_{t,k,j} + c_{k,j,i}^{2} z_{t,k,i} - c_{k,j,i}^{2}$$

$$l_{t+2,k} \ge c_{k,j,i}^{3} \cdot y_{t,k,j} + c_{k,j,i}^{3} z_{t,k,i} - c_{k,j,i}^{3}$$

$$y_{t,k,j} + z_{t,k,i} \le 1 \tag{14}$$

또한 다음과 같은 추가 제약조건들이 반영되었다.

우선 Capacity 관련 제약 조건으로써 플랜트/라인/Grade 별 시간당 생산가능 량을 기반으로 하루 안에 생산가능 량에 대한 Capacity 제약과 예정된 장비보전 계획에 대한 제약조건이 반영 되었다. 또한 투입 후 시간당 생산가능 량에 따라 매시간 완성된다고 가정하였다.

다음으로 생산 조건에 관한 제약 조건으로써 미리 정의된 진행가능 플랜트/라인/Grade 조합을 준수하여 생산 가능 라인 별 우선순위를 정의 및 반영하였으며, Grade Change에 따른 OG양 및 전/후 진행 가능한 Grade 조합을 현실 조건을 반영하여 적용하였다. 또한 플랜트/라인 별 Shut Down 기간에 대한 반영과, 휴무일 및 특정 시간대의 특정 Grade로의 Change 불가에 대한 제약조건도 반영되었다. 생산 공정 시 진행하는 Lot Size가 미리 지정되어 있어 Grade별 정의 된 Batch 사이즈는 Lot Size의 배수가 되도록 하는 현실적인 생산 제약 조건도 존재하며 설비를 공동으로 사용하는 공정에 있어 생산 손실을 최소화 하기 위해 라인간의 동시 생산 불가 Grade 조합 역시 제약조건으로 반영하였다.

추가적으로 재고 관리 부분에 있어서 안전재고 수준 역시 제약조건으로 반영하였다.

Set

· t: Timeslot 집합 (day)
· k: 라인 집합
· i,j: Grade 집합

Decision Variables

· $\text{shrt}_{t,i}$: Grade 단위의 수요에 대한 일별 부족량
· $z_{t,k,i}$: i로의 Grade Change 여부에 대한 Binary 변수
· $P_{t,k,i}$: Nonnegative 생산량 변수로 Grade가 하루 종일 생산하였을 때 1의 값을 갖는다.
· $y_{t,k,i}$: $P_{t,k,i}$의 값 여부에 대한 Binary 변수
· $l_{t,k,i}$: Nonnegative Grade Change 변수로 하루 중 발생한 시간 분율에 대해 0~1의 값을 갖는다.

Parameters

· $C_{k,i,j}$: Grade Change Loss
· W: 목적 함수 별 가중치

3-3. PO 포장계획

포장계획은 Grade별 생산 계획 결과를 바탕으로 플랜트/라인 별 제품 포장 계획을 수립하는 것으로 생산계획의 결과에 큰 영향을 받는다.

포장에 있어서 가장 중요한 부분은 역시 고객에게 제품의 납품 기한을 만족시키는 것이다. 생산계획 역시 제품의 납기를 만족하기 위해 생산 타겟을 수립하는 것이지만 그 결과로써는 해당 Grade가 어떤 제품을 목표로 생산하는지는 안 나오기 때문에 포장계획에서 납기를 준수하는 1차목표를 기반으로 Grade별 생산 계획에 맞추어 납기에 지연이 없도록 포장 순서 및 수량을 결정해야 한다. 포장계획에는 Grade Change에 대한 제약이 존재하지 않지만 포장 작업에 대한 연속성을 유지하기 위해 납기를 만족하는 범위 안에서 가능한 동일 포장을 지속 유지하는 조건이 추가 되었다. 포장계획에 있어 주요 목적은 제품 출하에 대한 납기를 만족시키면서 포장 작업에 있어 포장코드 변동을 최소화 시키는 계획이 수립 되어야 한다.

$$\text{Min.}W_1 \cdot \sum_{d \in D} \text{shrt}_{d,l,g,i} - W_2 \cdot \sum_{d \in D} \text{CProd}_{d,l} \quad (15)$$

따라서 식 (15)과 같이 제품 수요에 대한 부족량 변수인 $\text{shrt}_{d,l,g,u,i}$를 최소화 시키고 또한 연속생산 여부 Binary 변수인 $\text{CProd}_{d,l}$을 음의 최소화 시킴으로써 연속 생산을 최대화 시키도록 목적함수를 구성하였다.

포장타입 변화에 대한 Binary 변수는 다음과 같이 식 (16)와 같은 제약조건을 통해 반영 되었다. $\text{ICont}_{d,p,i}$ 변수는 $\text{IProd}_{d,p,i}$변수와 $\text{CProd}_{d,l}$ 변수간의 차원을 연결시키기 위한 Binary 변수 이다.

$$\text{CProd}_{d,l} \le \sum_{\{p:Line_p=l\},i} \text{ICont}_{d,p,i}$$

$$2*(\text{ICont}_{d,p,i}) \le \text{IProd}_{d-1p,i} + \text{CProd}_{d,p,i} \quad (16)$$

포장계획은 출하와 밀접하게 연계된 공정으로 출하가 지속적으로 변경되기 때문에 포장계획 역시 매일 변동의 여지가 있다. 따라서 포장계획에는 생산확정구간은 적용되지 않는다.

포장계획에 있어 Capacity 제약은 플랜트/라인/포장타입 별 시간당 생산가능량을 기반으로 하루 안에 생산 가능 량에 대한 제약과 장비보전 계획을 스케줄에 반영하여 계획을 수립하여야 한다. 장비보전 계획의 경우 포장 설비는 일반적으로 생산 설비와 함께 이루어지며 생산 계획 결과로써 장비보전 계획이 반영되어 적용되기 때문에 포장계획에는 따로 반영하지 않는다. 생산조건 제약에 있어서도 미리 정의된 진행 가능 플랜트/라인/포장타입 조합을 준수하여 생산 가능 라인 별 우선 순위를 정의하여 반영하여야 하고, Grade Change에 따른 Cleaning Time이 존재하나 이 역시 생산계획의 결과에 반영되어 나오기 때문에 따로 반영할 필요는 없다. 로스 제약조건으로는 포장 타입의 변경에 현장 작업성에 대한 로스가 발생되는 것을 반영하기 위해 포장 타입변경을 카운트하여 이를 목적함수에 넣어 최소화 시키도록 반영되어야 한다. 또한 재고 관리 부분에 있어서 수요에 더해 안전재고 수준을 맞추기 위한 포장 계획이 반영되어야 하고, 완제품에 대한 기초재고 역시 계획수립에 반영해야 한다.

이러한 PO 생산계획 및 포장계획은 SCM 시스템에 구축되어 생산, 기획, 마케팅, 영업 모두가 동일한 정보를 확인할 수 있도록 웹 기반 시스템으로 구축하였다. 프로그래밍 언어는 JAVA로 구축하였으며 모델링에 대한 해를 도출하기 위해서 GUROBI Solver를 사용하였다. 이렇게 나온 포장계획 최적화 결과는 웹 기반 시스템에서 아래 Fig. 11과 같이 일별 제품별 PSI (Production Sales Inventory)로 확인할 수 있다.

최적화를 통한 결과를 수작업의 계획대비 비교하였을 때 이론적으로 2~3%이상의 생산성 확보를 확인 할 수 있었다. 비록 현실의 제약부분에 있어 최적화 결과를 그대로 반영할 수 있지는 않겠지만 3조 이상의 매출 규모를 볼 때 계획 최적화를 통한 정량적으로 개선할 수 있는 부분이 매우 큼을 확인할 수 있다.

Set

· d: Timeslot 집합(day)
· l: 라인 집합
· g: Grade 집합
· i: 제품 집합
· p: 생산계획 결과

Decision Variables

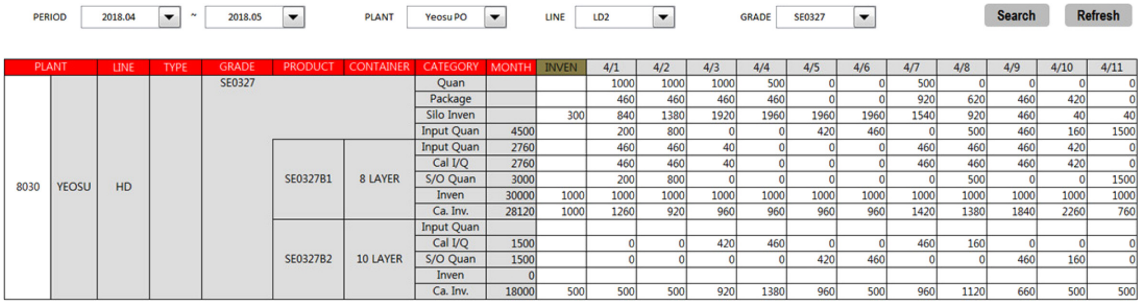
· $\text{shrt}_{d,l,g,i}$: 제품 단위의 수요에 대한 일별 부족량
· $\text{CProd}_{d,l}$: 라인에서 일자 별 연속 생산 여부에 대한 Binary 변수
· $\text{ICont}_{d,p,i}$: 생산계획에 반영된 Grade 안에서 일자 제품의 연속 생산 여부에 대한 Binary 변수
· $\text{IProd}_{d,p,i}$: 일자 별 제품 생산 여부에 대한 Binary 변수

Parameters

· W: 목적 함수 별 가중치

4. 전극 생산계획

2차 전지는 자동차, 휴대폰 및 기타 기기에 사용되고 있으며 사용되는 목적 별로 다양한 고객에게 널리 공급되고 있다. 전지는 형태 및 특성에 따라 원통형 전지, 각형 전지, 폴리머(Polymer) 전지, 중대형 폴리머 전지 등이 생산 된다.


PERIOD 2018.04 ~ 2018.05 PLANT Yeosu PO LINE LD2 GRADE SE0327 Search Refresh

PLANT	LINE	TYPE	GRADE	PRODUCT	CONTAINER	CATEGORY	MONTH	INVEN	4/1	4/2	4/3	4/4	4/5	4/6	4/7	4/8	4/9	4/10	4/11
8030	YEOSU	HD	SE0327			Quan			1000	1000	1000	500	0	0	500	0	0	0	0
						Package			460	460	460	460	0	0	920	620	460	420	0
						Silo Inven		300	840	1380	1920	1960	1960	1960	1540	920	460	40	40
						Input Quan	4500		200	800	0	0	420	460	0	500	460	160	1500
				SE0327B1	8 LAYER	Input Quan	2760		460	460	40	0	0	0	460	460	460	420	0
						Cal I/Q	2760		460	460	40	0	0	0	460	460	460	420	0
						S/O Quan	3000		200	800	0	0	0	0	0	500	0	0	1500
						Inven	30000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
						Ca. Inv.	28120	1000	1260	920	960	960	960	960	1420	1380	1840	2260	760
				SE0327B2	10 LAYER	Input Quan													
						Cal I/Q	1500		0	0	420	460	0	0	460	160	0	0	0
						S/O Quan	1500		0	0	0	0	420	460	0	0	460	160	0
						Inven	0												
						Ca. Inv.	18000	500	500	500	920	1380	960	500	960	1120	660	500	500

Fig. 11. Packaging Plan PSI Result.

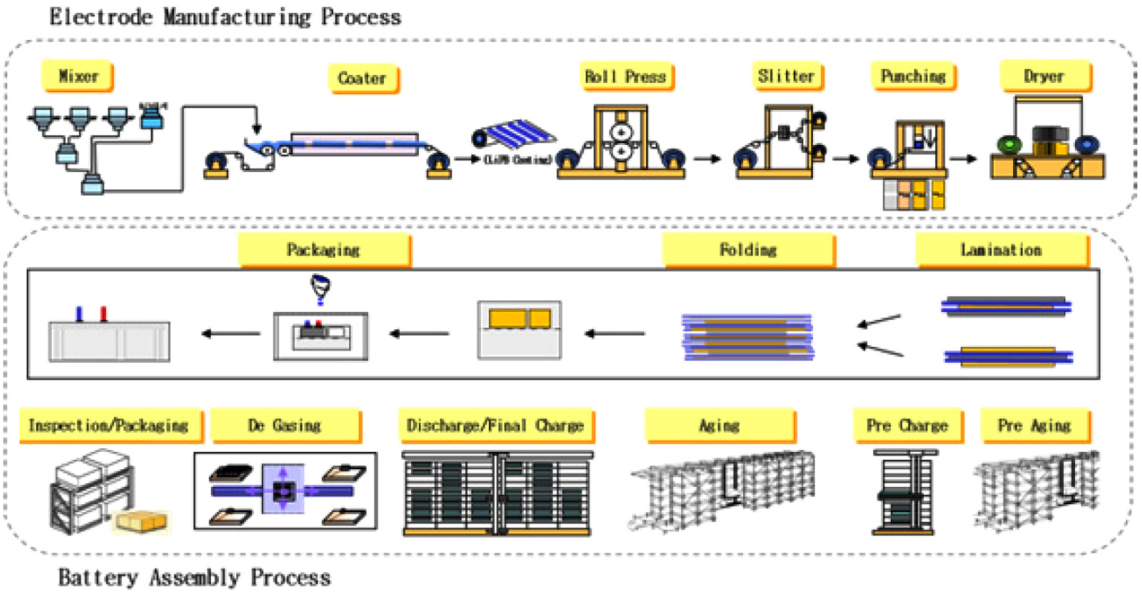


Fig. 12. Polymer Battery Manufacturing Process.

4-1. 전지 생산공정

Fig. 12과 같이 전지는 전극 공정과 조립 공정 두 가지 단계를 거쳐 생산된다. 전극 공정에서 생산 된 전극이 조립 공장에 공급되고 공급된 전극은 일련의 과정을 거쳐 조립 공정에서 전지 셀로 조립된다.

논문에서 소개할 전극 생산계획에 대한 설명에 앞서 전극 생산공정을 좀더 자세히 설명하겠다. 조립공정에 필요한 재료 물질 중 하나인 전극을 전극 공정을 통해 생산하여 공급할 때 전극은 양극과 음극을 공급한다. 전극 공정은 믹싱(Mixing), 코팅(Coating), 롤프레싱(Roll Pressing), 슬리팅(Slitting)/펀칭(Punching), 건조의 5단계로 구분된다. 전극 원료를 혼합하는 믹싱 공정은 원료 물질을 Hopper를 통해 Mixer Tank에서 진행된다. Hopper는 원료 물질을 담고 있다가 Mixer에 공급하는 계량기가 달린 드럼이다. 믹싱이 끝난 원료 물질은 코터에 이송된다. 이송된 원료 물질은 코터에서 각 제품 모델 별 규격에 맞춰 금속 호일에 코팅 된다. 금속 호일은 둘둘 말린 롤 상태로 작업되며 이 과정이 전극 생산 계획의 Target 공정이다. 코터를 거친 금속롤은 롤 프레싱 공정을 거쳐 슬리팅/펀칭 공정으로 전해진다. 슬리터/펀칭 기계에서 제품 모델 별 사이즈에 맞게 가공된 후 진공건조기에서 완전 건조 시켜 완성된 전극을 이송계획에 맞춰 다른 사이트의 조립 플랜트로 이송되거나 생산된 플랜트의 조립계획에 대응하여 공급하게 된다.

또한 다양한 조립사이트 및 라인에서 조립되는 수많은 전지에 대해 효율적으로 공급하기 위해서는 전극 공장의 부동시간을 최소화하는 것이다. 전극 공장은 한정된 라인 수에 비해 생산해야 할 제품 모델 수가 많아 제품 모델의 전용 라인화가 불가능하다. 동일한 라인에서 여러 제품을 생산하는 문제에서 발생하는 Grade Transition Time이 필연적이다. 즉 제품 모델간의 교환에 따른 교환 시간이 필요로 하며 해당 시간 동안은 조업이 불가능해진다. 이를 최소화 한다면 추가적인 조업 시간을 확보 할 수 있으며 전극 라인의 효율적인 운영이 가능하다.

4-2. 전극 이송계획

전극을 조립계획에 대응하는데 있어서 해외 사이트에 공급하는 경우에는 이송에 관한 이슈가 있다. 이송수단 및 이송요일, 수량 등의 제약조건하에 해외 조립사이트의 조립계획에 적절히 대응할 수 있도록 이송계획을 효율적으로 수립해야 한다. 다양한 전지 종류에 대해서 수요 및 이송 리드타임(Lead Time)을 고려하여 이송 시점 및 수량을 결정하는 데는 복잡한 계획 수립에 따른 의사결정의 오류가 있을 수 있다.

전극이송계획은 전지 조립계획을 기반으로 조립계획에 전극이 적절히 대응 될 수 있도록 해외 사이트에 이송될 시점 및 수량을 결정하는 것이다. 제품의 다양성 및 조립계획의 변동성에 따라 안전재고 일을 결정하는 기준이 다르다. 특히 전지의 형태 특성에 따라 제품의 양을 관리하는 단위도 다르다. 예를 들어 폴리머 전지는 노칭(Notching)/라미(Lami)/폴딩(Folding)의 조립계획 단계에서 일정한 길이단위의 전극이 하나의 제품이 되기 때문에 전극을 길이 단위로도 관리하지만, 원형/각형 전지는 길이 단위로는 관리되지 않고 개수로만 관리하기 때문에 차이가 있다. MS-VBA로 구현된 전극 이송계획은 3가지 절차로 그 솔루션을 도출한다. 1) 전극조립계획 및 이송계획을 기반으로 일자 별, 제품 별 조립계획 대응이 어떻게 이루어 지는지 확인함으로써 각 제품들에 대하여 검토구간 동안 재고수준이 과잉인지, 적정인지, 위험수준인지, 아니면 부족한 상태인지를 확인할 수 있는 재고수준 분석을 먼저 한다. 2) 다음으로 적정재고 수준에 맞도록 전극 이송 계획을 수립한다. 재고수준을 통해 확인한 부족 재고들에 대해서는 이송 수단 및 요일에 따른 리드타임을 고려하여 적당한 시점에 출하 요청을 하여 조립계획에 대응되어 전극이 이송될 수 있도록 하는 알고리즘을 구축하였다. 전극 이송계획은 크게 구간별 계획과 전체계획으로 나뉘어 있는데 전체계획은 오늘 이후의 표시된 마지막까지 전체 계획 수립을 통해 전체 이송 물량을 파악하는데 이용되고, 구간별 계획은 실제 계획 수립에 활용되는 기능으로 목표 기간에 대해 계획을 수립하는데 이용된다. 3) 마지막으로 ALARM 기능을 통해 재고 수준 중에서도 특정 구간 동안 부족재고가 나타나는 제품을 리스트(list)하여 전극 대응 부족이 일어 나지 않도록 다시 한번 확인하도록 하는 로직을 구축하였다.

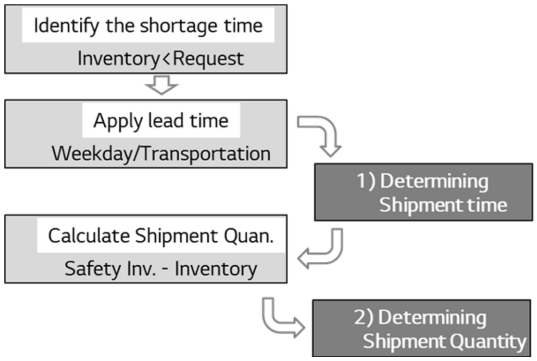


Fig. 13. Shipping Decision Logic for Electrode Transfer Plan.

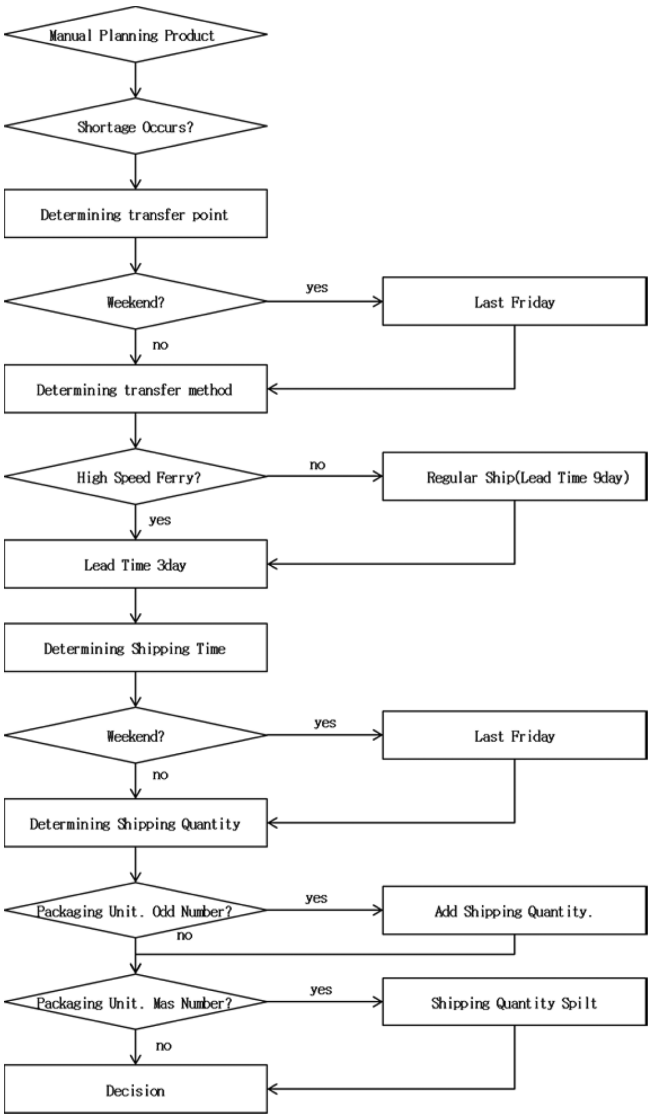


Fig. 14. Algorithm for Electrode Transfer Planning Algorithm.

Fig. 13와 같이 목표 계획 구간을 정하여 해당 구간 안에서 부족 시점을 찾아 리드타임과 적정 재고량을 고려하여 이송계획을 수립한다. 이송 계획에 고려되는 알고리즘에 고려되는 사항은 1) 자동으로 작성하지 않고 수동으로 계획하는 제품을 파악하여 자동계획에서 제외한 후 2) 부족 시점 파악 및 3) 이송 시점을 결정(주말 여부도 판단) 한다 4) 그 다음 해당 제품의 이송 수단 파악 및 이송 수

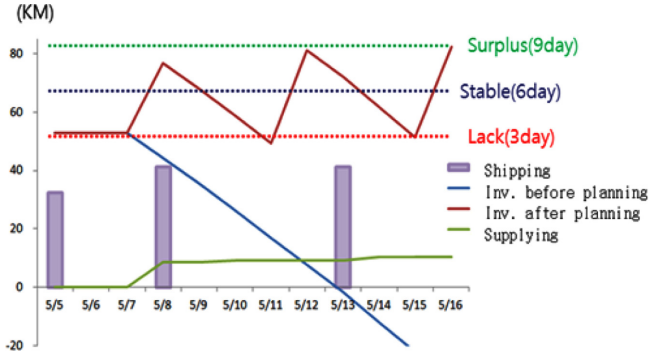


Fig. 15. Inventory Balance through Electrode Transfer Planning.

단의 리드타임을 파악(고속 선박, 일반선박)하고 5) 주말 여부를 판단하여 출하 시점을 결정한 후, 조립계획량에 기반한 출하량을 결정해줘야 한다. 마지막으로 6) 포장 단위를 파악하여 후 처리를 진행하였다. 이를 순서도로 작성하면 Fig. 14와 같다.

Fig. 15와 같이 이송계획 수립 알고리즘을 통해 자동계획 전후의 재고 Balance를 확인해보면 조립계획 발생에 따른 재고 부족현상이 알고리즘에 따른 출하시점 및 수량을 결정해 줌으로써 적정 재고 Balance를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

4-3. 전극 생산계획최적화

전극 SCM의 가장 중요한 이슈는 전극을 조립 공정에 차질 없이 공급하는 것이고 그러기 위해서는 전극을 효율적으로 생산해야 한다. 전지 조립 수요에 대응하기 위한 전극 Capacity가 부족한 상황에서 전지 조립 공정 수요에 부족함 없이 안정적으로 전극을 대응하는 가장 확실한 방법은 전극 생산 설비를 투자하는 것이다. 하지만 이 경우에 전극 Capacity만 무작정 늘어난다면 고정비에 대한 부담이 늘어난다. 또 다른 방법은 전극 생산계획을 효율적으로 수립하는 것이다. 한정된 라인 수에 비해 생산해야 할 제품 모델 수가 많기 때문에 제품 모델의 전용 라인화가 불가능하다. 따라서 전극은 생산 제품 순서에 따른 부동시간 즉 Transition Time이 존재한다. 이러한 Transition Time을 최소화 하도록 전극 생산계획을 효율적으로 수립한다면 추가적인 조업 시간 확보 즉 생산성 향상을 가져올 수 있으며 전극 라인의 효율적인 운영이 가능하다. 전극 생산계획 최적화에서는 전극 라인운영을 효율적으로 하기 위해서 생산계획적인 측면에서 월간 단위에서 전극 제품 및 수량 플랜트 플래닝 분배 효율화 및 일일 단위에서 수학적 최적화를 이용한 효율적인 전극 라인 운영계획에 대한 내용을 살펴보겠다.

전극 일별 생산계획에 앞서 Monthly 조립계획을 바탕으로 하여 당월 전극 재고 및 생산 실적을 기반으로 어떤 사이트의 플랜트에서 어떤 제품을 얼마만큼 생산할지를 수립한다. 양극 및 음극 전용라인과 원통형/각형 전지, 폴리머 전지, 자동차용 중대형 전지가 생산 실적에 따라 매월 수요가 다르고, 전극 Capacity가 각 플랜트 별로 차이가 있기 때문에 월 별로 생산 사이트에 전극을 효율적으로 분배해 줘야 한다. 그러기 위해서는 우선 전극을 당월 차월에 얼마만큼 생산해야 하는지 정확하게 파악하는 것이 필요하다. 따라서 전지 셀 조립계획을 기반으로 전극 재고 및 생산 실적을 가지고 제품별 월별 생산량을 결정해줘야 한다. 제품별 월별 생산량이 정확히 결정되면 계획 수립 담당자는 전용라인 확인 및 플랜트 별 Capacity에 기반하여 각 전극 제품 및 생산량을 각 동에 할당한다.

여기서 각 동에 배정된 전극 제품 및 월간 생산량을 기반으로 각 동별 담당자가 일일 라인 운영계획을 수립하기 때문에 월간 플랜트별 분배 계획을 얼마만큼 효율적으로 수립하는 지는 전지 셀 조립에 전극을 효율적으로 대응하는데 중요한 역할을 한다. 월간 동 별 생산계획 수립 중 셀 조립계획에 대응하기 위해 전극 제품을 월간 얼마만큼 생산할지 정확히 계산하는 부분에 있어서 많은 시간이 할애 되기 때문에 이 부분에 대한 정보의 정확한 가시화를 통해 전극 생산량 Balance를 효율적으로 수립한다면 계획을 더 최적으로 수립할 수 있는 기반을 만들 수 있다. 플랜트 별 Monthly 플래닝은 MS-VBA를 통해 마스터 정보의 수집 및 정보의 가시화를 효율화함으로써 수립하는 작업에 대해 빠른 의사결정을 할 수 있게 하여 좀 더 최적화된 월간 생산계획을 수립할 수 있는 발판을 마련하였다. Monthly 플랜트 플래닝을 하고 나면 플랜트 별 생산계획 담당자가 Daily 생산계획을 수립한다. 현재 전극 Capacity가 부족한 상황이기 때문에 생산계획을 효율적으로 수립하는 것은 중요하다. 각 플랜트 안에서 납기에 맞춰 전극을 대응하기 위해 어떠한 라인에 어떠한 작업 순서로 진행을 할 지 생산계획을 수립 해야 하는데 여기서 각 제품을 생산하는 순서에 따라 제품간의 Transition Time이 존재하기 때문에 납기 대응 가능범위 안에서 Transition Time을 최소화 하도록 생산 순서를 수립하는 것은 추가 생산성 확보를 위해 중요하다. 일별 전극 생산계획 최적화에서는 이러한 솔루션을 도출하기 위해서 납기 대응을 위해 주 별 생산 시점, 생산 배치(Batch) 량, 생산 라인을 할당하는데 있어서 수학적 최적화를 모형화 하여 GAMS 프로그램을 이용하였고, 주 별 생산 제품 안에서 생산 순서를 결정하는데 있어서는 가능한 모든 경우의 수에서 최적의 경우를 찾기 위해 Branch & Bound 기법을 이용하였다. 최적 풀이 속도의 개선을 위해 문제를 두 번의 Step으로 나누어 해를 도출하였다.

Step1) GAMS 최적화를 이용한 생산시점, 생산라인, 생산량 구하기

첫 번째 Step에서는 GAMS 프로그램을 이용하여 LP (Linear Programming) 수학적 최적화를 CPLEX Solver를 통해 전극 제품별 생산시점, 생산라인, 생산량을 계산한다. 부족한 재고를 충족시키기 위해서는 부족 시점 전주에 확보를 해야 한다는 개념으로 수요를 주 별로 읽어 전 주에 생산하도록 계산하였다. 또한 Step2에서 순서 변동으로 인한 Transition Time 변동의 여유를 주기 위해 전체 Capacity의 90%로 여유를 주도록 하였다. 전극 대응을 부족함 없이 최적으로 분배하는 게 목적으로 반영되는 제약조건으로는 제품별 라인에 따른 Batch Capacity, 플랜트 별 배정 제품 및 분배량, 생산 가능 전극제품 분석을 위한 라인 별 제품 생산 실적이 제약조건으로 들어간다.

Step2) 생산순서 최적화

Step1을 통해 생산시점(Weekly), 생산라인, 생산량을 결정하면 한 주 안에서 생산 순서를 결정해야 한다. Fig. 16와 같이 생산 순서를 어떻게 하냐에 따라 Transition Time이 달라지기 때문에 생산 순서를 효율적으로 결정하면 추가 생산 시간이 확보된다.

각 전극 제품별 원재료에 따라 제품 간의 Transition Time은 3가지 단계로 이루어 진다. 동일한 원재료의 경우는 별도의 세정시간이 필요 없고, 원재료의 계열이 같은 경우는 간이 세정으로 약 2~3시간 정도의 Transition Time을 필요로 하며, 완전히 다른 계열의 원재료는 9시간 이상의 Full 세정을 필요로 한다. 이러한 제품간 Transition Time은 원재료를 기반으로 Matrix 형태로 정리하여 시스템에 반영하였다. 하지만 전극 제품의 생산 순서는 한 주 안에 배정된 제품 수에 따라 가능한 순열 조합으로 기하 급수적으로 증가한다. 모든 조합을 검토하면 계산시간 역시 기하급수적으로 늘어나서 결과를 도출하기가 힘들어진다. 빠른 최적 작업 순서를 탐색하기 위해 Branch & Bound 기법을 이용하였다. 수학적 최적화를 통하여 생산 라인 별로 전극을 분배하고 Transition Time을 최소화하기 위한 생산순서를 결정하였다. 본 방법론에 기반한 일별 생산계획 실적과 최적화를 통한 비교를 특정 한달 동안 비교 분석 해보았다.

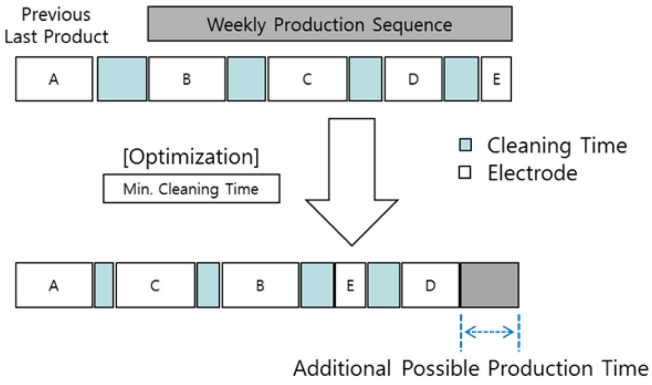


Fig. 16. Additional production time by optimizing production plans.

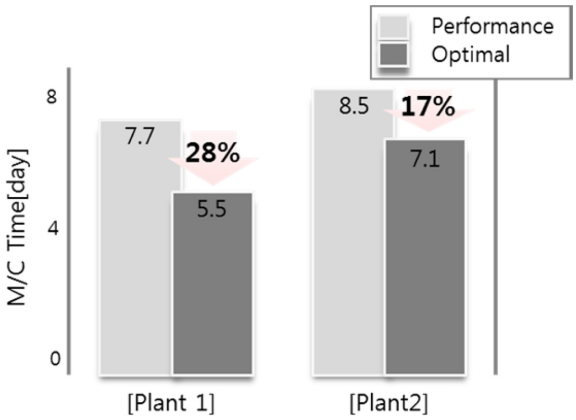


Fig. 17. Productivity Analysis by Optimizing Production Planning.

Fig. 17과 같이 Transition Time이 실적에서 플랜트1은 7.7일, 플랜트 2는 8.5일의 시간이 소요되었지만 최적화를 통해서는 제품 순서를 최적으로 조합해 봄으로써 플랜트 1은 5.5일 플랜트 2는 7.1일의 Transition Time의 결과를 확인하면서 평균적으로 약 22% 이상의 추가 생산성 향상의 가능성을 확인할 수 있었다.

5. NCC 공장 선박 스케줄링

석유화학 사업의 가장 중요한 원료인 에틸렌(Ethylene)은 원유로부터 연료유를 정제 후 부산물인 납사를 고온으로 Cracking 하고 정제하여 생산하는데 여기서 프로필렌(Propylene) 및 방향족 탄화수소까지 모두 같이 생산할 수 있기 때문에 Cracker 공장은 기본적인 공장 단위가 거대한 Complex로 이루어져 있고, 대부분 액상이나 기상의 원료 및 제품이 생산된다. 납사를 원료로 하기 때문에 정유 공장 근처 또는 원료를 수입하여 생산에 투입할 수 있도록 부두 근처에 위치한다. 공장 전체의 운영에 있어서는 이송과 저장이 중요하므로 부두뿐 아니라 탱크와 파이프 및 펌프가 중요한 시설이

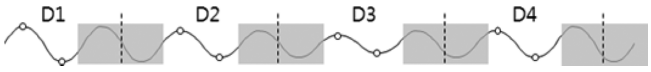


Fig. 18. Available Vessel Approaching time according to daily tide.

된다. 정유 공장이 가까이 있고 납사를 직접 받을 수 있도록 파이프 시설이 있기도 하지만 기본적으로 생산에 필요한 양을 하역하고, 수출해야 하는 제품을 출하하려면 유조선이 부두에 접안 하여야 한다. 그런데 우리 나라 서해안의 경우는 조수 간만의 차가 크기 때문에 유조선이 접안할 수 있는 시간이 만조와 간조 전후 시간만 가능하여 하루 네 차례밖에 되지 않고 일몰과 일출 사이에도 선박 접안이 제한된다. Fig. 18에 하루 네 차례의 만조와 간조 중 밤은 회색으로 표시하고, 낮 시간에 접안 가능한 시점을 표시하였다. 게다가 풍랑주의보가 자주 발효되는 겨울철에는 하루에 한 번 정도밖에 입/출하가 이루어지지 않고 심한 경우는 아예 Closing 된다. 이런 경우에도 공장의 제품 탱크가 넘치지 않도록 그리고 원료가 바닥나지 않도록 입/출하가 원만하게 이루어져야 하는데, 각 탱크 Level을 고려하면서 부두에 유조선이 접안 하는 순서를 스케줄링 하는 문제가 매우 복잡해진다. 서해안에 위치한 크래커 공장의 경우 6개의 부두 운영을 담당하는 업체가 있고 각 부두는 공장의 탱크까지 파이프로 연결할 수 있는 시설이 있다. 경우에 따라서, 예를 들면 납사의 연결 파이프는 1번, 2번 부두에서만 가능하다는 등의 조건이 있을 수 있다. 선박의 크기가 큰 경우는 사이즈가 작은 부두에 접안하지 못할 수도 있다. 선박의 펌프 용량과 입고하는 원료의 양에 따라, 출하의 경우는 탱크와 연결된 펌프의 용량에 따라 한 선박이 부두에 접안해서 이송 작업을 완료할 때까지 소요시간도 다양하지만 추정은 가능하다. 소요시간은 5 시간에서 30 시간까지 넓은 범위에 이른다. 대기하고 있는 선박은 입항하여 정박하고 있는 선박에 대해서만 정보를 가지고 있다. 선명, 제품, 양, 입고 또는 출하 여부 등을 알 수 있고 정확한 유량 값은 과거 실적을 바탕으로 추정해야 한다. 같은 선박을 통해서 입고 실적이 있을 경우는 당시의 이송 유량 값을 참고하면 된다. 출하의 경우는 공장내의 펌프 유량이므로 제품별로 출하 실적을 참고해야 한다. 한 선박은 두 개 또는 네 개의 Cargo를 가지고 있어서 Cargo에 다른 제품을 선적하고 있고 두 가지 이상을 공장에 입고 또는 출하할 경우에는 상황에 따라 연속으로 이송하거나 두 번 이상 따로 접안할 수도 있다. 그리고 선박을 같이 사용하는 인근의 다른 회사가 있어서 두 회사의 접안 기회가 균등해야 하는 조건도 만족해야 한다. 이러한 선박 접안 스케줄링 문제를 해결하기 위해서 역시 여러 가지의 데이터가 필요하다. 우선은 물때 표를 통하여 하루에 접안이 가능한 만조 또는 간조 시간을 알아야 하는데 간만의 차이가 6미터 이내인 경우는 만조 또는 간조 전후로 2시간 이내이다. 간만의 차이가 6미터를 초과할 경우는 만조 또는 간조 전후 1시간 이내에 접안이 이루어져야 한다. 지역별 물때 표는 인터넷에 공개되어 있는 사이트가 많이 있다. 부두 운영을 관리하는 외주업체에서는 선박에서 입/출하 할 양과 소요시간을 고려하지는 않고, 접안 할 순서만을 반영하기 때문에 운영이나 영업 사원 입장에서는 자기가 담당하고 있는 제품의 선박이 몇 시에 접안 가능한지 늘 관심 대상이 된다.

어느 제품 탱크라도 넘칠 것으로 예상되는 경우는 Fig. 19에 표현한 것과 같이 급히 해당 제품을 출하하거나 인근에 파이프로 연결된 다른 회사에 빌려주는 경우 또는 최악의 경우 제품을 탱크로 보내지 못하고 NCC에 다시 투입하는 방법이 있다. 반대로 원료 탱

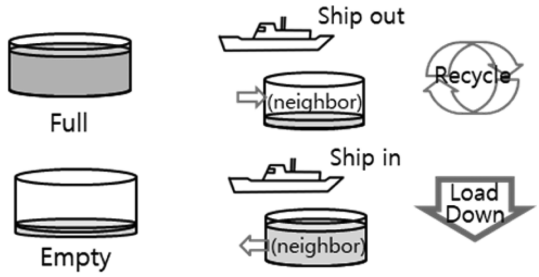


Fig. 19. Cases of Tank Emergency.

크가 부족할 경우는 급히 선박 입하하거나 인근 회사에서 빌려오거나 NCC 공장 Load를 줄이는 비상 상황이 발생하게 된다.

순서를 결정하는 문제라서 스케줄링을 모형화하는 것은 쉬울 수도 있으나 공장 내 각 탱크의 Level까지 고려해서 최적으로 접안 스케줄을 결정하려면 접안 가능 시간 사이의 소요시간과 탱크에서 입/출하 외에 생산공정에서 어느 정도의 비율로 생산되는지, 하위 공정에서는 어떤 비율로 제품을 소비하는지의 정보까지 알고 있어야 한다. 입/출하 제품에 관련된 공장의 담당자는 탱크를 운영하는 팀과 생산을 담당하는 팀으로 나누어져 있고 입/출하량에 대해서 금액을 주고받는 담당자는 영업 사원이 관여하고 있다. 따라서 물때 표와 유량 등 모든 정보 제공해줄 수 있는 사람은 공장에 없을 수도 있기 때문에 최적화 시스템을 개발하는 개발자가 직접 데이터를 취합하고 정리해야 한다. 따라서 이를 위한 프로그래밍 기술과 시간이 더 필요하다. 대부분의 사람들이 엑셀을 사용하여 업무를 하고 있으므로 가장 적합한 프로그램은 MS-VBA이고, 효과적인 프로그래밍을 위해 MS-Access DB를 같이 사용하는 것이 좋다.

선박 V가 부두 B에서 Timeslot T에 접안을 할 때만 1이 되도록 하는 이진 변수 $X_{V,B,T}$를 정의하였다.

$$\text{obj} \geq \sum_{V,B,T} X_{V,B,T} \times \left\{ \frac{\text{stT}_T}{24} - \text{Vin}_V \right\} + \sum_V \{ \text{Dem}_V \times \text{DMF} + \text{Dely}_V \times \text{DLF} \} \tag{17}$$

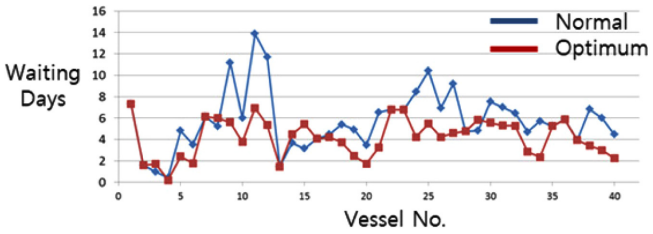
$$\text{iv}_{M,T} = \text{iv}_{M,T-1} + (\text{fNCC} + \text{fLPG}) \times \text{LenT}_T \times \text{Yd}_M - \text{MUse}_{M,T} - \text{fNCC} \times \text{lenT}_T \sum_{V,B} X_{V,B,T} \times \text{VSch}_{V,M,LG} + \text{fProd}_{M,T} - \text{fUse}_{M,T} + \text{fIn}_{M,T} - \text{fOut}_{M,T} \quad \forall (M,T) \tag{18}$$

$$\sum_{B,T} X_{V,B,T} = 1 \quad \forall (V_{\in VS1(V)}) \tag{19}$$

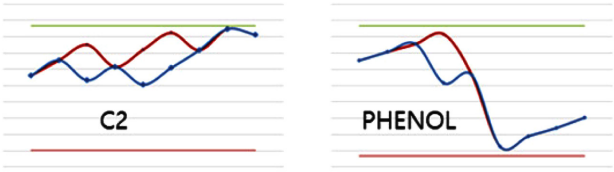
$$\text{VTE}_{V,B,T} \leq \text{stT}_T + \text{Pr} + \text{Af} + \sum_{M,C} \text{VDur}_{V,M,C} + \text{bigM} \times \{1 - X_{V,B,T}\} \quad \forall (V,B,T) \tag{20}$$

$$\text{VTE}_{V,B,T} \leq \text{stT}_T + \text{Pr} + \text{Af} + \sum_{M,C} \text{VDur}_{V,M,C} - \text{bigM} \times \{1 - X_{V,B,T}\} \quad \forall (V,B,T) \tag{21}$$

여기서 사용된 변수는, 선박 V가 B부두에서 최초 시작 시간으로부터 시간단위로 경과를 표시한 stT_T, 기존의 접안 예정시간으로부터 초과된 시간 Dely_V, 체선료 부과시점을 초과했을 경우의 초과분 Dem_V, 재고 Iv_T 입출하에 필요한 소요 시간 $\text{VDur}_{V,M,C}$ 접안 이후 이송 종료 시간 $\text{VTE}_{V,B,T}$ 등이 있다. 그리고 주어지는 파라미터로 Timeslot T에 접안했을 때 입항시간 Vin_V, 체선료 DMF, 체선료 부과시점 초과한 시간에 대한 가중치 DLF, Timeslot 길이 LenT_T, 시



(a) Comparison of Vessel waiting times



(b) Tank Profile of two products

Fig. 20. Estimated Tank Level Profiles.

간당 납사 투입량 fNCC와 LPG 투입량 fLPG , NCC를 통해 생산한 모노머의 비율 Yd_M, downstream에서 소비한 모노머의 양 $MUse_{M,T}$, 선박을 통해 입출하한 양 $VSsh_{V,M,LG}$, NCC외의 다른 공장에서 생산된 양 $fProd_{M,T}$ 소비된 양 $fUse_{M,T}$ 선박 외의 입/출하량 $fIn_{M,T}$, $fOut_{M,T}$ 선박 접안 이후 작업 준비시간 Pr 과 마무리 시간 Af 등이 있다. 납사를 투입하여 NCC 공정을 통해 각 모노머 제품이 정확히 어느 정도의 비율로 생산되는지에 대한 모델링은 또다른 학문 분야가 될 수 있기 때문에 여기서는 월별 실적 평균값으로 고정하여 사용하였다.

위에서 설명한 수학적 모델을 이용하여 한 시점의 선박 스케쥴과 최적화 결과를 비교하여 Fig. 20과 같이 나타내었다. 입항하여 대기하고 있던 선박은 약 40여 대였으며, 6개의 부두에 접안할 수 있다. 전체의 대기일 수 합이 232일에서 168일로 27% 정도로 감소 가능함을 알 수 있다(Fig. 20(a)). 공장에는 100 개 이상의 탱크가 있는데, 그 중에 두 가지 제품의 탱크 레벨을 Fig. 20(b)에 나타내었다. 여기서 프로파일 아래와 위의 가로선은 각각 탱크 레벨의 최소값, 최대값을 의미한다.

Set
· B: 부두
· M: 제품
· T: time slot (접안 가능한 시각 기준)
· V: 선박(vessel)

Decision Variables
· $Dely_V$: 선박 V의 기존 접안 계획 대비 delay 시간
· Dem_V: 선박 V의 체선료
· Iv_T: 탱크 T의 재고
· stT_T: 선박 V가 접안 한 시간
· $VTE_{V,B,T}$: 선박 V의 B부두에서 접안후 작업 완료 시간

Parameters
· Af: 이송 완료 후 마무리 시간
· DLF: 기존 계획 대비 delay 시간의 penalty
· DMF: 기준 체선료
· $fIN_{M,T}$: 제품 M을 인근 회사에서 받는 양
· fLPG: 원료 LPG의 시간당 투입량
· fNCC: 원료 납사의 시간당 투입량
· $fOut_{M,T}$: 제품 M을 인근 회사에 주는 양
· $fProd_{M,T}$: 제품 M의 Timeslot T 동안의 생산량
· $fUse_{M,T}$: 기타 공장에서 제품 M의 T 동안의 소비량
· $LenT_T$: Timeslot T의 길이(간조~만조 사이의 시간)
· $MUse_{M,T}$: 폴리머 공장에서 제품 M의 T 동안의 소비량
· $VDur_{V,M,C}$: 선박 V의 C회사 제품 M의 입출하 소요시간
· Vin_V: 선박 V의 입항 시간
· $VSch_{V,M,LG}$: 당 회사 제품 M의 선박V에서 입출하량
· Yd_M: 원료 투입량 대비 각 제품의 생산 비율
· Pr: 선박 접안 후 작업 준비 시간

6. ABS 생산 계획 최적화

우리가 일상생활에서 흔하게 접할 수 있는 일명 "플라스틱"은 컴퓨터, 냉장고, 에어컨, 공기청정기 등 거의 모든 제품에서 볼 수 있는데, 이렇게 다양한 모양으로 가공할 수 있는 상당부분의 플라스틱의 원료는 ABS 컴파운드 제품이다. 고강도 성질이 필요한 자동차 내장재 등은 EP (Engineering Plastic) 컴파운드 그룹에 속한다. 컴파운드 제품은 쌀알 크기 정도의 펠렛이라는 형태로 가공되는데 그 상위 원료를 비롯한 첨가제와 색상을 표현하는 안료와 배합하여 압출기에서 400~600도로 압출되어 쌀알 굵기 정도로 가래떡과 같이 길게 뽑아서 냉각을 시킨 후 펠렛 크기로 커팅하여 포장한다. 포장된 컴파운드 제품은 전 세계의 각종 제조업체에 공급된다. 쉽게 예상할 수 있듯이 컴파운드 제품은 내열, 투명, 난연, 고 단열 등으로 구분되고 고객도 다양할뿐더러 제품의 종류가 수백 가지에 이르고 색상까지 조합하면 수 만 가지의 제품으로 나뉠 수 있다. 컴파운드 공장은 전국에 흩어져 있고 수출 물량은 부두 근처에 있는 곳에서 생산이 이루어진다. 컴파운드 제품의 생산 계획은 비슷한 원료의 조합으로 나누어 생산하는데 공정 순서에서 가장 중요한 것은 색상 순서이다. 가장 많이 사용하는 Black 제품은 일부 전용라인에서 생산되지만 다양한 색깔의 소량 생산되는 제품들은 일부 라인에서 Transition이 계속 일어나며 생산된다. 컴파운드 라인의 생산계획은 수많은 제품의 종류 때문에 전체를 수학적으로 최적화하기는 어렵고 앞 서 언급한 일부의 유색 라인에 대해서만 계획을 수립하기도 하였다. 그런데 SCM 문제에서 실제 적용이 가장 어려운 것이 수요 변동에 의한 채찍효과(Bullwhip Effect)이고, 컴파운드 업계에서도 2차 제조업에 있는 업체들의 물량의 잦은 변동으로 인한 애로점이 상당히 커서 수많은 최적화 파라미터를 일일이 변경 입력해서 최적화 시스템을 적용하는 것보다는 계획 수립자의 직관으로 대응하는 것이 생산현장에서는 더 효과적으로 생각하기 때문에 직관에 의해 계획을 수립하고 있는 현실이다. 수학적 최적화 방법론을 적용할 수 있는 부분은 컴파운드 상위 원료인 DP (Dry Polymer) 또는 SAN (Styrene Acrylonitrile)이다. DP는 PBL을 중합하여 다시 DP Latex를 중합하고 탈수제를 이용하여 건조시켜서 파우더 형태로 생산하고, 여러 가지 원료를 배합하여 SAN은 한 번의 배치에서 연속적으로 생산한다. DP의 종류는 10가지 이내이고, SAN의 종류는 20가지 정도이다. Fig. 21에서 보이는 바와 같이 DP와 SAN이 컴파운드 제품의 주 원료이고 제품별로 DP, SAN의 기준 소요량이 15~50%

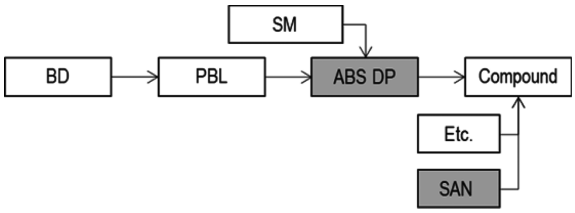
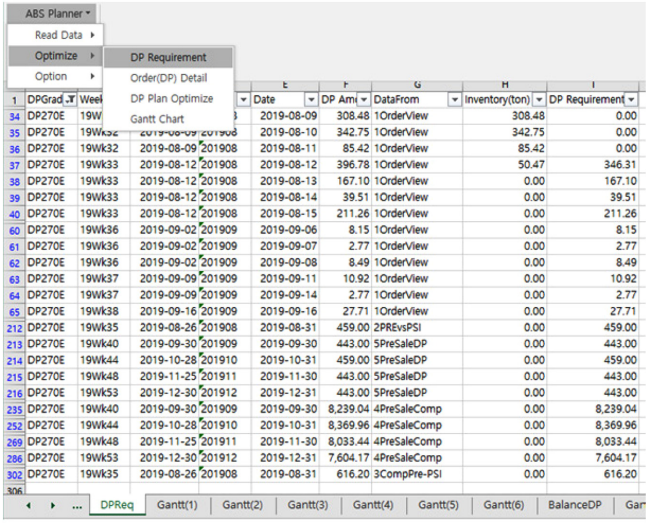


Fig. 21. Production scheme of ABS Product.

정도이고 기타 첨가제 등이 원료와 같이 투입된다.

DP와 SAN은 라인이 완전히 구분되기 때문에 최적화 문제는 따로 모델링하고 각각 최적화가 가능한데 같은 판매계획 데이터로부터 시작된다. 컴파운드 종류가 많기 때문에 각각의 원료 사용 정보를 담고 있는 BOM (Bill of Material) 데이터를 잘 활용하여 컴파운드 제품 양에서 DP와 SAN의 투입 비율에 따라 소요량을 뽑을 수 있다. 많은 데이터를 다루는 과정에서의 중요한 문제는 판매 계획 데이터의 형태에 따라야 한다는 것이다. 제품 코드에서부터 색상 및 포장 정보를 제외한 Grade명 기준으로 BOM 정보에서 DP, SAN의 소요량을 계산하고 생산 요청 날짜와 컴파운드 공장으로의 이송 리드타임을 고려해야 한다. 이 정보를 취합하면 DP, SAN 각각의 날짜 별 수요량을 뽑을 수 있다. 또한 판매계획에 확정되지는 않았지만 DP나 SAN으로 출하요청이 있는 경우도 있다. 수요 계획이라는 것은 언제든지 변동성이 있기 때문에 이러한 양은 해당 월 말일까지 생산하면 되는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 공장의 당일 재고는 DP, SAN의 수요계획에서도 날짜가 정해져 있는 컴파운드 제품에서의 수요량부터 배분하는 것이 합리적이다. 이러한 과정들을 모두 포함하면서 최적화 시스템을 개발하여 담당자가 사용할 수 있게 하려면 정보를 읽는 과정에서부터 수요량을 뽑고 공장의 현재 재고를 고려해주는 것까지 모두 프로그램을 통하여 자동화가 되어야 한다. 그렇지 않으면 최적화 솔루션은 보유하고 있으면서도 복잡한 업무 환경 속에 있는 담당자들이 활용을 못하게 될 수도 있다. 따라서 수학적 최적화 모형화를 수립하는 것보다 최적화에 필요한 파라미터들을 정리하는 것이 개발 과정에서 더 많은 시간이 소요된다. 판매계획과 공장의 현재 재고를 파악하기 위해 별도의 시스템 또는 데이터베이스에 접속해서 해당 자료를 다운 받아서 사용해야 한다. 역시 엑셀 포맷을 사용하고 있으므로 MS VBA를 활용하고 MS Access DB를 함께 사용하는 것이 적합하다.

판매 계획 데이터는 앞서 이야기 한 것처럼 컴파운드 제품의 생산요청조회가 있고 영업사원이 입력한 날짜와 생산 요청일이 있다. 이 요청일에 따라서 우선순위를 정하였다. 그리고 3개월 선행판매계획 데이터가 있는데, 여기는 컴파운드 제품 뿐 아니라 DP와 SAN으로 출하되는 양도 있지만 납기가 없다. Fig. 22에서 표현한 '생산요청조회(Orderview)'와 '선행판매(Presale)'가 이 두 가지를 의미한다. 그런데, 계획을 수립하는 시점은 월중이 될 가능성이 더 높으므로 당월의 선행 판매계획이라도 지금까지 얼만큼 출하했고, 월말까지 어느 정도를 더 출하될 지를 구분해야 한다. 사업부에서는 '선행대비PSI실적' 이라는 자료가 있어서 전날까지 출하실적을 뺀 값으로 추정해야 한다. 여기에서도 컴파운드 해당분에 날짜 다음으로 우선순위(1~5)를 부여했다. Fig. 22(a)에 표시된 재고 반영도 이 우선 순위에 따라 분배하였다. 반제품 종류별로 Fig. 22(b)와 같이 모아놓은 생산 필요량을 사용자가 확인 및 수정한 후에 최종 값을



	DPGrad	Week	Date	DP Amt	DataFrom	Inventory(ton)	DP Requirement
34	DP270E	19W	2019-08-09	308.48	1OrderView	308.48	0.00
35	DP270E	19Wk32	2019-08-10	342.75	1OrderView	342.75	0.00
36	DP270E	19Wk32	2019-08-11	85.42	1OrderView	85.42	0.00
37	DP270E	19Wk33	2019-08-12	396.78	1OrderView	50.47	346.31
38	DP270E	19Wk33	2019-08-13	167.10	1OrderView	0.00	167.10
39	DP270E	19Wk33	2019-08-14	39.51	1OrderView	0.00	39.51
40	DP270E	19Wk33	2019-08-15	211.26	1OrderView	0.00	211.26
60	DP270E	19Wk36	2019-09-06	8.15	1OrderView	0.00	8.15
61	DP270E	19Wk36	2019-09-07	2.77	1OrderView	0.00	2.77
62	DP270E	19Wk36	2019-09-08	8.49	1OrderView	0.00	8.49
63	DP270E	19Wk37	2019-09-11	10.92	1OrderView	0.00	10.92
64	DP270E	19Wk37	2019-09-14	2.77	1OrderView	0.00	2.77
65	DP270E	19Wk38	2019-09-16	27.71	1OrderView	0.00	27.71
212	DP270E	19Wk35	2019-08-31	459.00	2PREvsPSI	0.00	459.00
213	DP270E	19Wk40	2019-09-30	443.00	5PreSaleDP	0.00	443.00
214	DP270E	19Wk44	2019-10-31	459.00	5PreSaleDP	0.00	459.00
215	DP270E	19Wk48	2019-11-30	443.00	5PreSaleDP	0.00	443.00
216	DP270E	19Wk53	2019-12-31	443.00	5PreSaleDP	0.00	443.00
235	DP270E	19Wk40	2019-09-30	8,239.04	4PreSaleComp	0.00	8,239.04
252	DP270E	19Wk44	2019-10-31	8,369.96	4PreSaleComp	0.00	8,369.96
269	DP270E	19Wk48	2019-11-30	8,033.44	4PreSaleComp	0.00	8,033.44
286	DP270E	19Wk53	2019-12-31	7,604.17	4PreSaleComp	0.00	7,604.17
302	DP270E	19Wk35	2019-08-31	616.20	3CompPre-PSI	0.00	616.20

(a) Data of Sales Plan and Inventory Assign

After Inventory Assign
Sum : DP Requirement

DPGrade	DataFrom	19Wk35 8/26	19Wk35_ 9/1	19Wk36 9/2	19Wk37 9/9	19Wk38 9/16	19Wk39 9/23	19Wk40 9/30
DP270E	1OrderView	73	33	29	14	51	11	
	2PREvsPSI	459						
	5PreSaleDP							443
	4PreSaleComp							8,239
	3CompPre-PSI	616						
DP270E Summay		1,149	33	29	14	51	11	8,682
DP270M	1OrderView	0	0	0	0	0		
	4PreSaleComp							860
	3CompPre-PSI	0						
DP270M Summay		0	0	0	0	0		860
DP271	1OrderView	0		0		0		
	4PreSaleComp							1,413
	3CompPre-PSI	0						
DP271 Summay		0		0		0		1,413
DP280	1OrderView			0				
	4PreSaleComp							0
DP280 Summay				0				0
SA100	1OrderView							
	4PreSaleComp							0
SA100 Summay								0
SA130	1OrderView	0				0		
	4PreSaleComp							0
SA130 Summay		0				0		0

(b) DP Requirement of Production

Fig. 22. DP Requirement from Sales Plan and Inventory.

최적화에 파라미터로 입력하였다.

여기서 사용한 수학적 최적화 모형은 기타 생산계획 모델과 크게 다르지 않아서 생략하도록 하고, 프로그래밍을 통한 결과를 덧붙여서 설명하고자 한다. Fig. 22는 고객들이 요구하는 물량에 대해 제품 Grade별 생산 요청 내용을 영업사원이 입력한 수천 건의 오더 정보를 바탕으로 각 제품의 BOM에 따라 DP 소요량으로 환산하고 컴파운드 공장 이송 리드타임을 고려하여 날짜 별로 DP Grade별 소요량과 DP 공장의 현재 재고를 반영한 결과를 나타내었다. 수요 정보는 확실하게 계약된 오더뿐 아니라 이번 달과 다음달 수요 예측량까지 고려해야 하는데, 계획 세우기 전날까지의 출하실적을 뺀 잔량을 또 무시할 수가 없다. 오더의 합보다 남아있는 예측 량이 더 큰 경우는 생산 계획에 반영해주어야 한다. 고객이 갑자기 요구하는 급한 오더가 언제든지 발생할 수 있고, 거기에도 대응할 수 있도록 Robust한 생산계획을 세우는 것이 중요하기 때문이다. 따라서 최적화 기술의 실제 적용에 있어서는 학술적으로 접근했던 최적화 모형화를 수립하는 기술에만 국한되어 있어서는 안된다.

위와 같은 소요량을 근거로 월간 DP 생산계획을 최적화 한 결과를 파일로 그대로 읽어서 Fig. 23과 같이 Gantt Chart로 표현할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 월 계획은 본사에서 수급을 담당하는 팀과 공장의 생산팀이 협의하여 최종 결정을 하게 되는데, 수치화

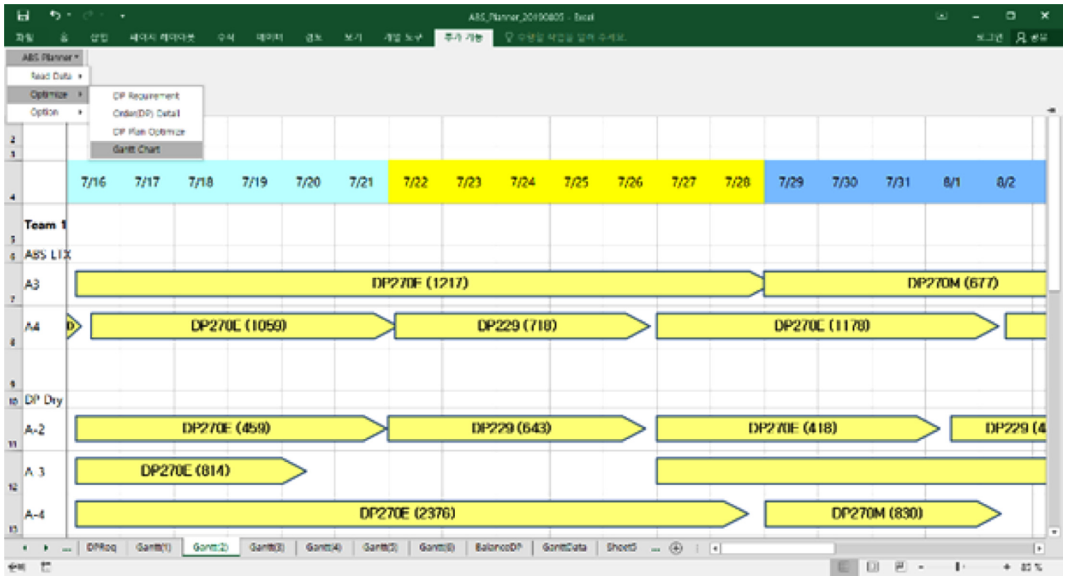


Fig. 23. Gantt Chart of ABS DP Production Plan.

되지 않은 고려 사항 등이 있어서 한 번 결정하는데 이틀 정도는 소요하게 된다. 본 최적화 시스템을 통하여 이틀 전부와 비교할 수는 없더라도 현재 기준으로 회사의 IT시스템으로 확인할 수 있는 데이터를 바탕으로 계획 초안을 30분 이내에 마련할 수 있게 된다.

7. 결 론

이상에서 선형모델의 수학적 최적화와 실제 업무의 활용에 대해서 사례를 보이며 설명을 하였다. 공정 최적화에 있어서 수학적 최적화를 통한 연구는 꽤 오래되었고 현재는 최적화의 개념과 활용 범위가 훨씬 더 커져서 통계적 최적화, Big Data 최적화나 인공지능 기술 구현을 위한 머신러닝(Machine Learning)과 딥러닝(Deep Learning) 기술이 각광을 받고 있다. Neural Network 기술도 수많은 파라미터를 결정해야 하는데 어떤 조합이 가장 좋은지를 찾는 일종의 최적화 개념이 필요한 것이다. 그렇지만 실제 현업에서는 Linear Programming 모델의 최적화만으로도 효율화를 실현하고 적용할 수 있는 부분이 상당히 많이 있다.

요즘에는 기업마다 상용화된 솔루션을 도입하는 경우도 많이 있는데, 이러한 시스템은 개발 비용이 많이 들고 개발 기간도 최소 1년 이상으로 상당히 길다. 또한 시스템 유지보수에 관련한 비용도 필요하다. 그러나 실제적으로 최적화의 내용을 살펴보면 수학적 최적화 관련 학술 논문 중에서 매우 어려운 모형화를 하고 있는 것은 아니다. 처음 투자하는 공장을 Set up하고 처음 가동하기 전에 사소한 모든 업무까지 매뉴얼화 하지 않는 이상 직원들은 선임자가 가르쳐준 대로 그들이 사용하던 자료 그대로 사용하는 경우가 많고 그것이 몇 년 익숙해진 이상 다른 포맷의 자료와 결과물을 활용하는 것을 어려워한다. 그리고 대부분은 Excel을 활용하고 있기 때문에 MS-VBA와 수학적 최적화 Solver의 조합은 매우 효율적인 것이라고 할 수 있다. 단점이라면 불확실성을 포함하고 있는 정보들을 다루는 것에 취약하다는 것인데 이것을 극복할 수 있도록 통계적 최적화나 Big Data 최적화의 장점을 잘 활용하는 것이 좋을 것 같다.

References

1. Lee, J.-U., Lee, H.-E., Heo, S.-K., Lee, H.-K. and Lee, I.-B., "Midterm Scheduling for the Production of a Stack and Folding-Type Battery Using a Hierarchical Method," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **55**, 10132-10146(2016).
2. Liu, S., Pinto, J. M. and Papageorgiou, L. G., "MILP-Based Approaches for Medium-Term Planning of Single-Stage Continuous Multiproduct Plants with Parallel Units," *Comput. Manag. Sci.*, **7**(4), 407-435(2010).
3. Sundaramoorthy, A. and Karimi, I. A., "A Simpler Better Slot-Based Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling in Multipurpose Batch Plants," *Chem. Eng. Sci.*, **60**(10), 2679-2702(2005).
4. Ierapetritou, M. G. and Floudas, C. A., "Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling. 1. Multipurpose Batch Processes," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **37**(11), 4341-4359(1998).
5. Papageorgiou, L. G. and Pantelides, C. C., "Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/Semicontinuous Plants. 2. A Mathematical Decomposition Approach," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**(2), 488-509(1996).