

연속 화학공정의 생산일정계획

이 경 범*, 이 호 경**, 이 인 범

*부경대학교 화학공학부, **포항공과대학교 화학공학과 지능자동화연구센터

1. 서론

최근에 화학공장의 생산계획 기술에 있어서 큰 발전이 있었다. 화학공장의 생산계획 기술에 대한 학술적인 연구결과는 참고문헌 Reklaitis(1991)에 요약되어 있다. 그러나 많은 연구들이 회분식 공정의 생산계획에 집중되어 있는데 그 이유는 회분식 공정이 장치구조는 비교적 단순하지만 운전 방식에 따라 생산비용의 차이가 크게 발생하기 때문이다. 연속화학 공정이라고 불리는 정유공정과 석유화학공정의 생산계획에 대한 연구는 이들 공정들이 대표적인 대용량 석유화학 제품들임에도 불구하고 화학공학 연구문헌에서 발견하기가 쉽지 않다. 표 1에는 정유와 석유화학공장에서 나타나는 대표적인 생산일정계획 문제와 관련된 연구문헌을 요약해 두었다. 선형계획법을 이용한 월별 생산계획 기술이 정유공장에 도입된 것은 이미 50여년전의 일이다(Bodington 1990). 그러나 정유와 석유화학공장의 일일 생산일정계획에 관한 연구는 표 1에서 나타난 것처럼 최근 십 여년 밖에 되지 않았다. 생산일정계획 기술의 개발이 지연된 주된 이유는 근본적으로 생산일정계획 최적화문제는 많은 경우의 조합을 취급하는 정수변수를 포함하고 있어서 계산시간이 문제의 규모가 증가함에 따라 기하급수적으로 증가하는 성질 때문에 이러한 정수변수를 취급하는 효율적인 알고리즘과 고속의 컴퓨터가 나오기 까지 많은 시간이 걸렸다. 그동안 많은 연구자들이 수리계획법이 아닌 예를 들어 전문가 시스템 같은 다른 기술의 적용을 시도하였으나 성공사례는 보고되지 않았다.

표 1에 있는 참고문헌 중에서 Tjoa et al.(1997)는 실제 공장에 대한 적용 예로서 Mitsubishi Chemical Co. 에서 납사 크래크의 생산계획 최적화에 관한 연구 결과로서 약 3.64 %의 수익증대를 평가하고 있는데 이 회사의 납사 처리용량에 비추어 볼 때 거대 석유화학 회사에서 생산계획 최적화가 얼마나 중요한가를 보여주고 있다.

정유 및 석유화학공장의 생산일정계획 문제는 크게 6가지로 분류될 수 있다. 이러한 구분은 석유화학 제품의 주 원료인 원유나 납사를 긴 주문인도 기

표 1. 연속화학공장의 생산일정계획 문제 분류.

Scheduling problem	Articles	Characteristics
Refinery crude purchase scheduling		*Ship scheduling *Property driven blending
Refinery crude feeding scheduling	Lee et al.(1996) Shah (1996) Pinto et al.(2000)	*Property driven blending *Block operation
Refinery product blending scheduling	Pinto et al.(2000)	*Property driven blending *Batch operation
Naphtha purchasing scheduling	Tjoa et al.(1997)	*Ship scheduling *Property driven blending
Naphtha cracker scheduling	Jain and Grossmann (1998)	*Nonlinear yield *Block operation
Polymer process scheduling	Karimi and Mcdonald(1997)	*Block operation *Sequence dependent cost

간을 가지고 구매하는 대형 공장의 업무절차의 구분에 따른 분류이다. 그림 1은 원유구매 문제를 도식화 한 것이다. 우리나라의 대형 정유회사는 원유를 먼 거리로부터 매우 큰 유조선을 이용하여 수입한다. 수입되는 원유는 증류, 황, 밀도, 점도, 인화점 등의 물리화학적 성질에 따라 몇 가지 부류로 구분된다. 어떠한 원유도 같은 물성을 갖는 경우는 없으며, 따라서 원유의 가격도 그 물성의 선호도에 따라 천차만별이다. 정유공정은 이러한 물성에 대해 최소한의 요구사항이 있으며 이 요구사항에서 벗어난 원유를 처리할 경우 상당한 운전비용의 증가를 감수해야 한다. 각 정유공정이 효과적으로 처리할 수 있는 원유의 물성의 범위는 공정마다 조금씩 다르다. 따라서 각 정유회사는 전 세계에 산재하는 원유 중에서 자신이 보유한 정유공정이 효과적으로 처리할 수 있는 물성을 가진 저렴한 원유를 선별하여 구매해야 한다. 대부분의 정유회사는 원유구매 비용절감을 위해 몇 가지 서로 다른 원유를 구매하여 자신의 공정에 적합한 물성을 가지도록 잘 배합하여 처리하는 시설을 보유하고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 대부분의 정유회사가 보유한 원유구매 및 생산관리 의사결정 지원 수단이 Planning 모형이라 불리는 선형계획법을 이용한 월별 생산계획 시스템이다. 이 시스템의 계산결과는 월 단위의 목표치로서 구체적인 작업을 정확히 언제 얼마나 어떻게 해야 할 지에 대한 정보

를 제공하지 않는다. 원유의 구매, 수송 및 재고관리와 관련된 단기 또는 일일 단위의 업무계획을 원유 구매 일정계획이라고 한다. 원유를 물성에 따라 대개 5 개 정도의 군으로 구분하여 관리한다. 저장시설이 충분할 경우 다른 종류의 원유들을 서로 섞지 않고 재고관리를 할 수 있으며 물성치를 예측할 필요가 없게 되고 문제는 각 군에 속하는 원유들의 수송용량과 시간, 그리고 적정 재고수준을 유지하는 것으로 단순화되며 이미 상용화된 기술이 존재한다. Chajakis (1997)의 보고에 의하면 혼합 정수계획법으로 구성된 그의 원유 수송 및 재고관리 최적화 모형을 실제 정유회사에 적용하였을 때 약 8%의 비용절감 효과를 얻었다. 그러나 우리나라의 정유공장과 같이 저장시설이 부족하여 다른 종류의 원유의 배합이 자주 발생할 경우 원유의 물성을 예측하여 적정 범위를 유지하도록 원유 수급을 조절하여야 하며 문제는 매우 복잡하여 아직 보고된 최적화 기술이 없다.

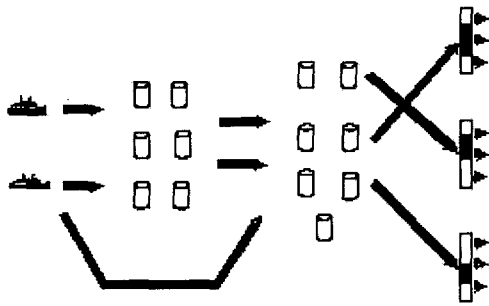


그림 1. 원유 구매 문제.

정유공장에 도착한 원유는 바로 원유처리 시설인 상압증류탑으로 주입되지 않는다. 한 유조선에 다수의 원유가 실려서 부두에 도착하면 여러개의 군으로 분류되어 일차 저장탱크로 하역 된다. 각 원유 저장탱크의 물성을 고려하여 생산계획 실무자에 의해 계산된 배합비율에 의하여 배합탱크로 이송된 원유는 충분한 혼합과 배수과정을 거친 다음 상압 증류탑으로 주입된다. 실무자가 배합비율을 계산할 때에는 원유에서 분리되는 각 제품의 수요량과 물성, 상압 증류탑의 설계용량과 최적처리 물성 등을 고려하여 결정하며, 이 과정은 운전비용의 증감에 큰 영향을 미친다. 상압 증류탑은 연속공정으로서 한 배합탱크에서 원유의 주입이 끝나면 다른 배합탱크로 공정의 운전을 중지하지 않고 교체한다. 한 배합탱크 내의 원유의 물성은 균일하지만 배합탱크가 바뀌면 원유의 물성은 달라지며 상압 증류탑의 운전조작도 변하게 된다. 따라서 상압 증류탑 자체는 연속적으로 가동되지만 자세한 운전 조작과 생산 제품의 품질과 물량은 비연속적으로 바뀌게 된다. Block 운전이라고

도 불리는 이 반연속 운전방식은 연속공정이라고 불리는 화학공정의 큰 특징으로서 생산일정계획 문제를 매우 어렵게 만든다. 즉 연속 화학공정 생산계획의 큰 특징은 물리화학적 물성치를 고려해야 한다는 사실과 반연속 운전방식을 해석해야 한다는 사실인데 전자는 최적화 문제를 비선형으로 만들고 후자는 정수변수를 취급해야 함을 의미한다. 즉 비선형 혼합정수 계획법을 이용한 원유 배합 및 주입 생산일정계획이라고 불리는 이 최적화 문제에 정유공장에 도착한 원유는 바로 원유처리시설인 상압대환 참고자

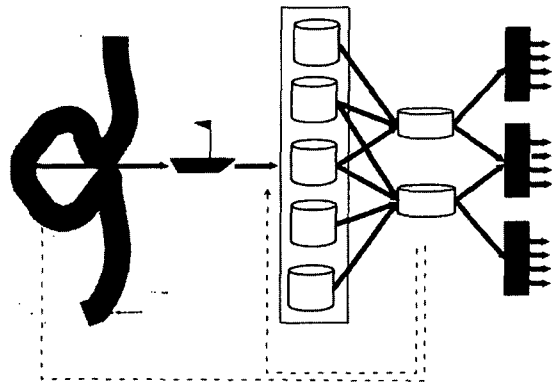


그림 2. 원유 배합 및 주입 문제.

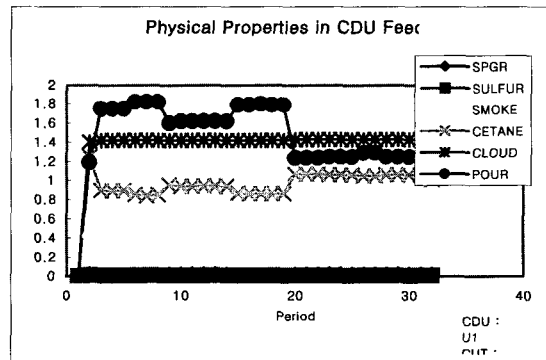
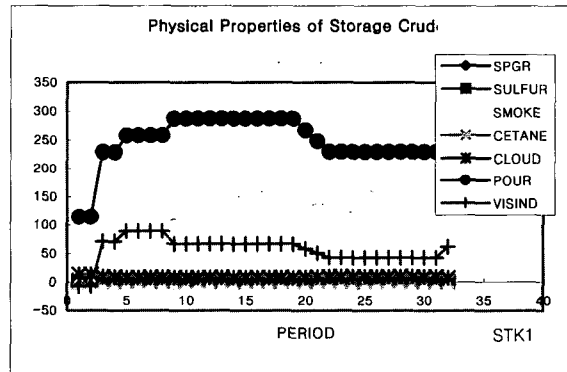


그림 3. 원유 물성치 예측.

료는 Lee et al. (1996) and Shah (1996)에 나타나 있으며, 최근 실제 공장에 대한 적용 사례가 Pinto et al. (2000)에 발표되었다. 그림 2는 원유 배합 및 주입문제를 도식화 한 것이고, 그림 3은 원유 저장탱크와 상압 증류탑에 주입되는 배합된 원유의 각종 물성치 예측을 그린 것이다.

정유회사의 최종제품은 약 20가지가 되며 제품마다 생산공정의 특성이 다르다. 정유공장의 주종 제품인 가솔린이나 디젤 등은 공정에서 직접 생산되지 않고 여러 가지 성분들을 배합하여 최종제품의 물성을 규격에 맞게 조정한다. 즉 공정 장치에서 나오는 물질은 배합을 위한 중간단계의 성분이다. 일부 성분들은 수입되거나 다른 회사에서 구매된다. 이들 배합성분들의 배합 비율은 그때 그때의 배합 성분들의 물성에 따라 달라진다. 배합작업은 완전히 회분식으로 진행된다. 배합성분을 가득 채워서 배합이 끝난 탱크의 제품은 그 제품의 물성치 규격이 맞는지 실험실에서 분석을 시행하며 분석결과 규격에 맞으면 출하를 시작한다. 실험분석에 소요되는 시간은 2-3일이며 분석이 끝난 탱크의 제품은 완전히 소모될 때까지 배합성분을 주입하지 않는다. 이 최종제품 생산일정계획 문제도 원유배합 및 주입 문제와 마찬가지로 공정에서 직접 생산되거나 외국 또는 다른 회사에서 구매되는 다양하면서 가변적인 원료의 여러 가지 물성치와 그 구매 가격을 적절히 고려하여 최종제품의 물성치 규격에 맞으며 경제적인 배합비율을 예측하는 것이 관건이다. 그림 4는 정유 제품 중에서 가솔린 배합 시설을 그린 것이고 표 2는 가솔린 제품의 규격에 포함된 물성 항목들이다. Pinto et al. (2000)에 비교적 간단한 설비를 갖춘 실제 정유공장의 제품 배합문제를 혼합정수 계획법으로 해결한 내용이 발표되었다.

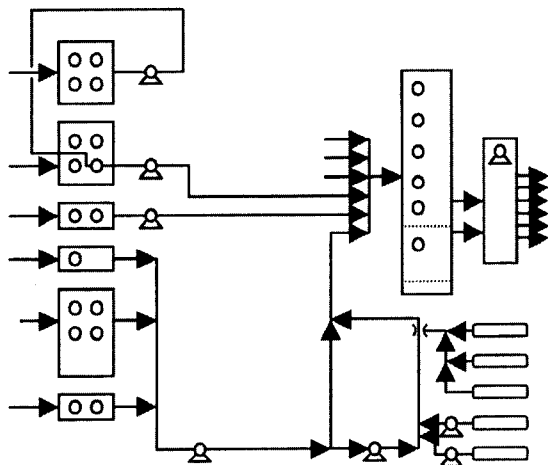


그림 4. 가솔린 배합시설.

표 2. 가솔린 규격 항목.

RON(Research Octane Number)
RVP(Reid Vapor Pressure)
VLPT(Vapor Lock Point)
10 % (ASTM D86)
50 % (ASTM D86)
90 % (ASTM D86)
EP(End Point)
SULFUR
TEL(Tetra Ethyl Lead)
PONA

일부 정유공정의 생산일정계획을 따로 세분하여 분류하기도 하나 저자들의 견해로는 정유공정의 최적화 문제는 물질의 이동에 관련된 시간적 관계를 다루는 생산계획 문제라고 하기 보다는 공정 운전변수들의 물리화학적 상관관계를 다루는 실시간 공정 최적화 기능이 가깝다. 정유공장의 생산계획 문제가 다른 생산계획문제와 구별되는 점은 제품의 품질을 규정하는 물성치의 변화에 따라 원료물질의 배합비율이 달라지므로 모든 물질의 물성치를 예측하는 관계식이 제약식에 추가된다는 점이다. 이러한 물성치를 예측하는 관계식은 일반적으로 심한 비선형이며 설사 선형으로 가정하더라도 배합공정의 특성상 쌍일차 관계보다 단순화하기 어렵다. 따라서 정유공장의 생산일정계획 문제는 비선형 혼합정수계획법의 범주에 속하는 매우 어려운 최적화 문제이다.

정유공정과 석유화학공정이 연결된 공장에서는 석유화학 제품의 원료인 납사를 정유공정에서 직접 조달하므로 납사 구매와 관련된 생산일정계획 문제가 발생하지 않는다. 그러나 정유공정이 없는 석유화학공장의 경우 납사를 국내외로부터 구매해야 하는데 이 경우 원유구매와 성격이 같은 생산계획 문제가 발생한다. 즉 구매 대상인 납사의 주요 물성인 밀도 PONA, 황 등의 값이 저마다 다르고 그에 따라 그 가격도 다양하다. 납사 크래크의 최적 운전 조건에 맞는 납사를 주입하기 위해서 구매된 납사는 탱크에서 배합된 뒤 주입된다. 단 납사 크래크는 열분해 화학반응을 일으키는 정유공정의 상압 증류탑보다 복잡한 장치로서 장치 효율의 시간에 따른 기능저하와 관련된 비선형 제약식을 내포한다. 그림 5는 납사 구매와 크래크 운전 문제를 도식화 한 것이다. 이러한 문제에 대해서 Tjoa (1997)은 비선형 혼합정수 계획법을 적용하여 큰 기대효과를 얻었으며, Jain and Grossmann (1998)는 납사 구매를 제외한 크래크 운전의 생산 일정계획에 대한 우수한 최적화 모형을 제시하였다.

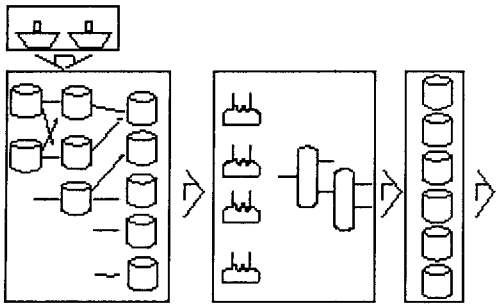


그림 5. 납사 구매 및 크래크 최적 운영 문제.

납사 크래크는 납사를 분해하여 에틸렌, 프로필렌 등 석유화학 제품의 기초 원료를 생산한다. 대표적인 범용 고분자 제품인 PP, HDPE, LDPE, LLDPE 등은 에틸렌과 프로필렌이 주 원료이다. 범용 고분자 제품은 최종 상태가 고체입자인가 액체인가에 따라 생산방식이 크게 달라진다. 고체입자의 경우 포장과정을 거쳐 창고에 저장되며, 액체인 경우 저장탱크에 액체 상태로 저장된다. 대부분의 범용 고분자 제품은 고체입자 상태로 생산되고 액체 상태로 생산되는 제품은 합성고무 계통의 제품들이다. 범용 고분자 공정의 반응기는 정유공정의 상압 증류 탑처럼 반 연속 운전을 한다. 즉 반응기 하나 당 대개 10 개 정도의 다른 제품을 생산해야 하는데 반응기 자체는 지속적으로 가동되지만 생산 제품은 바뀐다. 생산제품을 바꿀 경우 많은 비규격품이 발생하는데 이 비규격품의 발생을 최소화 하는 것이 매우 중요하다. 생산제품 교체 시 반응기에서 발생하는 비규격품의 양은 제품의 교환 순서에 따라 많은 차이가 나므로 비규격품의 발생을 최소화 하는 생산 순서를 유지할 필요가 있다. 하나의 장치가 다수의 제품을 생산해야 하므로 수요량과 재고 및 생산주기의 균형을 유지해야 한다. 만약 한 제품의 생산주기를 늘릴 경우 그 제품의 재고는 늘어나지만 다른 제품은 재고부족 현상이 일어날 것이다. 그렇다고 생산 주기를 줄이면 고객의 수요변화에 대한 적응력은 증가하지만 잦은 생산제품 교체로 인해 비규격품 발생량이 증가하고 따라서 생산단가가 증가하게 된다. 단 정유공장의 생산계획 문제에 비해 용이한 점은 물성치를 고려할 필요가 없다는 점이다. 원료의 배합비율이 제품에 따라 일정하므로 물성치를 예측하기 위한 비선형 제약식은 나타나지 않는다. 따라서 범용 고분자 공장의 생산일정계획은 선형 혼합정수 계획법의 범주에서 해결될 수 있다. 화학공장의 생산일정계획 문제가 근본적으로 매우 어려운 문제임에도 불구하고 상용화된 많은 소프트웨어를 볼 수 있다. 이들은 생산일정계획 문제를 정면으로 풀기 보다는 대화식 일정 진도표(Interactive Gantt Chart), 전문가 시

스템, 수리계획법 등을 적용할 수 있는 도구를 갖춘 사용자 환경을 제공하고 있다. (상용화된 화학공장 생산계획용 소프트웨어에 대한 자세한 내용은 <http://www.aiche.org/software/>를 참조) Faccenda and Baker (1990)는 이러한 상용화된 생산계획용 소프트웨어에 내장된 선형계획법과 전문가 시스템을 이용하여 범용 고분자 공장의 생산일정계획 시스템을 개발했다. 한편 Karimi and McDonald (1997)는 범용 고분자 공정을 비롯한 반연속 공정에 적용될 수 있는 매우 효과적인 생산일정계획 최적화 모형을 혼합정수 계획법으로 개발하였으며, 이 수리모형을 이용하여 실제 고분자 공장에 적용한 사례가 Son and Yi (1999), Yi et al. (2000) 에 발표되었다.

반 연속 공정은 PS, ABS, PVC, PET K-RESIN, Carbon Black 등의 범용 고분자 공장 뿐만 아니라 윤활기유(Lube Base Oil)공장, 용제(Solvent)공장, 등의 석유화학공정과 함께 제철공장의 연주(Continuous Casting)공정에도 나타난다. 범용 고분자 공장보다 하부 단계에 속하는 화학공장 들은 대개 회분식 생산방식을 택하고 있다. 일부 범용 고분자 공정도 회분식으로 설계된 경우도 있다. 회분식 공정의 생산일정계획은 Rekalitis(1991) 에서 소개된 바와 같이 연속 공정에 비해서 많은 연구와 실적이 싸여 있으며 새로운 기술이 계속 소개되고 있다. 본 논문은 범용 고분자 공장에 대한 저자들의 생산일정계획 개발 경험을 소개하고자 한다.

2. 생산계획 현황

그림 6은 합성수지와 같은 고체입자 상태의 범용 고분자 공정의 개념도를 나타낸 것이고 그림 7은 Polybutene 과 같은 액체상태의 고분자 공장을 도식화한 것이다. 고체 입자 상태의 범용 고분자 공정은 크게 반응기, 사출기, 포장기의 3단계 공정으로 구성되어 있으며, 각 단계의 사이에는 Silo 라 불리는 중간 저장조가 있다. 일반적으로 사출기와 포장기의 생산능력이 반응기보다 크게 설계되므로 중요한 것은 반응기의 생산계획이고 사출기와 포장기의 생산계획은 반응기 생산계획에 종속된다. 반응기는 여러 대 설치될 수 있지만 대부분의 제품이 특정 반응기에 전용으로 생산되고 극소수의 제품이 반응기 생산용량의 불균형을 맞추기 위해 2대의 반응기에서 생산되고 있다. 실제로 3대 이상의 반응기에서 생산되는 제품은 생산빈도가 늘어나서 비용증가를 초래하므로 매우 이례적이다. 따라서 생산계획은 2대 이하의 반응기에 대한 문제로 분해될 수 있다. 일반적으로 반응기당 약 10개의 제품이 생산된다고 볼 때 전형적인 합성수지 공장의 생산계획 문제는 2대의 반응기에 약 20개의 제품을 생산하는 문제로 요약될

수 있는데 여타 화학공장에 비해 규모가 작아 보이지만 실제로는 서론에서 언급한 대로 매우 복잡하여 현재까지 대부분의 공장들이 수작업에 의존하고 있다.

반응기에서 나온 중간제품은 분말 상태로서 Silo에 저장되며 벌크제품은 탱크트럭을 이용하여 출하된다. 포장용 제품이 되기 위해서는 분말상태의 중간제품을 고체입자 형태로 전환해 주는 사출기를 거치게 된다. 사출기에서 나온 입자형태의 제품은 포장기계에서 여러 가지 포장 용기에 주입되기 전에 혼합장치가 부착된 Blender에서 제품의 품질을 균질화 하기 위해 혼합한다. 반응기에서 나온 중간제품이 Silo 사출기, Blender를 거치는 동안 약 2일 정도의 시간지연이 발생한다. 이들의 가동은 반응기에 종속되어 있으므로 자세한 운전지침은 생산계획 실무자의 소관이 아니다. 포장기계의 운영은 생산비용에 미치는 영향이 미미하므로 상세한 일정계획이 필요하지 않지만 반응기는 24시간 가동되는데 비해 포장작업은 주중의 낮 시간에만 실시되므로 포장기계의 용량과 작업일시 및 중간제품의 이동과 최종제품의 재고량을 고려해야 한다.

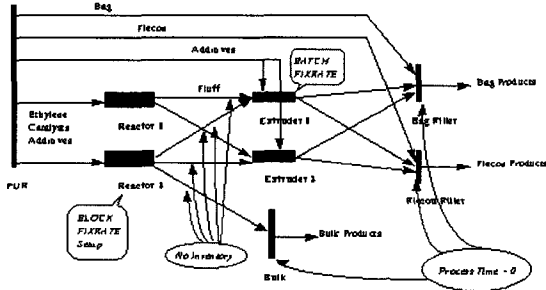


그림 6. 고체입자 상태의 고분자 생산 공장.

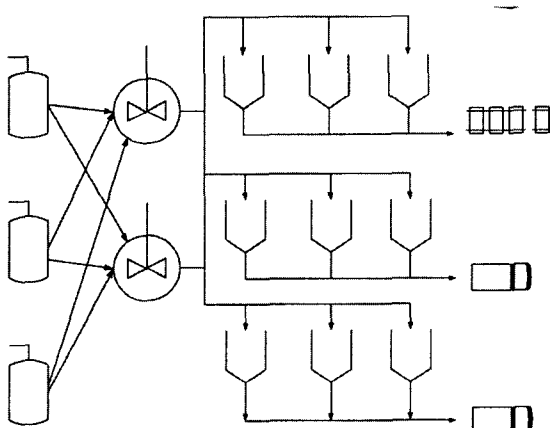
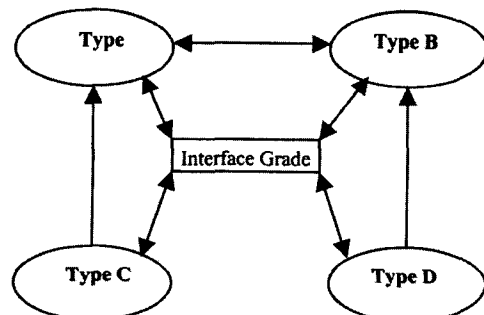


그림 7. 액체 상태의 고분자 생산 공장.

반응기에서 제품종류 변동시 발생하는 불량품은 모두 폐기되는 것은 아니고 약 10% 저가로 판매된다. 반응기에서 생산되는 제품종류의 비슷한 물성을 갖는

부류를 모아서 type 이라고 부르는데 같은 type에 속하는 제품종류는 불량품이 발생하지 않기 때문에 가능한 연달아 생산하도록 순서를 정하는 것이 생산비용 절감 뿐만 아니라 안전 운전에도 유리하다. type 이 다른 제품으로 변경될 때 불량품이 발생하는데 발생량은 제품 순서에 따라 다르며 또한 무작위성까지 내포하고 있다. 생산계획 실무자는 생산제품의 순서에 따른 불량품 발생량의 통계적 평균치를 보유하고 있는데 이를 Type Change 비용이라고 한다. 각 제품종류의 생산 주기를 늘린다면 전체 Type Change 횟수를 줄일 수 있을 것이다. 그러나 이 경우 어떤 제품은 재고량이 남고 어떤 제품은 재고가 부족해지는 불균형이 발생할 것이다. 어떤 제품종류들은 서로 연달아 생산할 수 없는 것도 있다. 제품종류의 생산 순서는 고정적으로 정해져 있거나 복잡한 규칙을 따르거나 생산 순서는 미리 정해져 있지 않지만 생산비용 절감을 위해 최적화 해야 하는 경우가 있다. 같은 제품을 생산하는 경우라도 반응기에 따라 다르다. 그림 8는 PP 공장의 3개의 반응기에 대한 제품종류 생산순서 규칙을 도식화 한 것이다. 어떤 제품은 수요가 있던 없든 type 을 바꿀 때 반드시 최소량을 생산하기도 한다. 그림 9는 LDPE의 경우인데 Melting Index 가 증가하거나 감소하는 순서로 생산한다. 그림 10에서 보인 것처럼 LDPE와 LLDPE의 경우 Shut-down이 생산순서에 포함되어 있다. Type Change 비용을 줄이는 것은 재고 유지비나 판매 유실비 등 다른 비용항목에 비해 중요도가 실제 금액보다 높다. 재고유지 비용은 보통 화학공장에서 무시되는 경향이 있다. 따라서 항상 재고량은 가능한 최대로 유지한다. 그리고 판매 유실비용은 개념적으로는 매우 중요하다고 인식하고 있으나 실제로 계량화하기가 어려우므로 논의대상에서 제외되는 경우가 많다. 그러나 Type Change 비용은 가장 계량적인 비용발생 요인이므로 생산계획 성능평가의 중요한 지표가 된다. 따라서 정해진 생산계획 순서에 대한 규칙은 반드시 지키려는 경향이 강하다.

과거 수작업 생산계획의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 이러한 현상은 대부분의 국내의 화학 공장들이 공통적으로 안고 있는 문제점들이다.



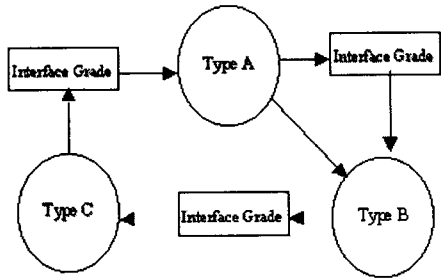
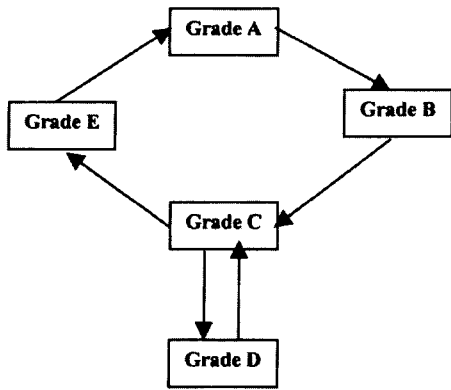


그림 8. 여러가지 제품 생산순서.

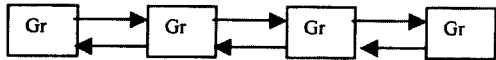


그림 9. Melting Index 차이를 최소화하는 생산순서.

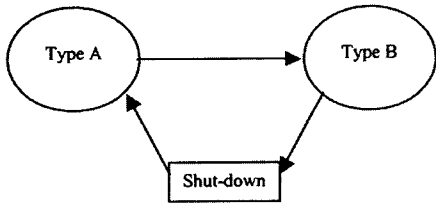


그림 10. Shut-down 이 포함된 생산순서.

- (1) Type Change(T/C) 비용을 최소화하려고 했다. 대표적인 것이 제품의 Type 개념으로서 같은 Type 은 가능한 동시에 생산하는 것이다. 이 개념이 극단적으로 적용될 때는 일부제품 특히 비주종 제품의 재고부족을 감수해야 한다. 실제로 재고 유지비용이나 판매유실비용을 동시에 고려한다면 T/C 비용은 과다하게 평가된 점이 적지 않다. 이것이 정당화된 근거는 수요예측이 불확실하다는 것이다. 즉 T/C 비용을 무시하고 특정 제품을 생산을 해도 그 제품이 반드시 출하될 지는 장담할 수 없기 때문이다.
- (2) 공정의 가동을 즉 제품 생산속도를 임의로 변경한다는 점이다. 일반적으로 화학공장은 가능한 가동율을 변화시키지 않는다. 즉 Shut-Down 을

통해 총 물량공급 균형을 조절하지 한번 가동하면 특별한 사정이 없는 한 일정한 생산속도를 유지한다. 생산속도를 변경할 경우 공정의 교란 상태에서 에너지 소모량이 증가하고 품질저하의 요인이 되기 때문이다. 자동차도 시내주행보다 고속도로에서 연료소모가 줄어드는 것은 자명한 일이다. 그러나 합성수지 공장의 경우 제품수요의 변화를 생산속도를 조절 함으로서 적절히 대처하고자 하는 경우가 있는데 이것이 정당화된 근거는 합성수지 공정들이 Heater가 없어서 가시적인 에너지 소모량 증가가 확인되지 않고 제품 품질저하도 다른 방법으로 보상되기 때문으로 사료된다.

- (3) 벌크 제품을 저장하는 Silo 용량이 부족하여 생산계획에 큰 제약이 된다. 벌크 제품은 내부고객으로서 안정적 공급을 보장해야 하고 야적할 수 없기 때문에 필요이상 미리 생산할 수도 없다. 벌크 제품은 T/C 비용을 결정하는 주 요인이다.
- (4) 제품생산순서가 복잡하게 결정되어 있다. 제품생산순서가 미리 결정되는 요인은 공정특성상 이미 결정된 경우와 T/C 비용을 줄이기 위한 경우가 있다. 그러나 이러한 요인도 아니면서 관례상 되풀이 되는 경우가 있는데 이것은 안정적인 제품수요가 지속되는 과정에서 정착된 것이다.
- (5) 생산계획과 수요예측은 불가분의 관계에 있다. 생산계획은 수요예측이 100% 정확하다는 가정하에 계산된다. 그리고 전산화된 생산계획 시스템은 수요예측이 변경되었을 때 즉시 생산계획을 변경할 수 있게 해 준다. 생산계획 시스템이 최적화 된 상태에서는 수요예측의 불확실성이 전체 생산계획 결과의 부적절함에 직접 영향을 끼치게 된다. 수요예측을 100 % 맞출 수 있는 방법은 신이 아닌 이상 불가능하다. 그러나 수요예측을 함에 있어서 최선을 다했는가 하는 점은 검토되어야 한다. 상대적으로 불확실성이 큰 입력자료를 바탕으로 아무리 정밀한 계산을 해 본들 그 불확실성은 감소되지 않는다. 대부분의 화학 공장들은 수요예측을 수작업으로 하고 있는데 수요예측을 전문으로 하는 상용화된 소프트웨어가 많이 나와 있으니 이들의 도입을 적극 검토하는 것이 바람직하다.
- (6) 최종제품의 재고관리기준이 불명확하다. 즉 평소에 창고에 어떤 제품을 얼마나 저장을 하고 있는 것이 바람직한지 판단하는 기준이 없다. 이것은 수요예측의 불확실성과 관계가 있다. 수요예측이 많이 틀리는 제품은 평소에 많이 쌓아 두어야 하고 상대적으로 잘 맞는 제품은 적게 쌓아 두어도 된다. 수요예측의 불확실성은 과거 3년간 수요예측 자료와 실제 판매자료가 있어야 불확실성을 판단할 수가 있다. 지금부터라도 자

료를 축적해 나가는 것이 현명하다.

- (7) 전산화된 생산계획의 질은 얼마나 적절한 비용 자료를 입력하는가에 달려있다. 각종 비용 자료들은 현재 대부분의 화학회사에서는 보관되어 있지 않은 특이한 자료를 상당기간 축적해야 계산되어 질 수 있다. 이러한 자료들도 지금부터 축적해 나가는 것이 바람직하다

D 기업은 HDPE, PP, LDPE, LLDPE, PB, K-RESIN 공장을 가진 국내의 선도적인 석유화학 업체로서 전사적인 조직개편과 업무 전산화 및 자동화를 추진하던 차에 제조업체 경영의 핵심이라고 할 수 있는 생산계획 업무가 여전히 경험적인 수작업으로 진행되고 있음을 발견하였다. D 회사는 1차적으로 선진 생산계획기술의 습득을 위해 97년 7월부터 6개월 간 HDPE 공장에 대해 선진국에서 실제로 사용중인 생산계획용 소프트웨어를 도입하여 전문가 시스템을 이용한 생산계획 시스템을 개발하였다. 그리고 2차적으로 전문가 시스템의 문제점을 극복하고 생산계획기술의 자립화를 위해 98년 4월부터 99년 8월까지 나머지 5개 공장에 대해 생산계획 시스템을 개발했다. 2차 사업에서는 1차 사업에서 전문가 시스템을 사용함으로써 나타난 문제점을 개선하고자 수리계획법 즉 Karimi and Mcdonald(1997)에서 소개된 혼합정수 계획법 모형을 도입하였다. 그 결과 Karimi-Mcdonald 모형이 전문가 시스템보다 우수하다고 판명되었고 따라서 1차 사업에서 개발된 전문가 시스템은 폐기되고 혼합정수 계획법 모형으로 대체되었다.

D회사는 급변하는 생산계획 총괄팀이 생기기 전까지 생산계획업무에 대한 주관부서가 없이 영업부와 생산부의 담당자가 각자 역할을 분담하여 협의하에 진행되어 왔다. 영업부에서 각 공장별로 판매현황과 초보적인 공정 운전지식을 바탕으로 생산계획 초안을 작성하면 생산부에서 공정 운전과 창고 재고관리상의 문제점을 검토하여 보완한 뒤 실행되었다. 이는 대규모 제조업 운영의 관례상 특이한 경우로서 마치 지휘자가 없는 오케스트라가 교향곡을 연주하는 것과 비유된다. 이것이 가능했던 배경을 살펴보면 D 공장은 그 원료와 생산제품이 석유화학산업의 중간 단계 제품으로서 정유공장처럼 원료의 품질이나 가격이 다양하고 변화무쌍하지 않으며, 완제품 수요도 국내 시장에서 독점적 대기업으로서 큰 변동을 겪지 않았기 때문으로 판단된다. 그러나 이제 사업 환경은 급변하고 있다. 경쟁업체의 난립으로 공급초과 상태에서 시장수요는 급변하고, 생산단가를 줄이기 위해서는 원료의 구입을 다변화해야 한다. IMF 이전에는 일년에 한번 Shut-Down 할까말까 하던 것이 이제는 한 달에 한번 끌로 해야 하는 상황이다. 이런 환경에서 새로이 생산계획 총괄 팀을 만들고 생산계획의 고급기술을 도입하는 것은 매우 의미 있

는 일이다.

한편 D 회사는 생산계획 시스템 개발과 병행하여 전사적인 경영정보관리 시스템(MIS)을 개발하고 있다. 생산계획 시스템과 MIS 는 그림 14에 나타난 것처럼 불가분의 관계로서 생산계획 시스템은 MIS 를 통하여 영업부로부터 수요예측자료를 받아야 하고 계산된 결과를 자재, 생산, 출하, 영업부에 배포하여야 한다. 제조업에서 생산계획 관련 정보의 흐름은 매우 중요하며 이들 부서간의 자료흐름이 원활할수록 사업 시스템의 총체적 성능은 증폭된다.

3. 수작업과 전문가 시스템

상용화된 범용 고분자 공장 생산일정 계획용 소프트웨어는 전문가 시스템이 결합된 월별 선형계획법 모형을 이용한다 (Faccenda and Baker (1990)). 생산계획 선형계획법 모형은 월 단위의 생산 물량과 재고 변화를 계산하므로 한달 이내에서 정확한 생산 시작 시점이나 생산순서에 관한 정보는 제공하지 않는다. 생산순서를 취급하는 한가지 기술은 외판원 문제 (Traveling Sales Man Problem)로 알려진 기술을 이용하는 것인데 이 기술은 재고용량이 부족하거나 정밀한 재고 조절이 필요할 경우 효과가 없다. D 공장은 15일분 재고를 저장할 수 있는 창고와 5일분 벌크 재고를 저장하는 Silo를 가지고 있다. 벌크 제품이란 포장되지 않고 탱크트럭으로 고객에게 대량으로 수송하는 제품인데 일반적으로 중요고객이기 때문에 주문미달이 허용되지 않는다. 따라서 벌크 제품은 벌크를 저장하는 silo가 비면 바로 생산에 들어가야 하고 Silo가 차면 생산을 멈추어야 한다. 이처럼 재고공간이 부족하거나 엄격한 재고관리가 요구되는 상황에서는 각 제품의 재고변화를 고려하지 않는 외판원 문제기술을 적용할 수 없다. 이를 보완하기 위하여 생산계획 실무자의 경험적 지식을 활용하는 전문가 시스템을 사용한 시스템 개발이 오래 전부터 추구되었으며 이 방법론은 일부 재고관리가 엄격하지 않은 공장에서 사용되고 있다. D 회사도 HDPE 공장에 대해서 시범적으로 이 기술을 적용하기로 하였다. 6개월 후에 시작품이 완성되었고, 실제 상황에서 시운전을 실시하고 난 뒤 논의 끝에 폐기하기로 결정되었다. 전문가 시스템이 현실적으로 적용되기 어려운 주된 원인은 크게 3가지로 요약되는데, 첫째 10년 이상 생산계획 업무에 종사한 실무자로부터 문제해결에 도움이 되며 전산화에 적합한 작업 규칙이 별로 없다는 사실이다. 작업 규칙은 수시로 바뀌며, 사람에 따라 다르다. IMF 이전에는 생산용량을 최대화 하려고 했으나 IMF 이후에는 최소화하게 되자 모든 작업 규칙이 바뀌게 되었다. 둘째 시작품으로 완성된 전문가 시스템의 프로그램 분량

이 A4 용지로 300페이지 분량에 이르렀다. 실무자는 이러한 대형 시스템을 관리할 여력이 없으며, 추가적인 전산인력의 지원이 필요한데 인건비 증가로 인해 현실적으로 불가능했다. 셋째 전문가 시스템은 실무자의 작업 규칙을 흉내내지만 대용량의 프로그램에도 불구하고 성능이 실무자를 능가하지 못하였다. 또다시 300페이지 분량의 프로그램을 추가하더라도 실무자를 능가하는 성능을 보장하기 어려웠다. 참고로 HDPE 공장의 전문가 시스템 개발에 사용된 수작업 생산계획 규칙을 소개한다.

수작업 생산계획은 반응기에서 생산되는 중간 제품 별로 현재 재고량을 조사하여 예상되는 수요에 의해 각 제품들의 재고가 바닥나는 시점을 계산함으로써 시작한다. 그림 11에서 보이는 것처럼 생산속도가 무한대인 또 다른 가상 반응기가 한 개 있다고 가정하고 여기에 모든 초기 생산계획을 배정한다. 즉 모든 제품의 재고가 바닥나는 시점에 경험적으로 알려진 적정 생산량을 생산하도록 배정한다. 반응기 생산속도가 무한대이므로 얼마든지 많은 생산일정을 삽입할 수 있다. 가상반응기에 배정된 초기 생산일정으로부터 긴급한 일정을 선별하여 우선적으로 같은 시점의 실제 반응기로 옮긴다. 벌크 제품에 해당하는 일정이 가장 우선순위가 높다. 실제 반응기에 배정할 때에는 각 제품이 해당반응기에서 생산 가능한 것인지 두개 이상의 반응기에 배정될 경우 골고루 배정되어 있는지 고려해야 한다. 다음으로 이미 실제 반응기에 배정된 제품과 같은 Type에 속하는 제품들을 가상 반응기의 일정에서 선별하여 이미 실제 반응기에 배정된 같은 Type의 제품 생산일정의 전후에 연결하여 붙인다. 이 경우 생산시점은 가상 반응기의 시점에 비해 지정된 값을 초과하지 않는 범위에서 앞당겨지거나 지연될 수 있다. 앞당겨질 경우 과다재고의 요인이 되고 지연되면 재고부족에 의한 판매유실 비용이 발생한다. 마지막으로 우선순

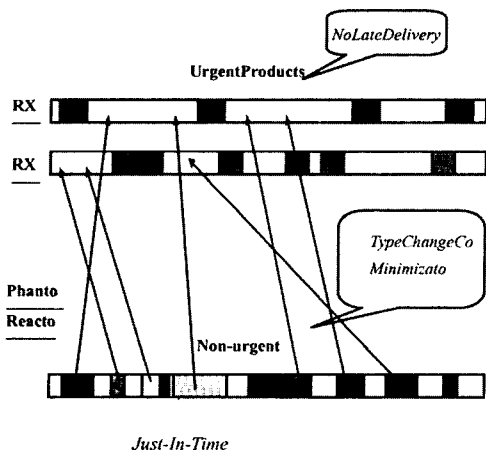


그림 11. 수작업 생산 일정계획 절차.

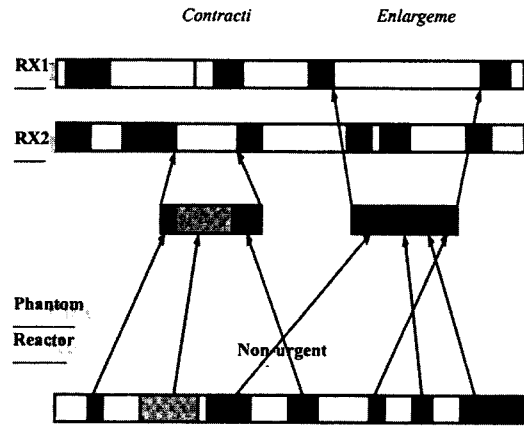


그림 12. 생산 물량 조정.

위가 떨어지는 제품들은 실제 반응기의 남은 빈공간에 Type Change 비용을 줄일 수 있는 위치를 선택하여 이동된다. 빈 공간의 크기가 생산량보다 크거나 작으면 그림 12에서 보인 것처럼 최소 최대 한계를 벗어나지 않는 범위에서 생산량을 빈공간의 크기에 맞추어 조정한다.

4. 최적화 모형

최적화 기술을 구성하는 요소를 간단히 설명하면 크게 세가지가 있는데 먼저 시스템의 성능을 판단할 수 있는 기준을 목적함수라고 한다. 일반적으로 총 비용을 최소화하는 것이나 총이익을 최대화하는 것이 이에 해당된다. 그리고 이러한 목적함수의 목표를 성취하기 위해 사용자가 조절할 수 있는 수단을 독립변수라고 한다. 예를 들어 생산물량, 생산시점 등이 이에 해당된다. 그런데 이러한 독립변수 들은 마음대로 변경될 수 없고 공정의 특성상 또는 주변 환경의 특성상 제약을 받게 된다. 예를 들어 생산물량은 최소량과 최대량의 제약을 받게 되고, 하나뿐인 반응기에서 두개 제품을 동시에 생산할 수는 없다. 또 수요량보다 과다하게 만들어도 안되고 수요량보다 부족하게 만들어도 안 된다. 이러한 제한조건 들을 제약식이라고 한다. 최적화 기술의 어려운 점은 이러한 목적함수, 독립변수, 제약식 들을 수식으로 표현해야 하며, 아직 기술상의 문제 때문에 수식들이 선형이어야 한다는데 있다. 실제 업무상의 여러 가지 제약사항 들 중에는 수식으로 표현하기가 곤란한 것들이 많이 있고, 또 비선형식으로 표현해야 하는 관계도 많다. 따라서 주어진 문제를 잘 분석하여 최적화 문제의 구성요소 들을 잘 판단하고, 이들간의 상관관계를 선형의 수식으로 표현해 내는 것이 수리계획법의 관건이다. 나머지 구체적인 해법에 관해서는 필요한 입력자료 들을 구비하고 수식들을 일정한 형식에 맞게 전산화할 경우 GAMS 와 같은

상용화된 최적화 전용 소프트웨어들이 잘 처리해 주고 있다.

생산계획의 목적함수는 총이익 최대화로서 다음과 같은 식으로 표현된다.

- * 총이익 = 각 제품의 판매단가 * 출하물량의 합
 - 각 제품별 반응기별 변동비의 합(구매비 포함)
 - 각 제품별 기간별 재고유지비 단가
- * 재고량의 합
 - 각 제품별 기간별 안전재고 미달비용 단가
- * 안전재고 미달량의 합
 - 각 제품별 기간별 판매기회 유실비용 단가
- * 미납품 주문량의 합
 - 각 제품별 T/C 비용 * 생산횟수의 합

독립변수로는 각 제품별 반응기별 기간별 생산시간, 생산물량, 재고량, 과다재고량, 안전재고량, 미납품 주문량, 출하량, 제품 생산순서를 정의하는 특수한 변수, Type 를 정의하는 특수한 변수들로 이루어져 있다. 그리고 모든 공장에 공통적으로 들어가는 제약식 들을 살펴 보면;

- * 기말 재고량 = 기초 재고량 + 생산량 - 출하량.
- * 기말 미납품 주문량 = 기초 미납품 주문량+ 수요량 - 출하량
- * 생산량 = 생산속도 * 생산시간
- * 각 Batch 총 생산시간의 합 = 총 반응기 가동시간
- * 총 출하량 = 총 수요량
- * 과다 재고량 = 재고량 - 적정재고량
- * 안전 재고량 미달량 = 재고량 - 안전 재고량
- * 기간별 총 포장 재고량의 합 <= 창고 크기
- * 각 제품별 한 Batch 물량 <= 최대 물량
- * 각 제품별 한 Batch 물량 <= 최소 물량
- * 시제품의 총 생산물량 = 고정 생산 물량
- * 가동중단 시간 = shut-down 입력

이들 외에 제품 생산 순서를 정의하는 복잡한 수식들이 반응기별로 다르게 사용되고 있다 위의 모형은 생산계획 업무절차상 필요에 따라 변형되어 조금씩 다른 형태의 모형을 구성한다. 예를 들면포장계획에 대해서는 위의 제약식중 각 제품별 일회 생산량 등은 사용될 필요가 없으므로 일부분만 사용되고 있다.

생산계획의 전체 업무절차는 단지 위의 최적화 모형만으로 해결되는 것은 아니다. 최적화 모형의 계산 결과는 매우 추상적인 수치로서 사용자가 현실적으로 이해하기 위해서는 정리 가공되어야 하며, 입력자료 들도 현장에서 발생하는 수치를 바로 사용할 수 있는 것이 아니라 최적화 모형이 수용할 수 있는 형태로 변형되어야 한다. 이러한 입출력 자료 가공절차는 그 자체가 최적화 모형 형태로 구성되는 경우가 많다. 예를 들어 Batch 기준으로 계산된 반응기 생산계획의 결과는 모두 일일 단위로 변경되어야 포장계획과 연계될 수 있다. 이러한 자료형태의 적

절한 변경도 의외로 어려운 계산절차로서 또 다른 최적화 모형을 이용하여 해결해야 한다.

Karimi-Mcdonald 모형의 가장 큰 장점은 수요예측 시간대와 생산일정의 시작과 끝 시점의 불일치를 고려한다는 점이다. 생산일정이 어느 수요예측 시간대와 겹치는 지를 정의하는 많은 정수 변수를 도입하여 보다 정밀한 생산계획을 계산할 수 있게 되었다. 생산일정계획은 원부자재의 수입을 고려하여 3개월 이상 계산되어야 한다. 그러나 실제 생산활동을 위한 일정은 1개월이다. 따라서 초기 1개월동안은 정밀한 계산이 요구되지만 2개월 이후에는 원부자재 수급에만 활용되므로 시간대별 제품별 생산 물량만 계산해도 충분하다. 시간대는 1일 단위로 계산하는 것이 바람직하나 과도한 계산량의 증가를 피하기 위해 가능한 늘린다. 표 3에는 실제 공장에 적용된 모형의 최적화 계산과 관련된 각종 통계치가 나와 있다. 정수변수가 1700 ~ 4000인 이러한 대형 최적화 문제를 풀기 위해서는 문제에 대한 깊은 이해와 혼합정수 계획법에 대한 특별한 해법이 필요하다. 불필요한 제약식은 최대한 줄이고 미리 정해진 생산순서에 대한 정보를 최대한 활용하여 정수변수의 증가를 막는다. 정수변수 해법인 분지한계법의 특수한 해법에 대한 내용은 Karimi and Mcdonald (1997) 에 잘 설명되어 있다.

표 3. 생산계획 최적화 모형의 통계자료.

	# 반응기	# 제품	# 실제 제품	# 수식	# 변수	# 이진 변수	CPU (sec)
HDPE	2	17	11	1557	5146	1763	3184
PP	3	35	12	3236	10442	1871	467
LLDPE	2	25	14	2462	9856	3994	940
LDPE	1	15	13	2536	11432	3015	1315

표 4는 합성수지 고분자 공장의 생산 일정계획 최적화 모형에 필요한 입력자료 목록이다. 입력자료와 출력자료는 독자적으로 사용되기 보다는 그림 13에 나타난 것처럼 회사의 경영정보 시스템에 결합되어 다른 시스템과 유기적으로 작용한다. 즉 영업부서에서 수요예측 시스템을 이용하여 산출된 수요예측자료를 입력 받고, 구매부, 생산부서와 재고관리 부서에서 원료, 중간제품과 최종제품의 현 재고량을 입력한 뒤 그 외 다른 입력 자료가 갱신되면 계산을 수행한 뒤 계산결과를 각 해당부서로 보낸다. 그림 14는 생산부서로 보내는 작업 지시서에 해당하는 보고서이다. 한달 동안 각 반응기 제품에 대해서 생산 시작시점과 끝나는 시점 생산량과 포장형태별 물량

이 나와 있다. 생산일정계획 최적화 시스템은 제조업의 핵심적인 자료를 생성하며 경영정보 시스템이 제공하는 전체 자료량의 30% 이상을 공급한다. 그림 15는 계산 결과를 일정 진도표에 표시한 것이다.

표 4. 입출력 자료 목록.

반응기 생산계획 입력자료	포장계획 입력자료	출력자료
제품판매가격 원료구매가격 재고유지비용 변동생산비용 고정생산비용 판매유실비용 안전재고비용 생산교체비용 재고상한선 재고하한선 최대생산량 최소생산량 생산속도 장치선택 유사제품군 총재고상한선 제조처방 수요예측 초기재고 고정생산 가동중지	수요예측 초기재고 과거 생산실적 과거 출하실적 재고상한선 재고하한선 포장종류 포장용량 작업시간 공휴일 시간지연	*장치별 제품생산순서와 생산량 *제품별, 기간대별 재고량, 생산량, 출하량 *순이익 = 판매이익 - 원료비 - 변동비 - 고정비 - 재고비용 - 판매유실비용 - 안전재고비용 - 생산교체비용 *제품별, 장치별, 기간대별 경제성분석 *일일별, Batch 별, 원부자재구매, 최종제품 생산, 출하예측 *일일별 제품재고량

5. 경제성 분석

합성수지 공장에 생산계획 최적화 시스템을 현업에 도입하는 경우는 세계적으로도 발표된 사례가 거의 없다. 외국에서 이미 수십 차례 현업에 검증된 기술만 도입하는 경향이 강한 한국의 사업경영 특성상 검증 안된 새로운 기술을 도입하는데 대한 우려가 많았다. 최초의 최적화 모형이 HDPE 공장에 대해서 개발되자 즉시 기존의 수작업과 최적화 결과를 비교하여 경제성을 검토하는 작업을 3개월간 실시하였다

표 5에 최적화 결과와 수작업에 대한 3개월간의 항목별 경제성 검토 결과가 요약되어 있다. 3개월 평균을 하였을 경우 최적화 시스템을 도입 함으로서 수작업에 비해 약 6.6%의 기대이익 증가가 예상되는데 이는 총 판매액의 1.8%에 해당한다. 실무자에 의해 자체적으로 분석된 이 보고서에 의해 프로젝트는 회사 내에서 많은 관심의 대상이 되었고 전폭적인 지지를 받았다. 즉 최적화 시스템은 어떠한 입력 자료를 공급하더라도 그에 따라 새로운 기준으로 수작업보다 우수한 결과를 산출한다는 점이 인정되었다. 자동 생산계획 시스템의 효과는 업무상으로도 생산계획을 작성하는데 과거 수작업으로 한 공장에 대해서 2일간 걸리던 계산 절차를 최대 2시간으로 줄였으며 업무를 일원화할 수 있게 되었다. 그리고

일일 단위의 포장계획은 과거에는 계산량이 많아서 수작업으로는 불가능했으며 자동 생산계획 시스템을 통하여 처음 시도되는 업무였다.

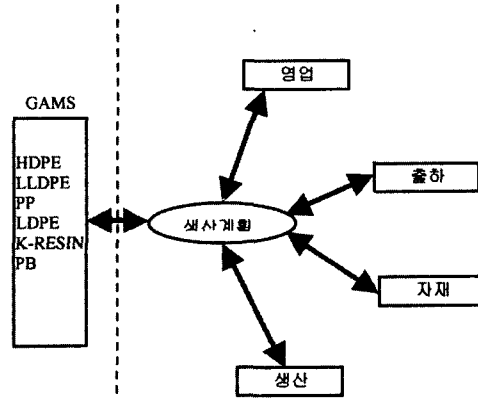


그림 13. 경영정보 시스템과 연결.

그림 14. 생산부서로 보내는 작업 지시서.

6. 결론

연속 화학공정의 생산 일정계획 문제를 6개의 부류로 분류하여 문제의 특성과 관련 문헌, 해법 등을 설명하였다. 대표적인 범용 고분자 공장인 합성수지 공장에 생산계획 최적화 시스템을 현업에 도입한 사례를 들어 생산계획 작업의 현황과 개선점, 개발과정 등을 심도 있게 설명하였다. 새로운 기술의 경제성을 입증하기 위해 기존의 수작업과 최적화 결과를 비교하여 경제성을 검토하는 작업을 3개월간 실시한 결과를 소개하였다

연속 화학공장의 생산 일정계획 문제를 풀기 위해서는 문제의 특성을 잘 파악하여 전체 문제를 작은 규모의 문제로 분해한 다음 효율적인 최적화 모형을 선정하여 핵심적인 결과를 산출하고 전체적인 절차를 구성하여 최종 보고서를 작성한다. 방대한 자료

를 정확하고 신속하게 수집하고 또 계산결과가 제시하는 내용이 실무자들이 즉각 인식되도록 표현되지 않으면 실질적인 도움을 주지 못한다. 최근의 최적화 기술과 컴퓨터의 급속한 발전은 이러한 해결 불가능한 것으로 알려져 왔던 생산 일정계획 최적화 문제에 대해서도 다양한 해결책을 선택할 여지를 제시하고 있다. 연속 화학공장의 생산계획, 물류 최적화 및 공급망 최적화 대해 좀더 깊은 정보를 원하는 독자는 저자들이 준비한 웹 사이트 <http://my.netian.com/~scheduling/>를 열람하기 바란다.

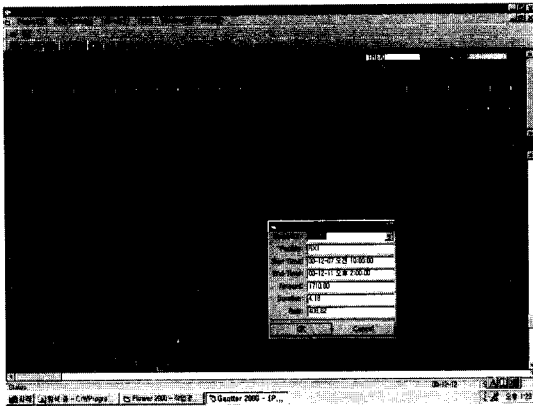


그림 15. 일정 진도표에 표시된 생산일정계획.

표 5. 생산계획 최적화 시스템과 수작업과의 경제성 비교 검토.

	GAMS	Manual	Diff(Gams-Manual)	(%)
Total Profit	8627043	6617932	9111	(1.3 %)
Sales Revenue	24833934	24833934	0	
Total Production	21700	21700	0	
Inventory Cost	57331	57729	-398	(-0.7%)
Type Change Cost	30795	38759	-7964	(-20.5 %)
Back Logging Cost	424	202	222	(109.9 %)
Variable Cost	18115623	18118810	-3287	(0.0 %)

	GAMS	Manual	Diff(GAMS-Manual)	(%)
Total Profit	10928907	10152849	776058	(7.6)
Sales Revenue	27076329	26288367	809962	(3.1)
Total Production	19200	19200	0	(0)
Inventory Cost	23638	23481	157	(0.8)
Type Change Cost	47201	43828	3373	(8.2)
Back Logging Cost	1483	3287	-1784	(-54.6)
Safety Level Penalty	53090	42760	10298	(24.1)
Variable Cost	16022020	16000999	21421	(0.1)

	GAMS	Manual	Diff(Gams-Manual)	(%)
Total Profit(W)	5572968	5051368	521622	(10.3 %)
Sales Revenue(W)	22246415	22246415	0	
Total Production(MT)	19873	20500	-627	(-3.1 %)
Inventory Cost(W)	52246	56237	-3991	(-7.1 %)
Type Change Cost(W)	44753	42572	2181	(5.1 %)
Back Logging Cost(W)	222	222	0	
Safety Level Penalty(W)	2736	2954	-228	(-7.7 %)
Variable Cost(W)	16572470	17093054	-519584	(-3.0 %)

참고문헌

- [1] dington, C. E. and T. E. Baker, "A History of Mathematical Programming in the Petroleum Industry", Interfaces, Vol. 20, No. 4, pp.117-127(July 1990).
- [2] Chajakis, E. D., "Sofisticated Crude Transportation", ORMS Today, Vol. 24, No. 6, pp30-34(Dec. 1997).
- [3] Faccenda, J. F. and T. E. Baker, "An Integrated AI/OR Approach to Blocked Operations Scheduling", NPRA Computer Conference, Paper No. CC-90-134, Seattle (Oct. 1990).
- [4] Hax, A. C., and D. Candea, *Production and Inventory Management*, Prentice-Hall, New Jersey, (1984).
- [5] Jain, V and I. E. Grossmann, "Cyclic Scheduling of Continuous Parallel-Process Units with Decaying Performance", AIChE J., Vol. 44, No. 7, pp1623-1636(July 1998).
- [6] Karimi, I. A. and C. M. McDonald, "Planning and Scheduling of Parallel Semicontinuous Processes. 2. Short-Term Scheduling", I&EC Res., Vol. 36, pp2701-2714(1997).
- [7] Lee, H., J. M. Pinto, I. E. Grossmann and S. park, "Mixed-Integer Linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management", I&EC Res., Vol. 35, pp1630-1641(1996).
- [8] Pinto, J. M., M. Joly and L. F. L. Moro, "Planning and Scheduling Models for Refinery Operations", Computers and Chemical Engineering, Vol. 24, pp2259-2276(2000).
- [9] Reklaitis, G. V., "Perspectives on Scheduling and Planning of Process Operations", 4th International Symposium on Process System Engineering, Montebello, Quebec, Canada, August 5-9 (1991)
- [10] Shah, N, "Mathematical Programming Techniques for Crude Oil Scheduling", Computers and Chemical Engineering, Vol. 20, Supplement, ppS1227-S1232 (1996)
- [11] Son, C and G. Yi "Optimal Production Planning and Scheduling of Polyolefin Plants", The 8th APCCChE Congress, paper 7-P1-1, Seoul, Korea(1999).
- [12] Tjoa, I. B., Y. Ota, H. Matsuo and Y. Natori, "Ethylene Plant Scheduling System Based on a MINLP Formulation", Computers and Chemical Engineering, Vol. 21, Supplement, ppS1073-1077(1997).

이 경 범

1961년 1월 3일생, 1983년에 서울대학교에서 화학공학과 학사, 1985년에 KAIST에서 화학공학과 석사학위를 받았으며 1992년 PURDUE 대학 화학공학과에서 박사학위를 하였다. 1985-1988년 쌍용정유에서 공정기사로, 1992-1996년 호남정유 기술연구소에서 연구원으로, 1996년부터 부경대학교 화학공학과 조교수로 있음. 관심 분야는 화학공장 생산계획 및 물류 최적화, 재고관리, 공정제어 및 최적화 등이다.

이 인 범

1977년 연세대학교 화학공학과 졸업(학사). 1979년 한국과학기술원 화학공학과 졸업(석사). 1987년 미국 Purdue 대학교 화학공학과 졸업(박사). 현재 포항공과대학교 화학공학과 교수. 관심 분야는 생산 일정 계획, 합성 및 개조, 공급 사슬망 경영과 자동 제어 등.

이 호 경

1990년 연세대학교 화학공학과 졸업(학사), 1992년 포항공과대학교 화학공학과 졸업(석사), 1995년 포항공과대학교 화학공학과(졸업) 박사, 현재 포항공과대학교 화학공학과 연구조교수. 관심분야는 회분식 화학 공정에서의 생산 일정 계획, 합성, 개조, 화학 공정에서의 공급 사슬망 경영 등.

TEL : 054) 279-5969/ FAX : 054) 279-3499

(Email : hkleee@postech.ac.kr)