

저장조 용량제약이 있는 회분식 공정-저장조 그물망 구조의 최적설계

Optimal Design of Batch-Storage Network with Finite Intermediate Storage

김형민, 김규년, 이경범
(Hyung-Min Kim, Kyoo-Nyun Kim, and Gyeongbeom Yi)

Abstract : The purpose of this study is to find the analytic solution of determining the optimal capacity (lot-size) of multiproduct acyclic multistage production and inventory system to meet the finished product demand under the constraint of finite intermediate storage. Intermediate storage is a practical way to mitigate the material flow imbalance through the line of supply and demand chain. However, the cost of constructing and operating storage facilities is becoming substantial because of increasing land value, environmental and safety concern. Therefore, reasonable decision-making about the capacity of processes and storage units is an important subject for industries. The industrial solution for this subject is to use the classical economic lot sizing method, EOQ/EPQ(Economic Order Quantity/Economic Production Quantity) model, incorporated with practical experience. But EOQ/EPQ model is not suitable for the chemical plant design with highly interlinked processes and storage units because it is developed based on single product and single stage. This study overcomes the limitation of the classical lot sizing method. The superstructure of the plant consists of the network of serially and/or parallelly interlinked non-continuous processes and storage units. The processes transform a set of feedstock materials into another set of products with constant conversion factors. A novel production and inventory analysis method, PSW(Periodic Square Wave) model, is applied to describe the detail material flows among equipments. The objective function of this study is minimizing the total cost composed of setup and inventory holding cost. The advantage of PSW model comes from the fact that the model provides a set of simple analytic solutions in spite of realistic description of the material flows between processes and storage units. The resulting simple analytic solution can greatly enhance the proper and quick investment decision for the preliminary plant design problem confronted with diverse economic situation.

Keywords : optimal, lot-sizing, network, batch, finite, storage

I. 서론

비연속 공정은 원료물질 조달의 변동성을 흡수하는 유연성을 가지고 있고, 제조처방이 다른 많은 수의 고가 제품들을 생산하는데 적합하며, 시장수요의 계절성에 쉽게 적응할 수 있는 점으로 인해 화학산업에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 의도적으로 비정상 상태에서 운전되는 이러한 부류의 공정들은 여러 가지 공정 교란에 직면한다. 중간 저장조가 없는 다단계 비연속 공정에서는 이웃하는 공정들의 운전이 완전히 동기화되거나 공정 자체가 저장조로 활용될 경우에만 지속적인 생산이 가능하다. 이 경우 중간 저장조의 설치에 이웃하는 공정들의 간섭을 제거함으로써 운전효율을 증대시키는데 기여한다. 게다가 적절한 크기와 초기 재고를 가진 중간 저장조가 설치된다면 회분식 공정의 높은 공정변이나 운전자의 운전미숙, 장치 고장과 수리에 따른 생산 차질을 효과적으로 흡수할 수 있다.

또한 비연속 공정이 순차적으로 다수의 제품을 생산할

경우 중간 저장조를 설치함으로써 중간 제품을 분리해 낼 수 있다. 중간 저장조의 이러한 여러 가지 역할은 공정 운전에서 긍정적인 역할을 하지만, 그 크기와 효율적인 위치를 결정하는 것은 어려운 작업이다. 공정모사 기술이 이러한 분석에 적용되는 흔한 방법이다. Monte Carlo 수치모사 기술이 중간 저장조의 가용성 분석에 사용될 수 있다[1]. 또 다른 방법은 해석적인 해를 이용하는 것이다. 참고문헌[2][3]은 회분식, 반연속 또는 연속 운전으로 구성된 직렬 생산 시스템에 대해 저장조 크기를 결정하는 해석적인 해를 개발하였다. 그들의 연구는 다입 다출 구조의 중간 저장조로 확대되었고[4][5], 매개변수 변화에 대한 민감도 분석도 추가되었다[2]. 그들의 성공적인 연구의 주된 요인은 Fourier 급수의 성질을 사용할 수 있도록 물류의 주기성 가정을 도입한 것이다. 참고문헌[6][7]은 같은 방법을 주기적인 생산 교장을 포함하는 주기적인 물질흐름에 도입하였다.

본 연구는 중간 저장조의 용량 제약하에서 최종제품의 수요를 만족하도록 다품종 비환류 다단계 생산 재고 시스템의 최적용량을 결정하는 해석적 해를 구하는 것이 목적이다. 공정은 원료 물질들을 다른 제품 물질들로 일정비율로 전환한다. 최종제품의 수요는 주기적이며 한 주기는 임의의 함수로 가정한다. 모든 공정 운전은 주기적이며 그 주기와 시작시간은 미지수로 가정한다. 20세기 초반에 EOQ/EPQ 모형이 발견된 이래 운영과학 분야에서는 이러한 주제에 대

접수일자 : 2001. 3. 23., 수정완료 : 2001. 6. 11.

김형민, 김규년 : 울산대학교(nightflier@orgio.net/knkim@uou.ulsan.ac.kr)

이경범 : 부경대학교(gbyi@pknu.ac.kr)

*본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(과제번호 1999-1-307-002-3) 연구비 지원에 의해 이루어졌으며 지원해주신 한국과학재단에 감사 드립니다.

해 많은 연구실적을 쌓아왔는데 참고문헌 [8]에 다단계 시스템에 관한 경제적 생산량 결정 모형의 연구결과가 잘 소개되어 있다. 본 연구와 참고문헌[8]와의 명백한 차이점은 세 가지로 요약될 수 있다. 1) 본 연구에서는 물질이 공정을 거칠 때 시간지연이 발생하고 따라서 각 저장조에서 물질의 유입 또는 유출이 시작되는 시점은 중요한 결정변수가 된다. 2) 본 연구에서의 공정은 대부분의 화학공장에서와 마찬가지로 원료물질 들로부터 제품물질 들로 물리화학적 변환을 일으킨다. 이러한 물리화학적 변환은 제조처방과 제품 수율이라는 두개의 행렬 매개변수에 의해 표현된다. 3) 저장조 용량 또는 현재 재고량은 상한값을 가진다. 이 제약은 실제 공장에서 저장조나 창고용량이 부족함을 나타낸다. 저장 시설 용량에 대한 제약을 취급함은 본 연구의 결과가 공장 설계 뿐만 아니라 공정운전이나 생산일정계획에도 응용될 수 있음을 나타낸다. 수요공급 체계에서 매우 일반적이고 사실적인 물류의 표현에도 불구하고 최종 유도된 설계식은 그 단순성을 유지하고 있다.

우리는 공정-저장조 망구조에서의 물질흐름을 효과적으로 표현하기 위하여 참고문헌[9]에서 발표된 사각파 모형을 이용할 것이다. 사각파 모형은 참고문헌 [10]에서 공정-저장조 직렬 시스템의 최적설계, 참고문헌 [11]에서 공정-저장조 병렬시스템의 최적설계 그리고 참고문헌 [12]에서 공정-저장조 그물망 구조의 최적설계에 응용되었다. 사각파 모형을 여러 형태의 공정-저장조 구조에 이용한 이러한 연구들의 최종 공장설계 식은 단일 제품, 단일 생산단계 시스템에 적용되었을 때 EOQ/EPQ 모형의 결과식으로 축소되는 성질을 가지고 있었으며, EOQ/EPQ 모형의 결과식을 무리하게 적용했을 경우보다 공정의 크기가 작은 값을 가졌다. 최적 공장설계는 단지 장치 크기만 선정함으로써 성립되는 것이 아니라 저장조의 초기재고와 생산 시작 시점을 동시에 고려해야 함을 밝힌 것도 사각파 모형의 큰 수확이다. 본 연구는 이러한 연구결과를 저장조의 크기가 상한값을 가지는 경우로 확대한 것이다.

II. 최적화 모형

화학공장은 여러 가지 원료를 도입하여 여러 단계의 복잡한 물리화학적 변화를 거쳐 다수의 최종 제품을 생산하여 소비자에게 공급하는 과정이라고 볼 때 그림 1에 나타난 것처럼 공정과 저장조가 그물망 구조로 연결된 일반적인 모형으로 나타낼 수 있다. 그림에서 저장조는 원으로 표시되어 있고 공정은 사각형으로 표시되었으며 화살표는 물질흐름을 표시한다. 각 저장조는 한가지 물질만 저장되는 전용 저장조이며, 한가지 물질을 여러 개의 저장조에 나누어 보관할 경우는 한 개의 저장조로 간주한다. 각 저장조의 일련번호는 열번호 $j(j=1, 2, \dots, |j(n)|)$ 와 행번호 $n(n=1, 2, \dots, N+1)$ 을 결합하여 상첨자 $j(n)$ 으로 나타낸다. 따라서 원부자재 저장조는 상첨자 $j(1)$ 이 되고 최종 제품 저장조는 $j(N+1)$ 이 된다. 예를 들어 저장조의 크기는 $V_s^{j(n)}$ 으로 표시한다. 마찬가지로 방법으로 공정은 하첨자 $i(n)(i=1, 2, \dots, |i(n)|)$ 으로 표시한다. 예를 들어 공정의 1회 생산량 크기는 $B_{i(n)}$ 으로 표시한다.

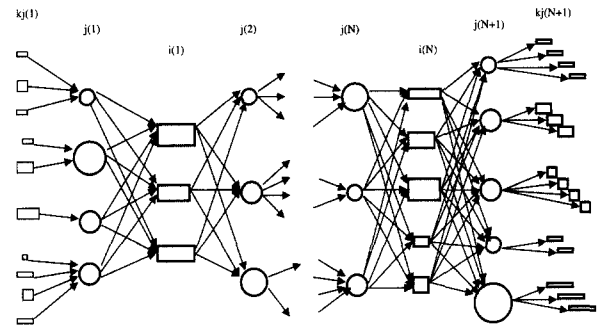


그림 1. 회분식 공정 - 저장조 그물망 구조.
Fig. 1. Superstructure of batch-storage network.

단 하첨자 $i(n)$ 으로 표시하는 공정은 공장 내에 존재하는 공정으로 국한한다. 공장의 외부와 연관된 공정인 원부자재의 구매와 최종 제품의 판매공정은 관련된 저장조에 따라 상첨자 $j(1)$ 또는 $j(N+1)$ 를 첨가하고 다시 거래처에 따라 하첨자 k 를 추가하는 방법으로 표시한다. 예를 들어 원부자재 $j(1)$ 에 대한 주문처 k 로부터의 1회 주문량은 $B_k^{j(n)}$ 으로 표시하고, 최종 제품 $j(N+1)$ 에 대한 고객 k 로의 1회 판매량은 $B_k^{j(N+1)}$ 으로 표시한다. 행번호 n 상에 있는 공정의 갯수는 $|i(n)|$ 으로 표시하고, 저장조의 갯수는 $|j(n)|$ 으로 표시한다. 원부자재 $j(1)$ 에 대한 구매처의 갯수는 $|kj(1)|$ 이고, 최종 제품 $j(N+1)$ 에 대한 고객의 수는 $|kj(N+1)|$ 이다. 공정 $i(n)$ 의 원료가 되는 중간 제품들은 $j(n)$ 이고, 그 제조처방은 $f_{i(n)}^{j(n)}$ 으로 표시되며, 공정 $i(n)$ 의 생성물들은 $j(n+1)$ 이고 그 수율은 $f_{j(n+1)}^{i(n)}$ 으로 표시된다. 명백히 $f_{i(n)}^{j(n)}$ 과 $f_{j(n+1)}^{i(n)}$ 를 $j(n)$ 과 $j(n+1)$ 에 대해 합하면 1이 된다. 제조처방과 수율 행렬값은 이미 알려진 상수이다. 공정으로부터 저장조로 (또는 저장조로부터 공정으로의) 물질흐름은 그림 2에서 보인 것처럼 그 유속 $F_{i(n)}(t)$ 가 주기적인 사각파형으로 나타난다. 이 사각파형을 결정하는 변수는 1회 생산량 크기 $B_{i(n)}$ 와 생산 주기 $\omega_{i(n)}$, 이송시간 분율 $x_{i(n)}^{j(n+1)}$ 과 초기 시간지연 $t_{i(n)}^{j(n+1)}$ 이다. 여기서 이송시간 분율은 한 주기내에서 입고 또는 출고에 걸리는 시간의 주기에 대한 분율 의미하며 이들은 알려진 값이고, 초기 시간지연은 공정과 저장조 또는 저장조와 공정 사이에서 물질흐름이 최초로 시작되는 시간이다. 원부자재 구매의 경우 주문 크기는 $B_k^{j(1)}$, 주문주기는 $\omega_k^{j(1)}$, 이송시간 분율은 $x_k^{j(1)}$, 초기 시간지연은 $t_k^{j(1)}$ 으로 나타내며, 마찬가지로 최종 제품 판매의 경우 각각 $B_k^{j(N+1)}$, $\omega_k^{j(N+1)}$, $x_k^{j(N+1)}$, $t_k^{j(N+1)}$ 으로 나타낸다. 최종 제품에 대한 임의의 수요예측 함수는 각각 다른 변수 값을 가진 사각파형의 합으로 표현될 수 있으므로 $B_k^{j(N+1)}$, $\omega_k^{j(N+1)}$, $x_k^{j(N+1)}$, $t_k^{j(N+1)}$ 들은 이미 알려진 입력변수 들이다. 공정에 원료를 투입하는 시간과 제품의 입고 즉 공정에서 제품이 나오는 시간은 독립적이지 않다. 회분식 공정에서 한 생산 주기는 원료의 주입, 처리와 제품 이송시간으로 구성되어 있다. 실제로 원료 주입이나 제품 이송에는 순서가 있고, 펌프와 파이프 망의 설계에 따라 이송 시간도 각기 다르다. 그러나 초

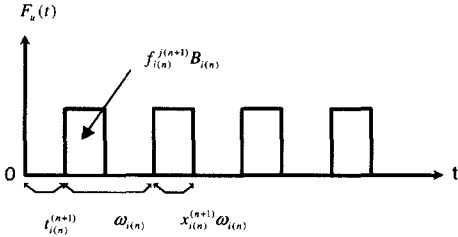
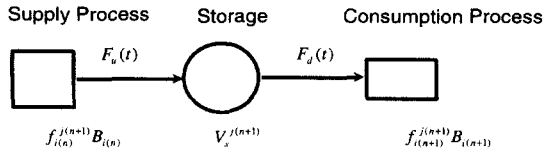


그림 2. 사각파 모형.
Fig. 2. Flow of periodic square wave model.

기 설계단계에서는 이러한 정보를 얻을 수 없고, 또 공장 설계에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 우리는 무리 없이 원료 투입과 제품 이송은 동시에 일어나며, 그 이송시간 분율도 같다고 가정한다. 이러한 가정은 완화될 수 있지만 문제를 복잡하게 만들 뿐이다.

$$t_{i(n)}^{j(n)} = t_{i(n)}^{(n)}, \quad t_{i(n)}^{j(n+1)} = t_{i(n)}^{(n+1)},$$

$$x_{i(n)}^{j(n)} = x_{i(n)}^{(n)}, \quad x_{i(n)}^{j(n+1)} = x_{i(n)}^{(n+1)} \quad (1)$$

따라서 (1)의 조건하에 한 생산 주기가 원료의 투입, 처리와 제품 이송시간으로 구성되어 있다는 사실은 다음식으로 표현된다.

$$t_{i(n)}^{(n+1)} = t_{i(n)}^{(n)} + \omega_{i(n)}(1 - x_{i(n)}^{(n+1)}) \quad (2)$$

$B_{i(n)}$ 를 $\omega_{i(n)}$ 로 나눈 값, 즉 공정 $i(n)$ 의 평균 물질흐름 속도를 $D_{i(n)}$ 로 나타낸다. 원부자재 저장조, 중간 제품 및 최종 제품 저장조에 대한 평균 물질흐름 속도를 각각 $D_k^{(1)}$, $D_k^{j(n+1)}$, $D_k^{(N+1)}$ 으로 표시할 때 저장조에 대한 물질수지 식으로부터 다음 관계식이 성립한다.

$$D^{j(N+1)} = \sum_{i=1}^{|i(N)|} f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} = \sum_{k=1}^{|kj(N+1)|} \frac{B_k^{j(N+1)}}{\omega_k^{j(N+1)}} \quad (3)$$

$$D^{j(n+1)} = \sum_{i=1}^{|i(n)|} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} = \sum_{i=1}^{|i(n+1)|} f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)}$$

(n = 1, 2, ..., N-1) (4)

$$D^{j(1)} = \sum_{k=1}^{|kj(1)|} D_k^{j(1)} = \sum_{i=1}^{|i(1)|} f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} \quad (5)$$

저장조 $j(n+1)$ 의 크기는 $V_s^{j(n+1)}$, 초기 재고량은 $V^{j(n+1)}(0)$, 현재 재고량은 $V^{j(n+1)}(t)$ 라고 표시한다. 저장조의 현재 재고물량은 저장조의 상부 공정으로부터 유입된 물량과 하부

공정으로 유출된 물량의 차에 의해 계산되어진다. 각 저장조에 대해 물질 수지식을 세우고 적분하는 과정은 참고문헌 [7]에 잘 나타나 있다. 그 결과 얻어지는 원부자재와 중간 제품, 완제품에 대한 재고함수는 다음과 같다.

$$V^{j(1)}(t) = V^{j(1)}(0) + \sum_{k=1}^{|kj(1)|} B_k^{j(1)} \left[\text{int} \left\langle \frac{t - t_k^{j(1)}}{\omega_k^{j(1)}} \right\rangle + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_k^{j(1)}} \text{res} \left\langle \frac{t - t_k^{j(1)}}{\omega_k^{j(1)}} \right\rangle \right\} \right]$$

$$- \sum_{i=1}^{|i(1)|} (f_{i(1)}^{j(1)} B_{i(1)}) \left[\text{int} \left\langle \frac{t - t_{i(1)}^{j(1)}}{\omega_{i(1)}} \right\rangle + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_{i(1)}^{j(1)}} \text{res} \left\langle \frac{t - t_{i(1)}^{j(1)}}{\omega_{i(1)}} \right\rangle \right\} \right] \quad (6)$$

$$V^{j(n+1)}(t) = V^{j(n+1)}(0) + \sum_{i=1}^{|i(n)|} (f_{i(n)}^{j(n+1)} B_{i(n)}) \left[\text{int} \left\langle \frac{t - t_{i(n)}^{j(n+1)}}{\omega_{i(n)}} \right\rangle + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_{i(n)}^{j(n+1)}} \text{res} \left\langle \frac{t - t_{i(n)}^{j(n+1)}}{\omega_{i(n)}} \right\rangle \right\} \right]$$

$$- \sum_{i=1}^{|i(n+1)|} (f_{i(n+1)}^{j(n+1)} B_{i(n+1)}) \left[\text{int} \left\langle \frac{t - t_{i(n+1)}^{j(n+1)}}{\omega_{i(n+1)}} \right\rangle + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_{i(n+1)}^{j(n+1)}} \text{res} \left\langle \frac{t - t_{i(n+1)}^{j(n+1)}}{\omega_{i(n+1)}} \right\rangle \right\} \right] \quad (7)$$

$$V^{j(N+1)}(t) = V^{j(N+1)}(0) + \sum_{i=1}^{|i(N)|} (f_{i(N)}^{j(N+1)} B_{i(N)}) \left[\text{int} \left\langle \frac{t - t_{i(N)}^{j(N+1)}}{\omega_{i(N)}} \right\rangle + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_{i(N)}^{j(N+1)}} \text{res} \left\langle \frac{t - t_{i(N)}^{j(N+1)}}{\omega_{i(N)}} \right\rangle \right\} \right]$$

$$- \sum_{k=1}^{|kj(N+1)|} B_k^{j(N+1)} \left[\text{int} \left\langle \frac{t - t_k^{j(N+1)}}{\omega_k^{j(N+1)}} \right\rangle + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_k^{j(N+1)}} \text{res} \left\langle \frac{t - t_k^{j(N+1)}}{\omega_k^{j(N+1)}} \right\rangle \right\} \right] \quad (8)$$

(6)~(8)에 대하여 재고 상한선과 하한선 그리고 평균 재고량은 누적함수의 성질을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다[7].

$$V_{ab}^{j(1)} = V^{j(1)}(0) + \sum_{k=1}^{|kj(1)|} (1 - x_k^{j(1)}) D_k^{j(1)} \omega_k^{j(1)} - \sum_{k=1}^{|kj(1)|} D_k^{j(1)} t_k^{j(1)} + \sum_{i=1}^{|i(1)|} f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} t_{i(1)}^{j(1)} \quad (9)$$

$$V_{bb}^{j(1)} = V^{j(1)}(0) - \sum_{i=1}^{|i(1)|} (1 - x_{i(1)}^{j(1)}) f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} \omega_{i(1)} - \sum_{k=1}^{|kj(1)|} D_k^{j(1)} t_k^{j(1)} + \sum_{i=1}^{|i(1)|} f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} t_{i(1)}^{j(1)} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \overline{V}^{j(1)} &= V^{j(1)}(0) + \sum_{k=1}^{|kj(1)|} \frac{(1-x_k^{j(1)})}{2} D_k^{j(1)} \omega_k^{j(1)} \\ &\quad - \sum_{k=1}^{|kj(1)|} D_k^{j(1)} t_k^{j(1)} + \sum_{i=1}^{|i(1)|} f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} t_{i(1)}^{j(1)} \\ &\quad - \sum_{i=1}^{|i(1)|} \frac{(1-x_{i(1)}^{j(1)})}{2} f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} \omega_{i(1)} \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} V_{ub}^{j(n+1)} &= V^{j(n+1)}(0) + \sum_{i=1}^{|i(n+1)|} f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} t_{i(n+1)}^{j(n+1)} \\ &\quad + \sum_{i=1}^{|i(n)|} (1-x_{i(n)}^{j(n+1)}) f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} \omega_{i(n)} \\ &\quad - \sum_{i=1}^{|i(n)|} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} t_{i(n)}^{j(n+1)} \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} V_{lb}^{j(n+1)} &= V^{j(n+1)}(0) - \sum_{i=1}^{|i(n)|} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} t_{i(n)}^{j(n+1)} \\ &\quad - \sum_{i=1}^{|i(n+1)|} (1-x_{i(n+1)}^{j(n+1)}) f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} \omega_{i(n+1)} \\ &\quad + \sum_{i=1}^{|i(n+1)|} f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} t_{i(n+1)}^{j(n+1)} \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \overline{V}^{j(n+1)} &= V^{j(n+1)}(0) - \sum_{i=1}^{|i(n)|} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} t_{i(n)}^{j(n+1)} \\ &\quad + \sum_{i=1}^{|i(n)|} \frac{(1-x_{i(n)}^{j(n+1)})}{2} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} \omega_{i(n)} \\ &\quad - \sum_{i=1}^{|i(n+1)|} \frac{(1-x_{i(n+1)}^{j(n+1)})}{2} f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} \omega_{i(n+1)} \\ &\quad + \sum_{i=1}^{|i(n+1)|} f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} t_{i(n+1)}^{j(n+1)} \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} V_{ub}^{j(N+1)} &= V^{j(N+1)}(0) + \sum_{k=1}^{|kj(N+1)|} D_k^{j(N+1)} t_k^{j(N+1)} \\ &\quad + \sum_{i=1}^{|i(N)|} (1-x_{i(N)}^{j(N+1)}) f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} \omega_{i(N)} \\ &\quad - \sum_{i=1}^{|i(N)|} f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} t_{i(N)}^{j(N+1)} \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} V_{lb}^{j(N+1)} &= V^{j(N+1)}(0) - \sum_{i=1}^{|i(N)|} f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} t_{i(N)}^{j(N+1)} \\ &\quad - \sum_{k=1}^{|kj(N+1)|} (1-x_k^{j(N+1)}) D_k^{j(N+1)} \omega_k^{j(N+1)} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{|kj(N+1)|} D_k^{j(N+1)} t_k^{j(N+1)} \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} \overline{V}^{j(N+1)} &= V^{j(N+1)}(0) - \sum_{i=1}^{|i(N)|} f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} t_{i(N)}^{j(N+1)} \\ &\quad + \sum_{i=1}^{|i(N)|} \frac{(1-x_{i(N)}^{j(N+1)})}{2} f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} \omega_{i(N)} \\ &\quad - \sum_{k=1}^{|kj(N+1)|} \frac{(1-x_k^{j(N+1)})}{2} D_k^{j(N+1)} \omega_k^{j(N+1)} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{|kj(N+1)|} D_k^{j(N+1)} t_k^{j(N+1)} \end{aligned} \tag{17}$$

원부자재 j(1)를 구매하는 발주 비용을 $A_k^{j(1)}$ \$/회라 하고 공정 i(n)의 준비비를 $A_{i(n)}$ \$/회라 둔다. 저장조 j(n)의 연간 재고유지비를 $H^{j(n)}$ \$/년/liter라 한다. 이 경우 총비용은 준비비와 재고유지비의 합으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} TC &= \sum_{j=1}^{|j(1)|} \sum_{k=1}^{|kj(1)|} \left[\frac{A_k^{j(1)}}{\omega_k^{j(1)}} \right] + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{|i(n)|} \left[\frac{A_{i(n)}}{\omega_{i(n)}} \right] \\ &\quad + \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{j=1}^{|j(n)|} \left[H^{j(n)} \overline{V}^{j(n)} \right] \end{aligned} \tag{18}$$

저장조 크기는 재고 상한선과 일치한다고 보아도 무리가 없다. 따라서 (9), (12)과 (15)은 저장조 크기를 표현하는 수식들이다. 최적화 문제의 탐색변수들은 구매 및 생산주기 $\omega_k^{j(1)}$, $\omega_{i(n)}$ 와 초기 시간지연 $t_k^{j(1)}$, $t_{i(n)}$, 그리고 평균유속 $D_k^{j(1)}$, $D_{i(n)}$ 으로 압축된다. 초기 시간지연 $t_{i(n)}^{j(n+1)}$ 은 (2)에 의해 $t_{i(n)}^{j(n)}$ 로 변환된다.

재고함수 $V^{j(n)}(t)$ 는 저장조의 용량에 의해 제약은 받는 데 저장조 용량의 상한선을 $V_{max}^{j(n)}$ 라고 할 때 그 충분조건은 $0 \leq V_{lb}^{j(n)} \leq V_{ub}^{j(n)} \leq V_{max}^{j(n)}$ 이다.

우리는 연구의 편의를 위해 수유행렬 $f_{i(n)}^{j(n+1)}$ 가 정사각행렬이며 역행렬이 존재한다고 가정한다.

$$\det(f_{i(n)}^{j(n+1)}) \neq 0 \quad (n=1, \dots, N) \tag{19}$$

이는 각 생산단계에서 공정들의 갯수와 그 생산제품들의 갯수가 같으며, 각 제품들은 각기 다른 제조처방을 가지고 있음을 의미한다. 이러한 가정은 공장설계시 초기 개념설계 단계에서 흔히 발생한다. 이 경우에는 $D_k^{j(1)}$, $D_{i(n)}$ 이 (3)~(5)에 의해 이미 결정되어 버리므로 탐색변수에서 배제된다. 위의 가정은 엄격한 수학적 논의를 통해 완화될 수 있으며 그 결과는 본 연구 결과와 큰 차이가 없다. 따라서 남은 탐색변수는 $\omega_k^{j(1)}$, $\omega_{i(n)}$, $t_k^{j(1)}$, $t_{i(n)}$ 이다. 제약식에 대한 Lagrange 승수를 $\lambda_{lb}^{j(1)}$, $\lambda_{lb}^{j(n+1)}$, $\lambda_{lb}^{j(N+1)}$, $\lambda_{ub}^{j(1)}$, $\lambda_{ub}^{j(n+1)}$, $\lambda_{ub}^{j(N+1)}$ 라 두자. 모든 승수는 또는 양수이다. Lagrange 함수는;

$$\begin{aligned} L = TC &= \sum_{j=1}^{|j(1)|} \lambda_{lb}^{j(1)} \left[V^{j(1)}(0) - \sum_{k=1}^{|kj(1)|} D_k^{j(1)} t_k^{j(1)} \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{|i(1)|} (1-x_{i(1)}^{j(1)}) f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} \omega_{i(1)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{|i(1)|} f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} t_{i(1)}^{j(1)} \right] \\ &\quad - \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{|j(n+1)|} \lambda_{lb}^{j(n+1)} \left[V^{j(n+1)}(0) - \sum_{i=1}^{|i(n)|} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} t_{i(n)}^{j(n+1)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{|i(n+1)|} (1-x_{i(n+1)}^{j(n+1)}) f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} \omega_{i(n+1)} \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{|i(n)|} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} t_{i(n)}^{j(n+1)} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{i=1}^{|i^{(n+1)}|} (1-x_{i(n+1)}^{(n+1)}) f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} \omega_{i(n+1)} \\
 & - \sum_{j=1}^{|j^{(N+1)}|} \lambda_{ub}^{j(N+1)} \left[V^{j(N+1)}(0) - \sum_{i=1}^{|i^{(N)}|} f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} t_{i(N)}^{j(N)} \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{k=1}^{|kj^{(N+1)}|} D_k^{j(N+1)} t_k^{j(N+1)} \right. \\
 & \quad \left. - \sum_{i=1}^{|i^{(N)}|} (1-x_{i(N)}^{(N+1)}) f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} \omega_{i(N)} \right. \\
 & \quad \left. - \sum_{k=1}^{|kj^{(N+1)}|} (1-x_k^{(N+1)}) D_k^{j(N+1)} \omega_k^{j(N+1)} \right] \\
 & - \sum_{j=1}^{|j^{(1)}|} \lambda_{ub}^{j(1)} \left[V_{mx}^{j(1)} - V^{j(1)}(0) \right. \\
 & \quad \left. - \sum_{k=1}^{|kj^{(1)}|} (1-x_k^{j(1)}) D_k^{j(1)} \omega_k^{j(1)} \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{k=1}^{|kj^{(1)}|} D_k^{j(1)} t_k^{j(1)} - \sum_{i=1}^{|i^{(1)}|} f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} t_{i(1)}^{j(1)} \right] \\
 & - \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{|j^{(n+1)}|} \lambda_{ub}^{j(n+1)} \left[V_{mx}^{j(n+1)} - V^{j(n+1)}(0) \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{i=1}^{|i^{(n)}|} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} t_{i(n)}^{j(n)} \right. \\
 & \quad \left. - \sum_{i=1}^{|i^{(n+1)}|} f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} t_{i(n+1)}^{j(n+1)} \right] \\
 & - \sum_{j=1}^{|j^{(N+1)}|} \lambda_{ub}^{j(N+1)} \left[V_{mx}^{j(N+1)} - V^{j(N+1)}(0) \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{i=1}^{|i^{(N)}|} f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} t_{i(N)}^{j(N)} \right. \\
 & \quad \left. - \sum_{k=1}^{|kj^{(N+1)}|} D_k^{j(N+1)} t_k^{j(N+1)} \right]
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{k=1}^{|kj^{(N+1)}|} D_k^{j(N+1)} t_k^{j(N+1)} \\
 & - \sum_{k=1}^{|kj^{(N+1)}|} (1-x_k^{(N+1)}) D_k^{j(N+1)} \omega_k^{j(N+1)} \\
 & - \sum_{i=1}^{|i^{(N)}|} f_{i(N)}^{j(N+1)} (1-x_{i(N)}^{(N+1)}) D_{i(N)} \omega_{i(N)}
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^{|i^{(n)}|} f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} t_{i(n)}^{j(n)} = V^{j(n+1)}(0) \\
 & - \sum_{i=1}^{|i^{(n+1)}|} (1-x_{i(n+1)}^{(n+1)}) f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} \omega_{i(n+1)} \\
 & + \sum_{i=1}^{|i^{(n+1)}|} f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} t_{i(n+1)}^{j(n+1)} \\
 & - \sum_{i=1}^{|i^{(n)}|} (1-x_{i(n)}^{(n+1)}) f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} \omega_{i(n)}
 \end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^{|kj^{(1)}|} D_k^{j(1)} t_k^{j(1)} = V^{j(1)}(0) + \sum_{i=1}^{|i^{(1)}|} f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} t_{i(1)}^{j(1)} \\
 & - \sum_{i=1}^{|i^{(1)}|} (1-x_{i(1)}^{(1)}) f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} \omega_{i(1)}
 \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
 V_{mx}^{j(1)} & \geq \sum_{k=1}^{|kj^{(1)}|} (1-x_k^{j(1)}) D_k^{j(1)} \omega_k^{j(1)} \\
 & + \sum_{i=1}^{|i^{(1)}|} (1-x_{i(1)}^{(1)}) f_{i(1)}^{j(1)} D_{i(1)} \omega_{i(1)}
 \end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
 V_{mx}^{j(n+1)} & \geq \sum_{i=1}^{|i^{(n)}|} (1-x_{i(n)}^{(n+1)}) f_{i(n)}^{j(n+1)} D_{i(n)} \omega_{i(n)} \\
 & + \sum_{i=1}^{|i^{(n+1)}|} (1-x_{i(n+1)}^{(n+1)}) f_{i(n+1)}^{j(n+1)} D_{i(n+1)} \omega_{i(n+1)}
 \end{aligned} \tag{28}$$

Kuhn-Tucker 조건들을 풀면 다음과 같다.

$$V_{mx}^{j(N+1)} \geq \sum_{i=1}^{|i^{(N)}|} (1-x_{i(N)}^{(N+1)}) f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} \omega_{i(N)} \tag{29}$$

$$\omega_k^{j(1)} = \sqrt{\frac{A_k^{j(1)}}{D_k^{j(1)} \left[\left(\frac{H^{j(1)}}{2} + \lambda_{ub}^{j(1)} \right) (1-x_k^{j(1)}) \right]}} \tag{31}$$

$$\omega_{i(n)} = \sqrt{\frac{A_{i(n)}}{D_{i(n)} \Psi_{i(n)}(\lambda_{ub}^{j(n)}, \lambda_{ub}^{j(n+1)})}} \tag{32}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 \Psi_{i(n)}(\lambda_{ub}^{j(n)}, \lambda_{ub}^{j(n+1)}) & = \\
 & (1-x_{i(n)}^{(n)}) \sum_{j=1}^{|j^{(n)}|} \left(\frac{H^{j(n)}}{2} + \lambda_{ub}^{j(n)} \right) f_{i(n)}^{j(n)} \\
 & + (1-x_{i(n)}^{(n+1)}) \sum_{j=1}^{|j^{(n+1)}|} \left(\frac{H^{j(n+1)}}{2} + \lambda_{ub}^{j(n+1)} \right) f_{i(n)}^{j(n+1)}
 \end{aligned} \tag{33}$$

$$\sum_{i=1}^{|i^{(N)}|} f_{i(N)}^{j(N+1)} D_{i(N)} t_{i(N)}^{j(N)} = V^{j(N+1)}(0) \tag{34}$$

Kuhn-Tucker 조건의 결과인 (40), (43), (45), (46), (47)를 이용하여 목적함수 (20)을 다음과 같이 변환한다.

$$\begin{aligned}
 TC(B_{k^*}^{j(1)}, B_{i(n)}) & = \sum_{j=1}^{|j^{(1)}|} \left[\frac{A_{k^*}^{j(1)} D_{k^*}^{j(1)}}{B_{k^*}^{j(1)}} + \Psi_{k^*}^{j(1)} B_{k^*}^{j(1)} \right] \\
 & + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{|i^{(n)}|} \left[\frac{A_{i(n)} D_{i(n)}}{B_{i(n)}} + \Psi_{i(n)} B_{i(n)} \right] \\
 & + \sum_{j=1}^{|j^{(N+1)}|} \left(\frac{H^{j(N+1)}}{2} \right) \sum_{k=1}^{|kj^{(N+1)}|} D_k^{j(N+1)} \omega_k^{j(N+1)} (1-x_k^{j(N+1)})
 \end{aligned} \tag{30}$$

여기서 k^* 는 $|kj(1)|$ 개의 원료 공급자 가운데에서 선택된 최적의 공급자를 표시하는데 공급자가 다수일 경우 하나를 선정하는 것이 최적이다. 이것은 목적함수가 $D_k^{j(1)}$ 에 대해서 강오목함수이기 때문에 나타나는 결론이다. 만약 Lagrange 승수 $\lambda_{ub}^{j(1)}, \lambda_{ub}^{j(n+1)}, \lambda_{ub}^{j(N+1)}$ 가 0이면 (21)~(26)로부터 해석적인 해가 즉시 가능하다[10]. 이 해들은 엄격한 부

등식 (27)-(29)를 만족하며, 따라서 저장조 크기의 상한값에 제약을 받지 않는다. 이 해들을 $B_{i(n)}^{UIS}$ 로 표현할 수 있는데, 여기서 $B_{i(n)}^{UIS} = \{B_{i(n)} | \lambda_{ub}^{i(1)}, \lambda_{ub}^{i(n+1)} = 0\}$ 이고, UIS는 'Unlimited Intermediate Storage'를 의미한다. Lagrange 승수 $\lambda_{ub}^{i(n)}$, $\lambda_{ub}^{i(n+1)}$ 는 음수가 아니므로 다음과 같은 부등식이 성립한다.

$$B_{k^*}^{j(1)} \leq B_{UIS}^{j(1)}, B_{i(n)} \leq B_{i(n)}^{UIS} \quad (n=1,2, \dots, N) \quad (31)$$

목적함수 (30)은 독립변수 $B_{j^*}^{j(1)}, B_{i(n)}$ 에 대해 강볼록함수이고, 제약식이 없을 경우 최소점은 $B_{UIS}^{j(1)}, B_{i(n)}^{UIS}$ 이다. 따라서 목적함수 값은 (31)의 구간에서 단조감소함수이고, 최소점은 제약식들의 경계에 존재한다. 제약식 (27)-(29)을 벡터형식으로 바꾸기 위하여 몇개의 벡터와 행렬을 정의하면;

$$B^{(1)} = \{B_{k^*}^{j(1)}\}^T, B_{(n)} = \{B_{i(n)}\}^T, V_{mx}^{(n)} = \{V_{mx}^{j(n)}\}^T, V_{mx}^{(N+1)} = \left\{ V_{mx}^{j(N+1)} - \sum_{k=1}^{|j(N+1)|} (1-x_k^{(N+1)}) D_k^{j(N+1)} \omega_k^{j(N+1)} \right\}^T \quad (32)$$

$$F_{i(0),j(1)} = \text{diag}(1-x^{j(1)}) \quad (33)$$

$$F_{i(n),j(n)} = [(1-x_{i(n)}^{(n)}) f_{i(n)}^{j(n)}] \quad (34)$$

$$F_{i(n),j(n+1)} = [(1-x_{i(n)}^{(n+1)}) f_{i(n)}^{j(n+1)}] \quad (35)$$

여기서 $|j(n+1)| = |i(n)|$ 로서 $F_{i(n),j(n+1)}$ 는 역행렬이 존재하나 $F_{i(n),j(n)}$ 는 그렇지 않다. (27)-(29)은 다음과 같이 바뀐다.

$$\begin{aligned} V_{mx}^{(1)} &\geq F_{(0)(1)} B^{(1)} + F_{(1)(1)} B_{(1)} \\ V_{mx}^{(n+1)} &\geq F_{(n)(n+1)} B_{(n)} + F_{(n+1)(n+1)} \\ V_{mx}^{(N+1)} &\geq F_{(N)(N+1)} B_{(N)} \end{aligned} \quad (36)$$

(36)을 더욱 단순화하기 위하여 몇개의 대형 벡터와 행렬을 더 정의하자.

$$\begin{aligned} V_{mx} &= \{V_{mx}^{(n)}\}^T, \\ B &= \{B^{(1)}, B_{(1)}, \dots, B_{(N)}\}^T, \\ B^{UIS} &= \{B_{UIS}^{(1)}, B_{UIS}^{(1)}, \dots, B_{UIS}^{(N)}\}^T \end{aligned} \quad (37)$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{(0)(1)} & F_{(1)(1)} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & F_{(1)(2)} & F_{(2)(2)} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & F_{(N-1)(N)} & F_{(N)(N)} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & F_{(N)(N+1)} \end{bmatrix} \quad (38)$$

(36)은 다음과 같이 한개의 벡터식으로 변환된다.

$$V_{mx} \geq FB \quad (39)$$

행렬 F 는 정방행렬로서 역행렬이 존재하며, (38)의 구조를 살펴보면 역행렬을 쉽게 구할 수 있다는 것을 알 수 있다. 만약 최대 저장조 크기에 대한 제약이 없다면 최적 저장조의 크기는 FB^{UIS} 가 될 것이다. 즉 저장조 크기는 $\min\{V_{mx}, FB^{UIS}\}$ 보다는 클 수 없다는 것을 나타낸다. 최적점이 제약식의 경계에 존재하므로 저장조 최대크기 제약하의 최적 1회 생산량 B^{FIS} 는 다음과 같이 계산된다.

$$B^{FIS} = F^{-1} \min\{V_{mx}, FB^{UIS}\} \quad (40)$$

III. 공장설계 예제

그림 3에서 보인 것처럼 4개의 원료로부터 3개의 최종제품을 만드는 공장을 고려해 보자.

공장은 3생산단계로 되어 있다. 첫째 생산단계는 4개의 원료 저장조와 2개의 후속공정으로 구성되어 있다. 둘째 생산단계는 두개의 중간 저장조와 3개의 후속공정으로 되어 있다. 3째 생산단계는 3개의 최종제품 저장조와 연속적인 고객의 수요로 구성된다. 장치 일련번호는 위에서 아래로 붙여진다. 수송시간 비율은 모두 0이며, 모든 자본 비용은 편의상 고려하지 않는다. 원료물질 1(1)은 2개의 공급자를 가지고 있으며 그 주문 준비비는 각각 \$20, \$25이다. 원료물질 2(1)은 한 개의 공급자를 가지며 그 주문 준비비는 \$30이다. 원료물질들의 재고유지비는 각각 0.1, 0.5, 1, 5\$/year/liter이다. 모든 처리공정은 각기 다른 조성의 원료물질들을 회분식으로 배합하는 것이다. 각 공정의 배합비율은 그림 3에 나타나 있다. 각 공정은 단지 한 개의 제품만을 생산한다. 첫째 생산단계 공정들의 준비비는 각각 100, 500\$/Batch이다. 최종제품 1(3), 2(3), 3(3)의 재고 유지비는 각각 0.65, 0.7, 0.75 \$/liter/year이며, 수요량은 384000, 168000, 2400liter/year이다. 우리는 저장조의 최대크기가 제약을 받는 두가지 경우를 고려할 것이다. 첫째 경우 'FIS(Case 1)'은 저장조 1(3)이 제약이 없을 때의 최적크기보다 작은 경우이고, 둘째 경우 'FIS(Case 2)'는 저장조 1(3)과 함께 저장조 1(2)가 제약이 없을 때의 최적크기보다 작은 경우이다.

먼저 모든 저장조와 공정을 통과하는 물질의 평균유속을 계산하여야 한다. 그리고 (21), (22)을 이용하여 저장조의 크

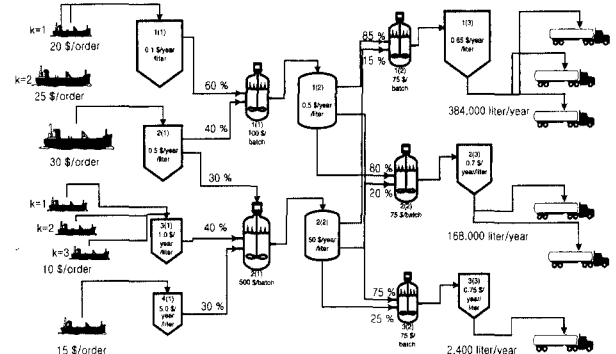


그림 3. 공장설계 예제.
Fig. 3. Example Plant.

기에 제약이 없는 경우의 최적 1회 생산량을 계산한다. 저장조 크기가 제약을 받는 경우는 (40)에 의해 최적 1회 생산량을 계산하고, (24)~(26)에 의해 최적 초기 지연시간을 계산한다. 예제들의 수치해는 UIS의 경우 $B_{1(2)}^{UIS} = 3668\text{liters}$ 인데, FIS(Case 1)의 경우 3000liters으로 바뀌고, UIS의 경우 $B_{1(1)}^{UIS} = 11033\text{liters}$ 인데 FIS(Case 2)의 경우 6122liters로 줄어든다. 최적 설계비용은 각각 119,769, 123,265, 129,992\$/year이다. 이는 제약이 늘어날수록 총 설계비용이 증가함을 의미한다.

IV. 결론

본 논문은 그물망 구조로 연결된 회분식 공정과 최대 크기가 정해진 저장조의 최적 크기를 결정하는 연구였다. 본 연구는 정밀 석유화학 단계와 같은 다품종 단단계 생산 재고 시스템의 개념설계에 유용하다. 사각과 모형이 공정과 저장조의 물질흐름을 효과적으로 표현하는데 사용되었다. 공장설계의 목적함수는 공정 준비비와 재고 유지비, 원료 주문 준비비의 합을 최고화하는 것이었다. 최적화의 제약식들은 최종제품의 수요를 만족하고, 모든 저장소에서 재고부족이나 재고과다 현상이 발생하지 않는 것이었다. 공정의 갯수가 제품의 갯수와 일치한다는 조건하에서 Kuhn-Tucker 조건에 대한 해석적 해가 발견되었다. 저장조의 크기가 제한이 없을 경우의 공정의 최적 크기는 제한되어 있을 경우의 최적 크기의 상한값이 된다. 3단계 생산공정으로 구성된 예제를 통하여 본 연구의 결과인 간단한 해석적인 해가 초기 공장설계 단계에서 여러 가지 대안을 신속히 검토하는데 효과적임을 나타내었다.

참고문헌

- [1] R. C. Ross, "How much tankage is enough?", *Hydrocarbon Processing*, Aug., 1973.
- [2] I. A. Karimi and G. V. Reklaitis, "Optimal selection of intermediate storage tank capacity in a periodic batch," *Semi-*

continuous Process, *AIChE J.*, vol. 29, no. 4, p. 588, 1983.

- [3] I. A. Karimi and G. V. Reklaitis, "Intermediate storage in noncontinuous processes involving stages of parallel units, *AIChE J.*, vol. 31, no. 1, p. 44, 1985.
- [4] I. A. Karimi and G. V. Reklaitis, "Deterministic variability analysis for intermediate storage in noncontinuous processes: Part I: Allowability conditions," *AIChE J.*, vol. 31, no. 9, p. 1516, 1985.
- [5] I. A. Karimi and G. V. Reklaitis, "Deterministic variability analysis for intermediate storage in noncontinuous processes: Part II: Storage sizing for serial systems," *AIChE J.*, vol. 31, no. 9, p. 1528, 1985.
- [6] E. S. Lee and G. V. Reklaitis, "Intermediate storage and operation of batch processes under batch failure," *Computers & Chem. Eng.*, vol. 13, no. 4/5, p. 491, 1988.
- [7] E. S. Lee and G. V. Reklaitis, "Intermediate storage and the operation of periodic processes under equipment failure," *Computers & Chem. Eng.*, vol. 13, no. 11/12, p. 1235, 1989.
- [8] J. A. Muckstadt and R. O. Roundy, "Analysis of multi-stage production systems," S. C. Graves et al., eds. *Logistics of Production and Inventory*. North-Holland Amsterdam, p. 59, 1993.
- [9] G. Yi and G. V. Reklaitis, "Optimal design of multiple batch units with feedstock/product storages," *Chem. Eng. Comm.*, vol. 181, p. 79, 2000.
- [10] 이경범, "준비비와 재고비를 고려한 직렬 비연속 공정과 중간 저장조의 최적설계," 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, 제3권, 제4호, pp. 398-405, 1997, 8.
- [11] 이경범, "원료 및 제품 저장조를 포함하는 병렬 비연속 공정의 최적설계," 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, 제3권, 제5호, pp. 532-541, 1997, 10.
- [12] 이경범, 이의수, "회분식 공정-저장조 그물망 구조의 최적설계," 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, 제4권, 제 6호, pp. 802-810, 1998, 12.



김형민

1977년 1월 28일생. 1999년 울산대학교 전자계산학과에서 학사. 2002년 울산대학교 전자계산학과 석사 예정. 주요 관심사는 소프트웨어공학, 공장 자동화, 멀티유저 게임 개발.



김규년

1960년 9월 27일생. 1983년 서울대학교 계산통계학과에서 학사. 1985년 서울대학교 계산통계학과에서 석사. 1992년 서울대학교 계산통계학과에서 박사학위를 받았다. 1986년부터 현재 울산대학교 컴퓨터 정보통신공학부 전임강사, 조교수, 부교수, 정교수. 주요 관심사는 소프트웨어공학, 공장자동화, 컴퓨터 음악.



이경범

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. 주요 관심 분야는 화학공장 생산계획 및 물류 최적화, 재고관리, 공정 제어 및 최적화 등.