

## 다수의 공장을 포함하는 불확실한 수요예측하의 회분식 공정-저장조 망의 최적설계

### Optimal Design Of Multisite Batch-Storage Network under Scenario Based Demand Uncertainty

이 경 범, 이 의 수, 이 인 범  
(Gyeongbeom Yi, Euy Soo Lee, and In Beom Lee)

**Abstract :** An effective methodology is reported for determining the optimal lot size of batch processing and storage networks which include uncertain demand forecasting. We assume that any given storage unit can store one material type which can be purchased from suppliers, internally produced, internally consumed, transported to or from other sites and/or sold to customers. We further assume that a storage unit is connected to all processing and transportation stages that consume/produce or move the material to which that storage unit is dedicated. Each processing stage transforms a set of feedstock materials or intermediates into a set of products with constant conversion factors. A batch transportation process can transfer one material or multiple materials at once between sites. The objective for optimization is to minimize the probability averaged total cost composed of raw material procurement, processing setup, transportation setup and inventory holding costs as well as the capital costs of processing stages and storage units. A novel production and inventory analysis formulation, the PSW(Periodic Square Wave) model, provides useful expressions for the upper/lower bounds and average level of the storage inventory. The expressions for the Kuhn-Tucker conditions of the optimization problem can be reduced to two sub-problems. The first yields analytical solutions for determining lot sizes while the second is a separable concave minimization network flow subproblem whose solution yields the average material flow rates through the networks for the given demand forecast scenario. The result of this study will contribute to the optimal design and operation of the global supply chain.

**Keywords :** optimal design, supply chain, multisite, transportation, analytical

#### I. 서론

최근 화학산업은 소비자 수요감소, 이윤폭 감소와 과당경쟁 등과 같은 여러가지 난관에 봉착해 있다. 이러한 난관을 타개하고 계속 이익을 창출하기 위하여 유사기업간의 적극적인 인수합병을 통해 관리인력을 줄이고 생산시설을 대형화하여 규모의 경제이익을 도모하고 있다. 정보기술 및 전산 최적화 기술의 급속한 발달이 이러한 과정을 가능하게 했다. 또다른 전략으로 소량다품종의 고부가가치 제품 개발에 관심을 돌리는 화학회사들도 있다. 이런 제품들은 대개 회분식의 평범한 장치를 이용하여 생산하며, 기대이익이 효율적인 생산보다는 고객의 요구에 부응하는 제품을 적기에 납품함으로써 발생한다.

화학산업의 이러한 개념변화를 반영하여 공정 시스템학계에서도 회분식 공정의 설계와 운전에 관한 많은 연구자료를 축적하였다. 연구자들의 관심은 공장 내의 기술적인 문제에 국한되지 않고, 불확실한 수요에서 고객만족[3], 대기업간 이익 분배[2], 신제품 개발과 생산[5], 다수 공장에서의 생산 분배[4]와 재고관리[6] 등과 같은 사업경영에 관한 주제까지 확대되고 있다. 연구주제의 다양화 뿐만 아니라 문제의 규모도

생산능력의 증가로 인해 실제크기에 육박하게 되었다. [8]은 유럽대륙을 포괄할 수 있는 대형 공급 사슬망의 최적설계를 취급하였다. 연구규모와 깊이에 있어서 괄목할 만한 성장에도 불구하고, 공급사슬망 관리에 관한 이해는 매우 제한적이다. 위에서 언급한 대부분의 연구들은 사업의 주요 경향을 반영하는 회계장부 같은 선형화된 수리 모형을 사용하고 있다. 선형 모형들은 유연성, 계산 또는 적용의 용이함으로 인해 많이 활용되고 있으며, 실제로 성공사례도 많이 있다[1], [12]. 그러나 이 회계장부 형식의 선형 모형이 오늘날 초대형 기업망에서 상업적 물류의 특성을 표현하는 유일한 대안인지, 계산 용량도 줄이고 좀더 나은 이해와 통찰력을 주는 모형은 없는지 연구해 볼 가치가 있다. 문제에 대한 인간의 이해야말로 컴퓨터를 이용한 사업 최적화 문제를 푸는 핵심요소이다.

공급 사슬망 최적화에 있어서 중요한 문제 중의 하나가 불확실성을 취급하는 일이다. 사업의 불확실성은 주로 미래의 수요예측, 가격변동과 자원공급에 걸쳐 나타난다. 최적화 모형에 이러한 불확실성을 완화하는 계산장치를 내포하는 것이 바람직한 처리방법으로 인식되고 있다[3,8]. 그러나 모형에 추가되는 확률적인 매개변수의 값을 구하기가 쉽지 않고, 부가되는 계산량의 증가가 막대하다는 점이 실제 응용에 있어서 걸림돌이 된다. 본 연구에서는 불확실한 수요예측하에 다수의 공장을 포함하는 대형 공급 사슬망의 설계와 운영 최적화에 대한 간단한 해석적인 해를 추구함으로써 이러한 기존 모형의 문제점을 극복하고자 한다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 11. 7., 채택확정 : 2004. 3. 17.

이경범 : 부경대학교 화학공학과(gbyi@pknu.ac.kr)

이의수 : 동국대학교 생명화학공학과(eslee@dgu.ac.kr)

이인범 : 포항공과대학교 화학공학과(iblee@postech.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학재단 목지기초연구(과제번호 R01-200200 0-00007-0)지원으로 수행되었음.

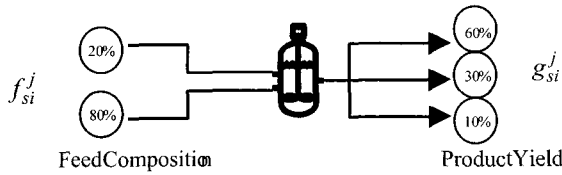


그림 1. 생산공정의 원료조성과 제품수율.

Fig. 1. Feedstock composition and product yield of a production process.

[9]는 사각과 모형이라 불리는 새로운 생산 재고 분석 모형을 사용하여 병렬 회분식 공정에 적용하였고, 곧 순차적인 다단계 회분식 공정-망구조로 확대하였으며[10], 재순환 흐름을 포함하는 비순차적 망구조에 대한 연구결과가 [11]에 의해 발표되었다. 사각과 모형은 회분식 공정의 운전이 주기적일 경우 저장조와 회분식 공정간의 물질의 흐름이 사각과 형태를 가지는 점에 착안하여 고안되었으며, 그 상한, 하한 및 평균값을 용이하게 구할 수 있는 성질을 가지고 있다. 본 연구에서는 비순차적인 망구조에 다수의 공장간에 수송과정을 포함하고자 한다. 우리는 임의의 회분식 공정-저장조 회로를 상정하고, 상세한 설계 및 운영 제약들은 생략할 것이다. 대신에 우리는 간결한 해석적인 해를 얻는데 초점을 맞춘다. 해석적인 해를 얻기 위하여 모든 운전은 미지의 주기를 갖는 주기적 활동이라고 가정한다. 수요예측의 불확실성은 시나리오적 접근법[8]으로 처리될 것이다. 본 연구에 사용된 가정들을 요약하면 다음과 같다

- i) 물질흐름은 주기적 사각과 모형을 따른다.
- ii) 최종제품 수요는 임의의 사각과 모형을 따른다.
- iii) 모든 저장조에서 재고부족은 일어나지 않는다.
- iv) 원료조성, 제품수율과 저장조 운전시간 분율은 알려진 상수이다.
- v) 공정은 모든 원료물질을 동시에 받고 제품을 동시에 배출한다.
- vi) 수요예측의 시나리오와 그 확률은 알려져 있다. 좀더 자세한 설명은 각장에서 취급될 것이다.

II. 매개 변수, 변수 정의

본 연구의 연구대상은 그림 2 에서 도시된 것처럼 다수의 공장의 집합(S)으로 구성되어 있고 각 공장  $s \in S$  는 저장조 집합(J)과 회분식 공정 집합(I(s))으로 구성되어 있다. 여기서 저장조 집합 J 는 공장에 따라 다를 수도 있고, 공정 집합 I(s) 는 공장과 무관할 수도 있다. 그림에서 원은 저장조 ( $j \in J$ )를 나타내고, 사각형은 회분식 생산공정( $i \in I(s)$ )을 나타내며, 화살표는 물질의 흐름을 나타낸다. N 개의 수요예측 시나리오가 주어졌다고 가정하고 각각을 하첨자 n=1, 2, ..., N 으로 나타낸다. 정의된 공급 사슬망은 바깥세계와 공급자로부터 원부자재의 구매와 고객에게 최종제품을 판매하는 활동을 통해 연결된다. 원부자재 공급자는 하첨자  $k \in K(s, j)$  로 나타내고 고객은 하첨자  $m \in M(s, j)$  으로 나타낸다. 공급자 집합  $K(s, j)$  과 고객 집합  $M(s, j)$  는 공장과 저장조에 따라 다르다. 각 생산공정은 그림 1에 나타난 것처럼

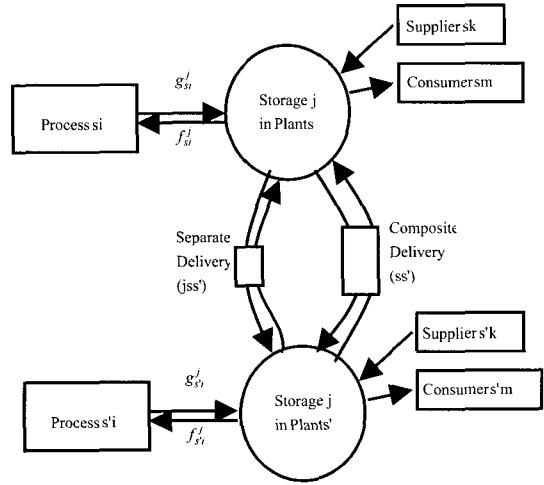


그림 2. 저장조 입출력 흐름.

Fig. 2. Incoming and outgoing material flows of a storage unit.

일정 비율( $f_{si}^j$ )의 다수의 원료물질이 필요하고, 고정 수율( $f_{si}^j$ )의 다수의 제품을 생산한다. 여기서 저장조 첨자 j 는 상첨자이고 공정 첨자 i 는 하첨자이다. 만약 어떤 공정과 저장조 사이에 물질의 흐름이 없다면 해당되는 원료조성 또는 제품수율은 영이다. 각 저장조는 한가지 물질만 저장한다. 실제로 한가지 물질을 저장하는 여러 개의 저장조는 한개로 간주된다. 따라서 저장조 첨자 j 는 물질을 구분하는 첨자도 된다. 어떤 공장의 저장조에 있는 물질은 다른 공장의 같은 물질을 저장하는 저장조로 이동될 수 있다. 이러한 물질의 이동은 물질을 변환하지 않지만 처리시간이 걸리는 회분식 수송공정으로 고려될 수 있다. 수송 공정은 하나의 물질 또는 여러 개의 물질을 동시에 이동시킬 수 있다. 전자는 단일 수송 공정, 후자는 복합수송 공정이라고 정의한다. 단일 수송 공정은 한개의 원료로 한개의 제품을 생산하는 회분식 공정과 수학적으로 동일하다. 복합 수송공정은 다수의 원료를 사용하여 다수의 제품을 생산하는 화학공정과 공통의 준비비를 가진 점에서 유사하나, 복합 수송공정은 수송물질의 조성이 가변적이고 화학공정은 원료나 제품의 조성이 일정하다는 점에서 차이가 난다. 공장 s 에서 다른 공장 s' 로 물질 j 를 이동시키는 단일 수송공정에 대한 사각과 모형을 구성해보자. 사각과 모형은 4 개의 변수 즉 공정크기  $\tilde{B}_{ss'}^{jm}$ , 운전주기  $\tilde{\omega}_{ss'}^{jn}$ , 저장조 가동시간 분율  $\tilde{x}_{ss'}^j$  (or  $\tilde{x}'_{ss'}^j$ ) 과 가동시작 시간  $\tilde{y}_{ss'}^{jm}$  (or  $\tilde{y}'_{ss'}^{jm}$ ) 로 구성되어 있다. 저장조 가동시간 분율  $\tilde{x}_{ss'}^j$  (or  $\tilde{x}'_{ss'}^j$ ) 은 저장조에 물질을 입고하거나 출고하는데 걸리는 시간을 운전주기로 나눈 값이다. 가동시작 시간  $\tilde{y}_{ss'}^{jm}$  (or  $\tilde{y}'_{ss'}^{jm}$ ) 은 첫번째 생산 또는 수송을 위해 원료를 공정에 주입(또는 제품을 공정으로부터 배출)하는 시간이다. 복합 수송공정에는 운전주기, 저장조 운전시간 분율, 가동시작 시간이 제품과 무관하므로 상첨자 j 가 필요없다. 복합 수송

공정과 관련된 변수들은  $\hat{B}_{ss'}^{jn}, \hat{\omega}_{ss'}^n, \hat{x}_{ss'}^j$  (or  $\hat{x}'_{ss'}$ ),  $\hat{t}_{ss'}^n$  (or  $\hat{t}'_{ss'}$ ) 이다. 다른 공정에 대한 변수들도 같은 방법으로 정의된다. 최종제품에 대한 고객의 수요는  $B_{sm}^{jn}, \omega_{sm}^{jn}, x_{sm}^j, t_{sm}^{jn}$ , 내부 생산공정은  $B_{si}^n, \omega_{si}^n, x_{si}^j$  (or  $x'_{si}$ ),  $t_{si}^n$  (or  $t'_{si}$ ), 구매공정은  $B_{sk}^{jn}, \omega_{sk}^{jn}, x_{sk}^j, t_{sk}^{jn}$  으로 각각 정의된다.

각 저장조는 그림 2에 나타난 것처럼 원료공급자로 부터 구매, 고객에 대한 출하, 공정에 투입, 공정으로부터 생산, 복합 수송에 의한 입고, 복합 수송에 의한 출고, 단일 수송에 의한 입고, 단일 수송에 의한 출고와 같은 물질의 이동에 관련되어 있다. [15] 에서 논의한 것처럼 공정에 대한 원료 투입(또는 공정으로부터 제품 배출)은 동시에 일어나고, 그들의 저장조 운전시간 분율은 같다고 가정한다. 즉 변수  $x_{si}$  (or  $x'_{si}$ ) 와  $t_{si}^n$  (or  $t'_{si}$ ) 에는 상첨자  $j$  가 필요하지 않다. 본 연구에서는 모든 저장조 운전시간 분율을 알려진 매개변수로 고려된다. 최종제품의 수요예측은 각 시나리오  $n$  에 대해 이미 알려진 매개변수  $B_{sm}^{jn}, \omega_{sm}^{jn}, x_{sm}^j, t_{sm}^{jn}$  를 갖는 사각파의 합으로 구성된다[14].

**III. 공장 설계를 위한 비선형 최적화 모델**

원료의 구매수량, 공정의 크기, 단일수송의 크기와 복합 수송의 주기는 시나리오와 관련이 없고, 이들을 제외한 다른 변수들은 모두 시나리오에 의존한다고 가정한다.

$$B_{sk}^{jn} = B_{sk}^j, B_{si}^n = B_{si}, \omega_{ss'}^n = \omega_{ss'} \tag{1}$$

and  $B_{ss'}^{jn} = B_{ss'}^j$

복합수송의 경우 크기 대신 주기가 시나리오와 관련이 없다고 선정된 이유는 해석적인 해를 얻기 위함이다. 다른 변수들도 크기 대신 주기가 시나리오와 관련이 없도록 지정될 수 있으나 일반적으로 크기가 주기에 비해서는 비교적 변동이 적은 변수이므로 시나리오와 관련이 없는 변수로서 더욱 적절하다. 모든 가동 시작 시간과 평균유속은 시나리오에 의존한다고 가정한다.

생산(수송)의 한 주기가 원료의 투입(적재), 처리(수송)와 제품의 배출(하역)로 구성되어 있다는 사실로부터 원료(적재)의 가동시작시간과 제품(하역)의 가동시작시간 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$t_{si}^n = t_{si}^n + \omega_{si}^n(1 - x'_{si}) \tag{2}$$

$$\hat{t}_{ss'}^n = \hat{t}_{ss'}^n + \hat{\omega}_{ss'}^n(1 - \hat{x}'_{ss'}) \tag{3}$$

$$\tilde{t}_{ss'}^{jn} = \tilde{t}_{ss'}^{jn} + \tilde{\omega}_{ss'}^{jn}(1 - \tilde{x}'_{ss'}^j) \tag{4}$$

$D_{si}^n$  가 공정  $i$  를 통해 흐르는 평균유속이라고 하자. 즉 공정크기  $B_{si}$  를 주기  $\omega_{si}^n$  로 나눈 값이다. 공급자로부터 원료구매와 고객에게 최종제품을 출하하는 평균유속을 각각

$$D_{sk}^{jn}, D_{sm}^{jn} \text{ 라 하자. 여기서 } D_{sk}^{jn} = \frac{B_{sk}^j}{\omega_{sk}^{jn}}, D_{sm}^{jn} = \frac{B_{sm}^{jn}}{\omega_{sm}^{jn}} \text{ 이}$$

다. 공장  $s$  와 다른 공장  $s'$  사이의 복합수송과 단일수송의 평균 물질 유속을 각각  $\hat{D}_{ss'}^{jn}, \tilde{D}_{ss'}^{jn}$  라 두자. 여기서

$$\hat{D}_{ss'}^{jn} = \frac{\hat{B}_{ss'}^{jn}}{\hat{\omega}_{ss'}^n}, \tilde{D}_{ss'}^{jn} = \frac{\tilde{B}_{ss'}^j}{\tilde{\omega}_{ss'}^{jn}} \text{ 이다. 공장 } s \text{ 의 저장조 } j \text{ 에 대}$$

한 장기적인 물질수지식은 다음과 같다;

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{|I(s)|} g_{si}^j D_{si}^n + \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} D_{sk}^{jn} + \sum_{s' \neq s} |S| \hat{D}_{s's}^{jn} + \sum_{s' \neq s} |S| \tilde{D}_{s's}^{jn} \\ & = \sum_{i=1}^{|I(s)|} f_{si}^j D_{si}^n + \sum_{m=1}^{|M(s,j)|} D_{sm}^{jn} + \sum_{s' \neq s} |S| \hat{D}_{s's}^{jn} + \sum_{s' \neq s} |S| \tilde{D}_{s's}^{jn} \end{aligned} \tag{5}$$

$\forall s, j, n$

공장  $s$  의 저장조  $j$  에 대한 초기 재고량을  $V_s^{nj}(0)$  라 하고, 시간  $t$  에서의 재고량을  $V_s^{jn}(t)$  라 두자. 재고량은 공급하는 공정으로부터 들어오는 유량의 합과 소비하는 공정으로 나가는 유량의 합의 차로 부터 계산되어진다. 유량을 계산하기 위해서는 참고문헌 [13] 에 나타나 있는 것처럼 사각파 모형의 특별한 성질을 이용해야 한다. 저장조는 원료공급자, 생산공정, 복합수송과 단일수송 공정으로부터의 입력 흐름과 고객, 생산공정, 복합수송과 단일수송공정으로의 출력 흐름과 연결되어 있다. 공장  $s$  의 저장조  $j$  에 대한 재고량은

$$\begin{aligned} V_s^{jn}(t) &= V_s^{jn}(0) \\ &+ \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} B_{sk}^j \left[ \text{int} \left[ \frac{t - t_{sk}^{jn}}{\omega_{sk}^{jn}} \right] + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_{sk}^j} \text{res} \left[ \frac{t - t_{sk}^{jn}}{\omega_{sk}^{jn}} \right] \right\} \right] \\ &+ \sum_{i=1}^{|I(s)|} (g_{si}^j B_{si}) \left[ \text{int} \left[ \frac{t - t_{si}^n}{\omega_{si}^n} \right] + \min \left\{ 1, \frac{1}{x'_{si}} \text{res} \left[ \frac{t - t_{si}^n}{\omega_{si}^n} \right] \right\} \right] \\ &+ \sum_{s' \neq s} |S| \hat{B}_{s's}^{jn} \left[ \text{int} \left[ \frac{t - \hat{t}_{s's}^{jn}}{\hat{\omega}_{s's}^n} \right] + \min \left\{ 1, \frac{1}{\hat{x}'_{s's}} \text{res} \left[ \frac{t - \hat{t}_{s's}^{jn}}{\hat{\omega}_{s's}^n} \right] \right\} \right] \\ &+ \sum_{s' \neq s} |S| \tilde{B}_{s's}^j \left[ \text{int} \left[ \frac{t - \tilde{t}_{s's}^{jn}}{\tilde{\omega}_{s's}^{jn}} \right] + \min \left\{ 1, \frac{1}{\tilde{x}'_{s's}^j} \text{res} \left[ \frac{t - \tilde{t}_{s's}^{jn}}{\tilde{\omega}_{s's}^{jn}} \right] \right\} \right] \\ &- \sum_{m=1}^{|M(s,j)|} B_{sm}^{jn} \left[ \text{int} \left[ \frac{t - t_{sm}^{jn}}{\omega_{sm}^{jn}} \right] + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_{sm}^j} \text{res} \left[ \frac{t - t_{sm}^{jn}}{\omega_{sm}^{jn}} \right] \right\} \right] \tag{6} \\ &- \sum_{i=1}^{|I(s)|} (f_{si}^j B_{si}) \left[ \text{int} \left[ \frac{t - t_{si}^n}{\omega_{si}^n} \right] + \min \left\{ 1, \frac{1}{x_{si}} \text{res} \left[ \frac{t - t_{si}^n}{\omega_{si}^n} \right] \right\} \right] \\ &- \sum_{s' \neq s} |S| \hat{B}_{ss'}^{jn} \left[ \text{int} \left[ \frac{t - \hat{t}_{ss'}^n}{\hat{\omega}_{ss'}^n} \right] + \min \left\{ 1, \frac{1}{\hat{x}_{ss'}} \text{res} \left[ \frac{t - \hat{t}_{ss'}^n}{\hat{\omega}_{ss'}^n} \right] \right\} \right] \\ &- \sum_{s' \neq s} |S| \tilde{B}_{ss'}^j \left[ \text{int} \left[ \frac{t - \tilde{t}_{ss'}^{jn}}{\tilde{\omega}_{ss'}^{jn}} \right] + \min \left\{ 1, \frac{1}{\tilde{x}_{ss'}^j} \text{res} \left[ \frac{t - \tilde{t}_{ss'}^{jn}}{\tilde{\omega}_{ss'}^{jn}} \right] \right\} \right] \end{aligned}$$

(6) 의 상한값과 하한값, 그리고 평균값은 [13] 에서와 같은 방법으로 계산되며, 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \underline{V}_s^{jn} &= V_s^{jn}(0) + \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} (1-x_{sk}^j) B_{sk}^j - \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} D_{sk}^{jn} t_{sk}^{jn} \\
 &+ \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1-\tilde{x}'_{s's}) \widehat{D}_{s's}^{jn} \widehat{\omega}_{s's} - \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widehat{D}_{s's}^{jn} \widehat{t}'_{s's} + \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1-\tilde{x}'_{s's'}) \widetilde{B}_{s's'}^j \\
 &- \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widetilde{D}_{s's'}^{jn} \widetilde{t}'_{s's'} + \sum_{i=1}^{|I(s)|} (1-x'_{si}) g_{si}^j B_{si} - \sum_{i=1}^{|I(s)|} g_{si}^j D_{si}^{jn} t_{si}^{jn} \\
 &+ \sum_{i=1}^{|I(s)|} f_{si}^j D_{si}^{jn} \gamma_{si}^n + \sum_{m=1}^{|M(s,j)|} D_{sm}^{jn} t_{sm}^{jn} + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widehat{D}_{s's'}^{jn} \widehat{\gamma}_{s's'}^n + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widetilde{D}_{s's'}^{jn} \widetilde{\gamma}_{s's'}^n
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{V}_s^{jn} &= V_s^{jn}(0) - \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} D_{sk}^{jn} t_{sk}^{jn} - \sum_{i=1}^{|I(s)|} g_{si}^j D_{si}^{jn} t_{si}^{jn} - \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widehat{D}_{s's'}^{jn} \widehat{t}'_{s's'} \\
 &- \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widetilde{D}_{s's'}^{jn} \widetilde{t}'_{s's'} - \sum_{i=1}^{|I(s)|} (1-x'_{si}) f_{si}^j B_{si} + \sum_{i=1}^{|I(s)|} f_{si}^j D_{si}^{jn} t_{si}^{jn} \\
 &- \sum_{m=1}^{|M(s,j)|} (1-x_{sm}^j) B_{sm}^j + \sum_{m=1}^{|M(s,j)|} D_{sm}^{jn} t_{sm}^{jn} - \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1-\tilde{x}'_{s's'}) \widehat{D}_{s's'}^{jn} \widehat{\omega}_{s's'} \\
 &+ \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widehat{D}_{s's'}^{jn} \widehat{\gamma}_{s's'}^n - \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1-\tilde{x}'_{s's'}) \widetilde{B}_{s's'}^j + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widetilde{D}_{s's'}^{jn} \widetilde{\gamma}_{s's'}^n
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{V}_s^{jn} &= V_s^{jn}(0) + \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} \frac{(1-x_{sk}^j)}{2} B_{sk}^j - \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} D_{sk}^{jn} t_{sk}^{jn} \\
 &+ \sum_{i=1}^{|I(s)|} \frac{(1-x'_{si})}{2} g_{si}^j B_{si} - \sum_{i=1}^{|I(s)|} g_{si}^j D_{si}^{jn} t_{si}^{jn} + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \frac{(1-\tilde{x}'_{s's'})}{2} \widehat{D}_{s's'}^{jn} \widehat{\omega}_{s's'} \\
 &- \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widehat{D}_{s's'}^{jn} \widehat{t}'_{s's'} + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \frac{(1-\tilde{x}'_{s's'})}{2} \widetilde{B}_{s's'}^j - \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widetilde{D}_{s's'}^{jn} \widetilde{t}'_{s's'} \\
 &- \sum_{i=1}^{|I(s)|} \frac{(1-x'_{si})}{2} f_{si}^j B_{si} + \sum_{i=1}^{|I(s)|} f_{si}^j D_{si}^{jn} t_{si}^{jn} - \sum_{m=1}^{|M(s,j)|} \frac{(1-x_{sm}^j)}{2} B_{sm}^j \\
 &+ \sum_{m=1}^{|M(s,j)|} D_{sm}^{jn} t_{sm}^{jn} - \sum_{s' \neq s}^{|S|} \frac{(1-\tilde{x}'_{s's'})}{2} \widehat{D}_{s's'}^{jn} \widehat{\omega}_{s's'} + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widehat{D}_{s's'}^{jn} \widehat{\gamma}_{s's'}^n \\
 &- \sum_{s' \neq s}^{|S|} \frac{(1-\tilde{x}'_{s's'})}{2} \widetilde{B}_{s's'}^j + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \widetilde{D}_{s's'}^{jn} \widetilde{\gamma}_{s's'}^n
 \end{aligned} \tag{9}$$

(7) 은 저장조 크기를 계산하는 데 이용되고, (8) 은 최적화의 제약식으로 이용되며, (9) 는 재고유지 비용을 계산하는 데 이용된다.

공장  $s$  에서 원료  $j$  의 주문준비비를  $A_{sk}^j$  \$/order, 공정  $i$  의 생산준비비를  $A_{si}$  \$/batch 라 둔다. 공장  $s$  와  $s'$  사이의 복합수송과 단일수송에 대한 준비비를 각각  $\widehat{A}_{s's'}^j, \widetilde{A}_{s's'}^j$  라 둔다. 복합수송에 대한 준비비는 물질  $j$  와 무관하다. 공장  $s$  에서 저장조  $j$  의 연간 재고유지비용을  $H_s^j$  \$/year/liter 라 둔다.  $a_{sk}^j$  (\$/year/liter) 는 원료구매에 대한 연간 자본비용이고,

$a_{si}$  (\$/year/liter) 는 공정  $i$  에 대한 연간 자본비용이며,  $b_s^j$  (\$/year/liter) 는 저장조  $j$  에 대한 연간 자본비용이다. 복합수송과 단일수송에 대한 연간 자본비용은 각각  $\widehat{a}_{s's'}^j, \widetilde{a}_{s's'}^j$  로 정의한다. 공정 저장조 망 설계의 목적함수는 원료구매비, 준비비, 재고유지비와 자본비용으로 구성된 총비용의 확률평균값을 최소화하는 것이다.

$$\begin{aligned}
 TC &= \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} \left[ \frac{A_{sk}^j \sum_{n=1}^N [\pi^n D_{sk}^{jn}]}{B_{sk}^j} + a_{sk}^j B_{sk}^j \right] \\
 &+ \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{i=1}^{|I(s)|} \left[ \frac{A_{si} \sum_{n=1}^N [\pi^n D_{si}^{jn}]}{B_{si}} + a_{si} B_{si} \right] \\
 &+ \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{n=1}^N \left[ \pi^n \left[ H_s^j \overline{V}_s^{jn} + b_s^j \overline{V}_s^{jn} \right] \right] \\
 &+ \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{s' \neq s}^{|S|} \left[ \frac{\widehat{A}_{s's'}^j}{\widehat{\omega}_{s's'}} + \widehat{a}_{s's'}^j \left( \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{n=1}^N [\pi^n \widehat{D}_{s's'}^{jn}] \right) \widehat{\omega}_{s's'} \right] \\
 &+ \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{s' \neq s}^{|S|} \sum_{j=1}^{|J|} \left[ \frac{\widetilde{A}_{s's'}^j \sum_{n=1}^N [\pi^n \widetilde{D}_{s's'}^{jn}]}{\widetilde{B}_{s's'}^j} + \widetilde{a}_{s's'}^j \widetilde{B}_{s's'}^j \right]
 \end{aligned} \tag{10}$$

저장조의 크기는 재고량의 상한값  $\overline{V}_s^{jn}$  이 대신하며, (7) 을 이용한다. 최적화의 독립변수는 공정 크기 및 주기  $B_{sk}^j, B_{si}, \widehat{B}_{s's'}^j, \widetilde{B}_{s's'}^j$ , 가동시작시간  $t_{sk}^{jn}, t_{si}^{jn}, \widehat{t}'_{s's'}^{jn}, \widetilde{t}'_{s's'}^{jn}$  과 평균유속  $D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \widehat{D}_{s's'}^{jn}, \widetilde{D}_{s's'}^{jn}$  이다. 가동시작시간  $t_{si}^{jn}, \widehat{t}'_{s's'}^{jn}, \widetilde{t}'_{s's'}^{jn}$  는 (2) ~ (4) 에 의해  $\gamma_{si}^n, \widehat{\gamma}_{s's'}^n, \widetilde{\gamma}_{s's'}^n$  으로 바뀐다. 재고량  $V_s^{jn}(t)$  는 고갈되지 않아야 한다. 충분조건은  $0 \leq \underline{V}_s^{jn}$  이다. 최적화 문제는 음이 아닌 독립변수  $B_{sk}^j, B_{si}^n, \widehat{B}_{s's'}^j, \widetilde{B}_{s's'}^j, t_{sk}^{jn}, \gamma_{si}^n, \widehat{\gamma}_{s's'}^n, \widetilde{\gamma}_{s's'}^n$  와  $D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \widehat{D}_{s's'}^{jn}, \widetilde{D}_{s's'}^{jn}$  에 대하여  $0 \leq \underline{V}_s^{jn}$  의 제약하에 목적함수 (10) 을 최소화하는 것이다. 목적함수 (10) 은 만약  $D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \widehat{D}_{s's'}^{jn}, \widetilde{D}_{s's'}^{jn}$  가 매개변수로 간주되면 독립변수  $B_{sk}^j, B_{si}^n, \widehat{B}_{s's'}^j, \widetilde{B}_{s's'}^j$  와  $t_{sk}^{jn}, \gamma_{si}^n, \widehat{\gamma}_{s's'}^n, \widetilde{\gamma}_{s's'}^n$  에 대하여 볼록함수이고, 제약식은 선형이다. 그러나  $D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \widehat{D}_{s's'}^{jn}, \widetilde{D}_{s's'}^{jn}$  에 대하여 볼록인지는 명확하지 않다. 먼저  $D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \widehat{D}_{s's'}^{jn}, \widetilde{D}_{s's'}^{jn}$  를 매개변수로 고려하고  $B_{sk}^j, B_{si}^n, \widehat{B}_{s's'}^j, \widetilde{B}_{s's'}^j$  와  $t_{sk}^{jn}, \gamma_{si}^n, \widehat{\gamma}_{s's'}^n, \widetilde{\gamma}_{s's'}^n$  에 대한

Kuhn-Tucker 조건의 해를 구한 다음  $D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \hat{D}_{ss'}^{jn}, \check{D}_{ss'}^{jn}$ 에 대해 풀 것이다. 이러한 이단계 문제 해법은 원래 문제와 이단계 문제의 Kuhn-Tucker 조건이 제약식이 등식이 될 때 일치하므로 정당하다[11]. 이단계 문제에서 첫째 문제는 선형 부등 제약식과 볼록 목적함수를 가지고 있고, 둘째 문제는 선형 등식 제약식과 오목 목적함수를 가지고 있다. 이단계 해법은 둘째 문제가 전범위 최적점으로 수렴하는 한 전범위 최적점을 얻게 된다.

**IV. Kuhn-Tucker 조건의 해**

첫째 최적화 문제는  $D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \hat{D}_{ss'}^{jn}, \check{D}_{ss'}^{jn}$ 를 고정시키고  $0 \leq V_s^{jn}$ 의 제약하에 목적함수 (10)을 최소화하는 것이다.

이문제의 Kuhn-Tucker 해는 [16]에 나타나 있는 것과 같은 수리조작에 의해 유도되며, 최적 공정크기와 주기는 다음과 같다.

$$B_{sk}^j = \sqrt{\frac{A_{sk}^j \sum_{n=1}^N [\pi^n D_{sk}^{jn}]}{\Psi_{sk}^j}}, \omega_{sk}^{jn} = \frac{B_{sk}^j}{D_{sk}^{jn}} \quad (11)$$

$$B_{si} = \sqrt{\frac{A_{si} \sum_{n=1}^N [\pi^n D_{si}^n]}{\Psi_{si}}}, \omega_{si}^n = \frac{B_{si}}{D_{si}^n} \quad (12)$$

$$\hat{\omega}_{ss'} = \sqrt{\frac{\hat{A}_{ss'}}{\sum_{j=1}^{|J|} \sum_{n=1}^N [\pi^n \hat{D}_{ss'}^{jn}] \hat{\Psi}_{ss'}^j}}, \hat{B}_{ss'}^{jn} = \hat{D}_{ss'}^{jn} \hat{\omega}_{ss'} \quad (13)$$

$$\check{B}_{ss'}^j = \sqrt{\frac{\check{A}_{ss'}^j \sum_{n=1}^N [\pi^n \check{D}_{ss'}^{jn}]}{\check{\Psi}_{ss'}^j}}, \check{\omega}_{ss'}^{jn} = \frac{\check{B}_{ss'}^j}{\check{D}_{ss'}^{jn}} \quad (14)$$

여기서

$$\Psi_{sk}^j = \left( \frac{H_s^j}{2} + b_s^j \right) (1 - x_{sk}^j) + a_{sk}^j \quad (15)$$

$$\Psi_{si} = a_{si} + (1 - x_{si}) \sum_{j=1}^{|J|} \left( \frac{H_s^j}{2} + b_s^j \right) f_{si}^j + (1 - x'_{si}) \sum_{j=1}^{|J|} \left( \frac{H_s^j}{2} + b_s^j \right) g_{si}^j \quad (16)$$

$$\hat{\Psi}_{ss'}^j = \hat{a}_{ss'} + \left[ \left( \frac{H_s^j}{2} + b_s^j \right) (1 - \hat{x}_{ss'}) + \left( \frac{H_{s'}^j}{2} + b_{s'}^j \right) (1 - \hat{x}'_{ss'}) \right] \quad (17)$$

$$\check{\Psi}_{ss'}^j = \check{a}_{ss'} + \left[ \left( \frac{H_s^j}{2} + b_s^j \right) (1 - \check{x}_{ss'}^j) + \left( \frac{H_{s'}^j}{2} + b_{s'}^j \right) (1 - \check{x}'_{s's'}) \right] \quad (18)$$

만약 공정크기 대신에 주기가 시나리오와 무관하다면 최적

해는  $\omega_{sk}^j = \sqrt{\frac{A_{sk}^j}{\Psi_{sk}^j \langle D_{sk}^{jn} \rangle}}, \omega_{si} = \sqrt{\frac{A_{si}}{\Psi_{si} \langle D_{si}^n \rangle}}$ 와

$\check{\omega}_{ss'}^j = \sqrt{\frac{\check{A}_{ss'}^j}{\check{\Psi}_{ss'}^j \langle \check{D}_{ss'}^{jn} \rangle}}$ 가 된다. 여기서  $\langle X^n \rangle \equiv \sum_{n=1}^N \pi^n X^n$

이다. (11) ~ (14)에서 최적해들이 각각 유속의 확률평균값에 의존한다는 사실에 주목할 필요가 있다. 최적 가동시작시간은

$$\begin{aligned} & |K(s, j)| \sum_{k=1}^{|K(s, j)|} D_{sk}^{jn} \omega_{sk}^{jn} + \sum_{i=1}^{|I(s)|} (g_{si}^j - f_{si}^j) D_{si}^n \omega_{si}^n + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \hat{D}_{s's'}^{jn} \hat{\omega}_{s's'}^{jn} \\ & - \sum_{s' \neq s}^{|S|} \check{D}_{s's'}^{jn} \check{\omega}_{s's'}^{jn} + \sum_{s' \neq s}^{|S|} \check{D}_{s's'}^{jn} \check{\omega}_{s's'}^{jn} - \sum_{s' \neq s}^{|S|} \check{D}_{s's'}^{jn} \check{\omega}_{s's'}^{jn} \\ & = V_s^{jn}(0) - \sum_{m=1}^{|M(s, j)|} (1 - x_{sm}^{jn}) B_{sm}^{jn} + \sum_{m=1}^{|M(s, j)|} D_{smt}^{jn} \omega_{sm}^{jn} \\ & - \sum_{i=1}^{|I(s)|} (1 - x_{si}^j) f_{si}^j B_{si}^j - \sum_{i=1}^{|I(s)|} (1 - x'_{si}) g_{si}^j B_{si}^j \\ & - \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1 - \hat{x}_{ss'}) \hat{D}_{ss'}^{jn} \hat{\omega}_{ss'}^{jn} - \sum_{s' \neq s}^{|S|} \hat{D}_{s's'}^{jn} \hat{\omega}_{s's'}^{jn} (1 - \hat{x}'_{s's'}) \\ & - \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1 - \check{x}_{ss'}^j) \check{B}_{ss'}^j - \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1 - \check{x}'_{s's'}) \check{B}_{s's'}^j \end{aligned} \quad (19)$$

(19)는 최대  $(|S||J||K| + |I||S| + |S|(|S|-1) + |J||S|(|S|-1))N$ 개의 변수와  $|J||S|N$ 개의 수식으로 구성되어 있다. 변수의 숫자가 수식의 숫자보다 많을 때 나머지 자유도를 고정하기 위하여 추가적인 목적함수가 필요하다. 변수의 숫자가 수식의 숫자보다 그리 많지않을 경우에는 변수들은 모두 음이 아니고 최대값의 제약이 있으므로 (19)는 불가해되기 쉽다. 최적의 저장조 크기는

$$\bar{V}_s^j = \max_n \left\{ \bar{V}_s^{jn} \right\} \quad (20)$$

여기서

$$\begin{aligned} \bar{V}_s^{jn} & = \sum_{k=1}^{|K(s, j)|} (1 - x_{sk}^j) B_{sk}^j + \sum_{m=1}^{|M(s, j)|} (1 - x_{sm}^j) B_{sm}^{jn} \\ & + \sum_{i=1}^{|I|} \left[ (1 - x_{si}^j) f_{si}^j + (1 - x'_{si}) g_{si}^j \right] B_{si} \\ & - \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1 - \hat{x}_{ss'}) \hat{D}_{ss'}^{jn} \hat{\omega}_{ss'}^{jn} - \sum_{s' \neq s}^{|S|} \hat{D}_{s's'}^{jn} \hat{\omega}_{s's'}^{jn} (1 - \hat{x}'_{s's'}) \\ & - \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1 - \check{x}_{ss'}^j) \check{B}_{ss'}^j - \sum_{s' \neq s}^{|S|} (1 - \check{x}'_{s's'}) \check{B}_{s's'}^j \end{aligned} \quad (21)$$

저장조의 크기는 (20) 에서 나타나 있듯이 확률변수에 직접적으로 영향을 받는다. 최적의 목적함수 값은

$$\begin{aligned}
 & *TC(D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \widehat{D}_{ss'}^{jn}, \widetilde{D}_{ss'}^{jn}) \\
 &= 2 \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{k=1}^{|K(s,j)|} \sqrt{A_{sk}^j \Psi_{sk}^j \sum_{n=1}^N \pi^n D_{sk}^{jn}} \\
 &+ 2 \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{i=1}^{|I(s)|} \sqrt{A_{si} \Psi_{si} \sum_{n=1}^N \pi^n D_{si}^n} \\
 &+ 2 \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{s' \neq s}^{|S|} \sqrt{\widehat{A}_{ss'}^j \sum_{j=1}^{|J|} \widehat{\Psi}_{ss'}^j \sum_{n=1}^N \pi^n \widehat{D}_{ss'}^{jn}} \\
 &+ 2 \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{s' \neq s}^{|S|} \sum_{j=1}^{|J|} \sqrt{\widetilde{A}_{ss'}^j \widetilde{\Psi}_{ss'}^j \sum_{n=1}^N \pi^n \widetilde{D}_{ss'}^{jn}} \\
 &+ \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|J|} \left( \frac{H_s^j}{2} + b_s^j \right) \sum_{m=1}^{|M(s,j)|} (1 - x_{sm}^j) \sum_{n=1}^N \pi^n B_{sm}^{jn}
 \end{aligned} \tag{22}$$

둘째 최적화 문제는 평균 유속  $D_{sk}^{jn}, D_{si}^n, \widehat{D}_{ss'}^{jn}, \widetilde{D}_{ss'}^{jn}$  에 대하여 (5) 의 제약하에 목적함수 (22) 를 최소화하는 것이다. 이 최적화 문제는 분리가능한 오목 최소화 망흐름 문제의 부류에 속한다. 이러한 문제에 대하여 매우 효과적인 비선형 분지축소 알고리즘이 [7] 에 발표되었다. 좀더 간단한 방법으로서 오목 목적함수를 부분적으로 선형화하는 혼합정수계획법이 [8] 에 발표되었다. 다음 장의 예제에서는 이 알고리즘을 사용할 것이다. 평균유속이 결정되고 나면 나머지 변수들은 (11)-(21) 에 의해 바로 계산된다.

**V. 공급 사슬망 설계의 예**

설계 예제문제는 18 개의 공장, 14 개의 물질, 9 개의 회분식 생산공정으로 구성되어 있다. 공장 1 은 6 개의 생산공정을 공장 2 와 3 은 각각 3 개의 생산공정을 가지고 있다. 공장 4-9 는 중간 물류센터, 나머지는 분배센터 역할을 한다. 고객의 수요는 모든 공장의 저장물질에 대해서 발생할 수 있다. 편의상 수요는 일정하다고 가정한다. 확률 1/3 의 세가지 최종제품 수요 시나리오를 상정한다. 14 개의 물질 중에서 4 개는 원료로서 구매되고 나머지는 공장 1-3 에서 생산된 뒤 다른 공장으로 수송된다. 물류공장 4-9 에서 생산공장 1-3 으로 물질이 수송되는 경우는 없다고 가정하며, 공장 1-9 에서 공장 10-18 로는 복합수송이 일어나지 않는다고 가정한다. 저장조운전시간분율은 0 으로 가정한다. 이 가정은 장치의 크기와 비용을 증가시키지만 문제의 소지를 줄여 준다. 그림 3 는 세가지 수요 시나리오에 대한 한 저장조의 재고변화를 나타낸다.

초기 재고량도 시나리오에 의존한다고 가정했는데 그 이유는 복합수송이 존재할 경우 시나리오와 무관한 초기 재고값으로는 가능해를 찾을 수 없었기 때문이다. 표 1 은 회분식 생산공정의 원료조성과 제품수율을 나타내고 있다. 최적 평균유속을 계산하는 분리가능한 오목 최소화 망흐름 문제를 풀기 위하여 참고문헌 [8] 에 있는 알고리즘을 이용하였다.

표 1. 예제에서 생산공정의 원료조성과 제품수율.

Table 1. Feedstock composition and product yield for example production processes.

Site Index	Process Index	Storage Index	Feedstock Composition	Product Yield
S1	I1	J6	0.85	0
S1	I1	J10	0	1
S1	I1	J11	0.15	0
S1	I2	J2	0.17	0.26
S1	I2	J3	0	0.35
S1	I2	J4	0	0.39
S1	I2	J9	0.27	0
S1	I2	J11	0.56	0
S1	I3	J2	0.08	0
S1	I3	J7	0	0.23
S1	I3	J8	0	0.31
S1	I3	J9	0.12	0.46
S1	I3	J10	0.25	0
S1	I3	J14	0.55	0
S1	I4	J2	0.19	0
S1	I4	J8	0.21	0
S1	I4	J10	0.6	0
S1	I4	J12	0	0.18
S1	I4	J13	0	0.27
S1	I4	J14	0	0.55
S1	I5	J5	0.19	0
S1	I5	J6	0	1
S1	I5	J8	0.23	0
S1	I5	J11	0.58	0
S1	I6	J1	0	1
S1	I6	J3	0.23	0
S1	I6	J8	0.22	0
S1	I6	J11	0.55	0
S2	I1	J3	0.2	0
S2	I1	J11	0.5	0.27
S2	I1	J12	0	0.29
S2	I1	J13	0	0.44
S2	I1	J14	0.3	0
S2	I2	J3	0.29	0
S2	I2	J4	0	0.16
S2	I2	J5	0	0.2
S2	I2	J6	0	0.32
S2	I2	J7	0	0.32
S2	I2	J11	0.71	0
S2	I3	J2	0	0.43
S2	I3	J3	0	0.57
S2	I3	J7	0.13	0
S2	I3	J12	0.2	0
S2	I3	J13	0.45	0
S2	I3	J14	0.22	0
S3	I1	J3	0	0.47
S3	I1	J4	0.52	0.53
S3	I1	J7	0.48	0
S3	I2	J1	0	0.05
S3	I2	J2	0	0.06
S3	I2	J4	0.31	0
S3	I2	J6	0	0.17
S3	I2	J7	0.29	0.17
S3	I2	J8	0	0.22
S3	I2	J9	0	0.33
S3	I2	J12	0.4	0
S3	I3	J4	1	0

목적함수의 각 항은 5 개의 구간으로 선형화 되었다.

수렴 한계는 0.3 % 로 지정되었다. 계산 시간은 평범한 개인용 컴퓨터를 사용하여도 2 분을 넘지않았다.

**VI. 결론**

본연구는 저장조 군과 회분식 생산공정 군을 가진 다수의 공장들로 구성된 생산 재고 분배 시스템의 최적 용량을 구하는 방법을 매우 일반적인 형태로 다루었다. 어떤 저장조에 있는 물질은 구매되거나, 내부적으로 생산되거나, 내부적으로 소모되거나, 판매되거나, 다른 공장으로부터 수송되어 오거나, 다른 공장으로부터 수송되어 나갈 수 있다. 생산 공정은 저장조에 있는 다수의 물질을 소모하여 다른 다수의 물질을 생산한 뒤 해당되는 저장조로 돌려 보낸다. 본 연구에서는 한 개의 물질 만을 수송하거나, 다수의 물질을 동시에 수송하는 두가지 형태의 수송방법을 고려하였다. 모든 장치운전은 주기적이라고 가정하였다. 평균유속을 비롯한 생산과 수송공정의 가동시작시간과 공정크기가 주요한 설계변수로 선정되었다. 본 연구에서 고려된 경제적 요인은 원료구매비, 준비비, 재고유지비와 자본비용을 포함한다.

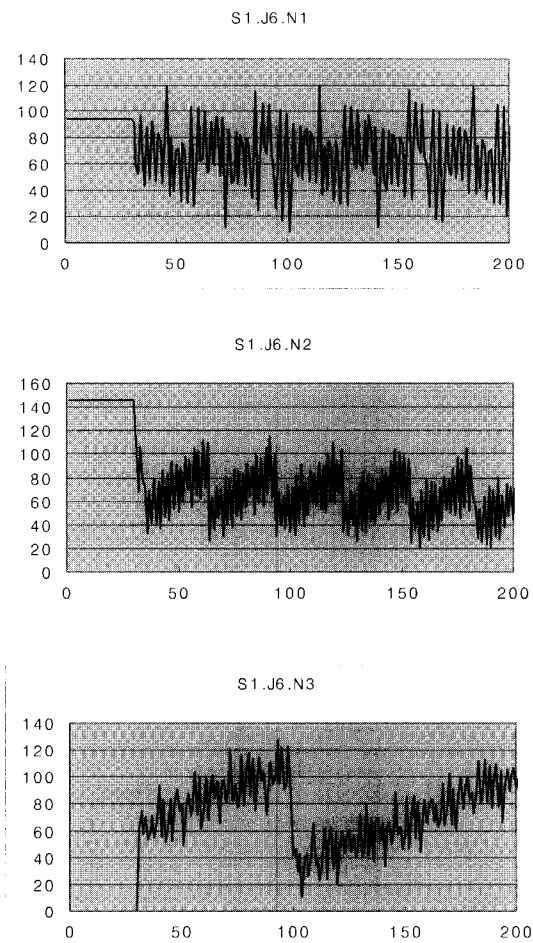


그림 3. 다른 수요 시나리오에 대한 선택된 저장조의 최적 재고상태.

Fig. 3. Optimal inventory profiles of a selected storage for different demand scenarios.

순서 의존적인 준비비나 판매유실 비용은 고려되지 않았다. 최적화 문제에 대한 해석적인 해를 유도한 결과 설계절차는 크게 이단계로 나눌 수 있다. 먼저 분리가능한 오목 최소화 망흐름 문제를 수리계획법으로 풀어서 평균유속을 구한 다음, 최적 공정크기와 주기를 간단한 해석적인 수식으로 계산한다. 평균유속은 기존의 선형 계획법과 같은 다른 방법으로 계산되어질 수 있다. 본 연구에서 다루는 망구조는 매우 일반적이라서 화학공장에서 매우 흔하지만 다루기 어려운 재순환 흐름이 포함된 망구조에 대해서도 연구결과를 적용할 수 있다. 수요예측의 불확실성을 다루기 위하여 시나리오 기법이 적용되었다.

본 연구의 결과는 대형 공급사슬망의 최적설계와 운전 그리고 진단분석에 기여할 것이다. 최적 공정크기를 계산하는 간단한 해석적인 해는 불확실성 하에서 대형 공급사슬망의 생산계획 및 재고관리 체계의 실시간 자가 최적화 시스템을 설계할 수 있는 가능성을 열어 놓았다.

### 참고문헌

- [1] J. D. Camm, T. E. Chorman, F. A. Dill, J. R. Evans, D. J. Sweeney and G. W. Wegryn, Blending OR/MS, Judgement, and GIS: Restructuring P&G's Supply Chain, *INTERFACES*, vol. 27, pp. 128, 1997.
- [2] J. Gjerdrum, N. Shah and L. G. Papageorgiou, "Transfer prices for multienterprise supply chain optimization," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, pp. 1650, 2001.
- [3] A. Gupta, C. D. Maranas and C. M. McDonald, Mid-term Supply Chain Planning under Demand Uncertainty: Customer Demand Satisfaction and Inventory Management, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 24, pp. 2613, 2000.
- [4] C. M. McDonald and I. A. Karimi, Planning and Scheduling of Parallel Semicontinuous Processes. 1. Production Planning, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 36, pp. 2691, 1997.
- [5] L. G. Papageorgiou, G. E. Rotstein and N. Shah, Strategic Supply Chain Optimization for the Pharmaceutical Industries, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, pp. 275, 2001.
- [6] E. Perea-Lopez, I. E. Grossmann and B. E. Ydstie, Dynamic Modeling and Decentralized Control of Supply Chains, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, pp. 2269, 2001.
- [7] J. P. Shectman and N. V. Sahinidis, A Finite Algorithm for Global Minimization of Separable Concave Programs, *Journal of Global Optimization*, vol. 12, pp. 1, 1998.
- [8] P. Tsiakis, N. Shah and C. C. Pantelides, Design of Multiechelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, pp. 3585, 2001.
- [9] G. Yi and G. V. Reklaitis, Optimal Design of Multiple Batch Units with Feedstock/Product Storages, *Chem. Eng. Comm.*, vol. 181, pp. 79, 2000.
- [10] G. Yi and G. V. Reklaitis, Optimal Design of Batch-Storage Network by Using Periodic Square Model, *AIChE J.*, vol. 48, pp. 1737, 2002.
- [11] G. Yi and G. V. Reklaitis, Optimal Design of Batch-Storage Network with Recycle Streams, *AIChE J.*, vol. 49, pp. 3084, 2003.
- [12] T. K. Zierer, W. A. Mitchell and T. R. White, Practical Applications of Linear programming to Shell's Distribution Problems, *INTERFACES*, vol. 6, pp. 13, 1976.
- [13] 이경범, "준비비와 재고비를 고려한 직렬 비연속 공정과 중간 저장조의 최적설계", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제3권, 제4호, pp. 398-405, 8, 1997.
- [14] 이경범, "원료 및 제품 저장조를 포함하는 병렬 비연속 공정의 최적설계", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제3권, 제5호, pp. 532-541, 10, 1997.
- [15] 이경범, 이의수 "회분식 공정-저장조 그물망 구조의 최적설계", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제6호, pp. 802-810, 12, 1998.
- [16] 이경범, 이의수 "비순차 회분식 공정-저장조 망구조 최적설계", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제9권, 제5호, pp. 407-412, 5, 2002.



### 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 부교수. 주요 관심 분야는 화학공장 생산계획 및 물류 최적화, 재고관리, 공정제어 및 최적화 등.



### 이 의 수

1955년 3월 30일생, 1978년에 서울대학교에서 화학공학과 학사, 1980년에 KAIST에서 화학공학과 석사학위를 받았으며 1988년 PURDUE 대학 화학공학과에서 박사학위를 하였다. 1980-1994년 (주)포스코켄 중앙연구소에서 연구실장

으로, 1994년부터 동국대학교 화학공학과 교수로 있음.

주요 관심 분야는 회분식공정 설계 및 합성, 공정 스케줄링 및 최적화, 공정자동화 등이다.



### 이 인 범

1955년 8월25일생, 1977년에 연세대학교에서 화학공학과 학사, 1979년에 KAIST에서 화학공학과 석사학위를 받았으며 1987년 PURDUE 대학 화학공학과에서 박사학위를 하였다. 1979-1982년 KAIST 화공연구부 연구원, 1988년부터 포항공

과대학교 화학공학과/환경공학부 교수로 있으며, 동 학교의 지능자동화 연구센터와 환경연구소 소장 역임.

주요 관심 분야는 화학공정 설계 및 합성, 공정 스케줄링 및 최적화, 공정자동화, 친환경 공정 개발 등이다.