

## 품질검사를 고려한 제품 저장조의 최적 일정계획

이경범<sup>†</sup> · 신동일<sup>\*</sup> · 이호경<sup>\*\*</sup> · 이범석<sup>\*\*\*</sup> · 하진국<sup>\*\*\*\*</sup> · 이의수<sup>\*\*\*\*\*</sup>

부경대학교 공과대학 화학공학부

\*서울대학교 공과대학 응용화학부

\*\*포항공과대학교 화학공학과 지능자동화 연구센터

\*\*\*경희대학교 공과대학 화학공학과

\*\*\*\*동국대학교 공과대학 화학공학과

(2000년 2월 9일 접수, 2000년 11월 10일 채택)

## Optimal Scheduling of Quality Controlled Product Storage

Gyeongbeom Yi<sup>†</sup>, Dongil Sin<sup>\*</sup>, Ho-Kyung Lee<sup>\*\*</sup>, Bom Sock Lee<sup>\*\*\*</sup>, Jin-Kuk Ha<sup>\*\*\*\*</sup> and Euy Soo Lee<sup>\*\*\*\*\*</sup>

*Dept. of Chem. Eng., Pukyong National Univ., Pusan 608-739, Korea*

*\*School of Chem. Eng., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea*

*\*\*Automation Research Center, Dept. of Chem. Eng., POSTECH, Pohang 790-784, Korea*

*\*\*\*Dept. of Chem. Eng., Kyunghee Univ., Yongin 449-701, Korea*

*\*\*\*\*Dept. of Chem. Eng., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea*

(Received 9 February 2000; accepted 10 November 2000)

### 요 약

본 연구는 액상 고분자 공정의 생산계획 최적화에 관한 연구이다. 대표적인 액상 고분자 공정으로서 폴리부텐 공장을 비롯한 일부 합성고무 공장이 이 범주에 속한다. 본 연구의 대상인 고분자 공장은 한 개의 반응기와 12개의 제품 저장조와 두 종류의 포장 장치 및 저장 창고로 이루어져 있다. 총 9개의 제품이 반응기에서 생산되어 제품 저장조에 보관되었다가 드럼으로 포장되어 창고에 저장되었다가 고객에게 출하되거나 제품 저장조에서 isocontainer를 통해 직접 출하된다. 반응기는 block mode로 운전되며, 액체 상태인 제품은 저장조로 이송된다. 두 개의 대용량 생산 제품은 여러 개의 저장조를 차지하며, 대부분 저장조가 지정되어 있으나, 기본적으로 모든 저장조는 모든 제품에 의해 공유될 수 있다. 본 연구의 특징은 어떤 제품이 반응기에서 저장조로 이송된 뒤 3-15일 동안 품질 검사를 실시하며, 이 기간 동안에는 해당 저장조에서 물질의 출입이 금지된다는 점이다. 생산계획의 주 목적은 이처럼 생산시간과 장치 활용률에 큰 영향을 미치는 품질검사 횟수를 최소화하는 것이다. 본 연구대상 공장에 대해서 혼합 정수 선형 계획법을 적용하여 최적화 모형을 개발하였다. 총 이진 변수가 1,500-2,000 개에 달하였으며, 수렴성을 높이기 위하여 생산계획의 수작업 과정을 분석하여 분지변수의 우선 순위를 정하였다.

**Abstract** – The mixed integer linear programming model has been developed for the production scheduling of liquid state polymer process such as a Polybutene(PB). The example process is composed of one reactor, twelve storage tanks and two package types. The reactor produces 9 liquid state products. The products are reserved in tanks and then, packaged into drum or isocontainer. The drum products are stored in a warehouse before they are shipped out to customers but the isocontainer products are shipped directly out to customers. Two major products use multiple tanks. Most tanks are dedicated to a certain product but basically any tank can be shared by any product. The reactor is operated on block mode. The unique characteristic of this scheduling problem exists on the fact that the product in a tank should be locked for 3-15 days in order to check the quality specifications after run-down from the reactor. The primary objective of scheduling is reducing the number of quality checking processes because it causes great loss in production time and tank utilization. The model is composed of about 1,500-2000 integer variables. The branching priorities are adjusted according to the importance of variables based on current manual scheduling practice and it greatly enhanced the convergence of the mixed integer model.

Key words: Optimal Scheduling Quality Storage Block

<sup>†</sup>E-mail: gbyi@pknu.ac.kr

## 1. 서 론

본 연구의 연구대상은 반응기에서 생산된 다수의 제품에 대하여 장기간 품질 규격을 분석해야 하는 다수의 제품 저장조와 저장조에 저장된 액체 상태의 제품을 여러 가지 포장용기에 충전하여 수요자의 수요량에 맞추어 출하하는 공장의 생산계획 최적화 문제이다. 상당수의 합성 고무 공정이 이러한 구조로 되어 있으며, Polybutene(PB) 공정을 대표적인 예로 들 수 있다. 제품 저장조의 운전은 철저히 품질관리 위주로 운용되기 때문에 어떤 저장조에 공정으로부터 생산된 물질이 입고되는 동안에는 출고할 수 없고 입고가 끝나면 즉시 품질을 측정하기 위한 시험분석에 들어가며 이 기간은 제품에 따라 3일에서 15일 정도 소요된다. 이 기간 동안에는 저장조의 물질 이동이 통제된다. 시험분석이 끝나고 품질에 이상이 없으면 제품을 출고할 수 있다. 수요량이 많은 제품은 여러 개의 저장조를 전용으로 점유하여 사용하고 수요량이 극히 적은 제품들은 한 개의 저장조에 대해서 여러 제품이 공유한다. 물론 모든 제품들은 액체 상태에서 저장조는 한 가지 제품만 보유할 수 있고 다른 제품을 보관하기 위해서는 기존 제품의 재고를 비워야 한다. 저장조의 용량과 개수는 제한되어 있다. 가장 중요한 결정변수는 공정에서 생산된 제품을 어느 저장조로 할당할 것인가 하는 점이다. 이 할당이 잘못될 경우 기존 저장조에 이미 제품들이 차지하고 있어서 현재 공정에서 생산된 제품을 보관할 저장조가 없어지는 운전사고가 발생할 수 있다. 생산공정과 시험분석에 소요되는 시간 지연이 크기 때문에 고객의 단기적인 수요변화에 부응하여 생산하기가 쉽지 않다. 고객의 수요를 맞추지 못하여 발생하는 판매유실을 막기 위해서는 포장된 제품의 재고를 늘여야 하는데 이는 재고 비용의 증가를 초래하고 장기 재고로 인한 품질 저하를 초래하며 정밀화학 제품을 생산하는 공장의 경우 일반적으로 재고 공간이 제한되어 있다. 이러한 생산계획문제에 대한 최적화모형을 개발하는 것이 이 연구의 목표이다.

산업현장에서 매우 현실적인 문제임에도 불구하고 이러한 사안에 대한 직접적인 학술적인 연구를 화학공학문헌에서 발견하기는 의외로 쉽지 않다. 서로 다른 공정들 간의 물질흐름의 불균형을 완충해 주는 저장조의 본질적인 기능에 대한 학술적인 연구는 참고문헌[1-11]에서 나타난 바와 같이 최근 회분식 공정에 관한 연구의 발전과 더불어 활발히 전개되고 있다. 지금까지 연구되어진 저장조의 운전유형을 분류해 보면 장치들 사이에 충분한 용량의 저장조를 두는 UIS(Unlimited Intermediate Storage) 방안, 전혀 중간 저장조를 설치하지 않은 NIS(No Intermediate Storage) 방안, 유한한 용량의 저장조를 설치하는 FIS(Finite Intermediate Storage) 방안, 여러 가지 중간 저장조 방안을 사용하는 MIS(Mixed Intermediate Storage) 방안, 하나의 중간 저장조를 여러 개의 장치들이 공통으로 사용하는 CIS(Common Intermediate Storage) 방안, 그리고 저장조에 보관하여 대기할 경우 품질저하를 유발하는 화학제품을 위한 ZW(Zero Wait) 방안 등이 있다. 본 연구에서는 실제 화학 산업계에 존재하지만 위의 어떤 유형에도 속하지 않는 제품 저장조 운영방안으로서 QCPS(Quality Controlled Product Storage) 방안을 제시하고자 한다. 즉 QCPS는 저장조가 재고 보관과 출하의 기능 뿐만 아니라 품질관리의 기능을 겸하는 경우이다.

## 2. 공정설명

본 연구는 대표적인 액상 고분자 공정인 폴리부텐 공정을 대상으로 개발되었다. 폴리부텐은 이소부틸렌을 단량체로 하는 저온 촉매 중합반응에 의한 다양한 저분자량의 액상 고분자이다. C4 잔사유를 원료로 하며, 접착제, 코킹 및 실링 배합재료, 필름 첨가제, 전기 절연제, 분산제, 고무 첨가제, 아스팔트 개질제, 피혁 함침유, 식품 첨가제 등에 사용된다. 제조 공정은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 한 개의 반응기와 12개의 저

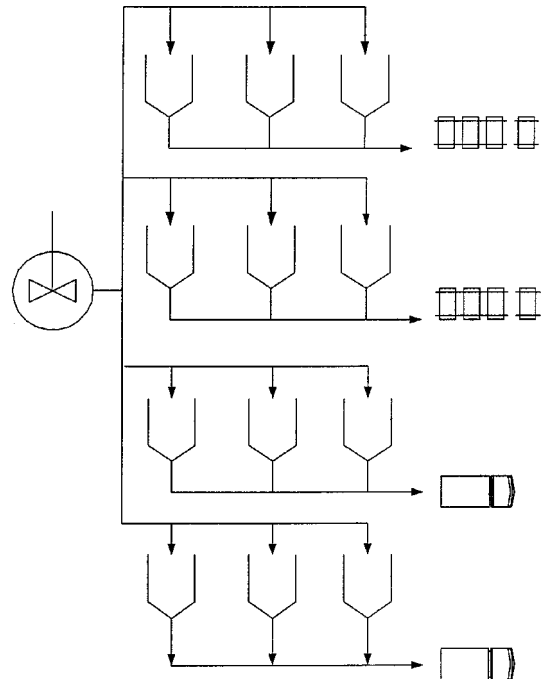


Fig. 1. Polybutene plant block diagram.

장조로 구성되어 있다. 총 9개의 최종 제품을 생산하며, 각 최종 제품은 소량인 경우 드럼에 담겨서 창고에 저장되었다가 출하되거나 대용량 고객이나 수출품에 대해서는 isocontainer에 실려 바로 출하된다. 본 공정의 주원료는 상부 공정에서 생산되어 원료 저장조에 저장되었다가 공급되며 생산계획상의 문제를 야기하지 않는다. 반응기는 연속적으로 운전되지만 생산제품이 바뀌는 블록운전을 하며, 최대/최소 생산속도의 제약이 있다. 생산속도가 증가할수록 반응기의 운전비는 지수적으로 증가한다. 반응기에서 생산제품을 바꿀 때 급격한 물성의 변화가 허용되지 않기 때문에 생산 순서상 서로 이웃할 수 없는 제품들이 있다. 반응기에서 생산된 제품은 저장조로 이동되어 품질검사를 받아야 한다. 원칙적으로 어떤 저장조에 어떤 제품을 반드시 저장해야 할 이유는 없다. 그러나 보통 판매량이 많은 제품이 큰 저장조를 차지하게 되고 판매량이 아주 많은 주종제품들은 다수의 저장조를 점유하게 된다. 대부분의 저장조는 한 개의 제품에 의해 전용되어 있다. 그러나 한 저장조에 대해서 두 개 이상의 제품을 동시에 저장할 수는 없지만 일부 저장조는 생산계획 기간 내에 두 개의 제품이 번갈아 저장되기도 한다. 어떤 저장조에 제품이 입고되면 곧바로 품질검사에 들어가는 데 이 분석기간이 보통 3일에서 수출품의 경우 15일이 걸린다. 이 기간동안 탱크에는 제품의 출고나 입고가 이루어 질 수 없다. 따라서 각 저장조에는 제품의 입고, 분석, 출고가 번갈아 되풀이 된다. 반응기를 포함하여 각 저장조 간의 물질 이송에 걸리는 시간은 무시된다. 드럼 생산 및 출하는 주종에만 이루어 진다. 만약 주말이나 공휴일에 작업을 해야 하면 추가 임금이 지급되어야 한다. 드럼의 총 생산량은 제약이 있고, 드럼 기계의 특성상 하루에 두 가지 이상의 다른 제품을 생산할 수 없다. 드럼으로 포장된 제품은 창고에서 최소 2일간 보관된 후 출하해야 하며, 창고의 크기는 제한되어 있다.

## 3. 최적화 모형

본 연구 대상인 폴리부텐 공장의 생산계획 작업은 일반적으로 목적함수를 구성할 수 있는 경제성 분석이 무의미하고 공정 운영상의 제약 조건이 매우 많다는 특징을 가지고 있다. 생산계획의 목적함수는 판매이

익에서 제비용을 제한 순이익을 최대화하거나 원료 구매비용, 판매유실 비용, 운전비용, 재고 유지비용 등의 제비용의 합을 최소화하는 것으로 설정하는 것이 보통이다. 그러나 본 공장경의 경우 이러한 비용의 산정이 현실적으로 불가능하거나 무의미하다. 먼저 판매이익과 원료 구매비용은 예측된 수요량을 모두 공급한다고 가정하는 한 고정적이다. 판매 유실이나 휴일 잔업은 관리지침에 의해 계산에 고려되지 않는다. 재고 유지비용은 전체적인 저장시설의 용량이 제한되어 있고 상대적으로 저렴하므로 무시해도 된다. 운전비용 항목 중에서 생산 계획상 고려대상이 되는 것은 반응기의 가동률이 증대될수록 비용이 지속적으로 증가하므로 가동률을 일정하게 유지하는 것과 품질분석에 많은 시간과 비용이 소모되므로 가능한 품질분석의 횟수를 줄이는 것이다. 이중 반응기 가동률에 따른 비용발생은 정량화가 가능하나 품질분석 비용은 정량화 할 수 없다. 이처럼 상대적으로 크다고 판단되지만 정량화가 불가능한 비용항목이 존재할 경우 순이익의 최대화 또는 총 비용 최소화라는 일반적인 생산계획의 목적함수는 적용하기가 불가능하다. 목적함수가 담당해야 할 이러한 기능들은 모두 제약식으로 전가된다. 반응기의 가동률은 거의 일정하도록 제약식이 부가되며, 저장조의 운전 전에 관한 제약은 품질분석 횟수를 줄이는데 초점이 잡혀 있다. 판매유실도 발생할 수 없는 상황에서 과다한 운전제약에 의해 모든 제약식을 만족하는 해의 존재가 불가능하게 된다. 따라서 본 최적화 모형의 목적함수는 이러한 해의 불가능성을 최소화하는 것이다. 불가능성과 관련된 제약식의 상대적 비중은 사용자에게 의해 정해져야 한다.

생산 일정 계획의 수립은 한달 단위로 이루어지며, 최소 일일단위의 물량이동에 대한 계산결과가 나와야 한다. 실제 반응기의 생산계획은 더욱 세밀한 시간에 대한 고려가 요구되나 일일 단위의 반응기 운전계획이 결정되면 상세한 운전계획은 2 차적으로 계산될 수 있다. 생산계획이 한달 단위로 계산되고 갱신되는 이유는 회사의 관리 체제상 한달 단위로 회계처리를 하고 있고, 무엇보다도 생산계획을 수립하는 주요한 입력 자료인 수요예측 자료가 한달 단위로 갱신되기 때문이다. 일반적으로 고분자 공정의 생산 일정계획 모형은 block mode 운전을 하는 반응기 운전 특성을 표현하기 위하여 연속 시간대(continuous-time) 구조를 사용한다(Karimi and McDonald[6]). 그러나 본 연구에서는 반응기 보다는 저장조의 운전이 더 중요하며 연속 시간대 모형을 저장조 운전 에 적용할 경우 계산량이 과다하게 증대하므로 제약식은 전체적으로 이산시간대(mluti-period) 구조를 사용하고 있다. 제약식들은 각 장치에 대한 물질의 출입과 장치의 용량을 나타내는 식과 장치의 선정, 작업 순서, 운전상의 물리적인 제약을 담고 있다. 각 제약식에 대한 설명은 원료부터 제품까지 물질의 흐름을 따라 설명할 것이다.

문제구성을 위한 기본적 원소는 다음 4가지로 분류된다.

- i: 반응기 생산 제품목록
- p: 포장 완제품 목록
- k: 저장조 목록
- t: 일자 목록

제품 i가 반응기에서 저장조 k로 유입되는 t 일자의 물량을  $FQ_{ikt}$ 과 두고 이진수  $YFQ_{ikt}$ 를  $FQ_{ikt}$ 가 양수이면 1, 0이면 0이라고 정의한다. 그리고 반응기에서 제품 i가 일자 t에 생산되면 이진수  $Y_{it}$ 가 1, 그렇지 않으면 0으로 정의한다. 그러면 이진수  $FQ_{ikt}$ 와  $Y_{it}$  사이에는 다음 관계식이 성립한다.

$$Y_{it} = \sum_k YFQ_{ikt} \quad (1)$$

그리고 반응기에서 제품 i의 전후에 연이어 생산할 수 없는 제품들의 집합을  $NTC(i, i')$ 라고 할 때

$$Y_{it} + Y_{it'} \leq 1 \quad (i, i') \in NTC(i, i') \quad (2)$$

반응기는 일일 최대/최소 생산량의 제약이 있다. 그러나 부득이한 경우 이러한 조건은 완화될 수 있다.

$$RXMAX + \alpha \geq \sum_t \sum_k FQ_{ikt} \geq RXMIN - \beta \quad (3)$$

여기서 양수  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 제약식의 불가해성(infeasibility)을 나타내며, 목적 함수에서 최소화 된다.

일자 t의 24:00 시점에 제품 i가 저장조 k에 저장된 물량을  $FI_{ikt}$ 라 두고 이진수  $YFI_{ikt}$ 를  $FI_{ikt}$ 가 양수이면 1, 0이면 0이라고 정의한다. 그리고 제품 i가 저장조 k에서 포장을 위해 출고되는 t 일자의 물량을  $FH_{ikt}$ 라 두고 이진수  $YFH_{ikt}$ 를  $FH_{ikt}$ 가 양수이면 1, 0이면 0이라고 정의한다. 어떤 저장조 k의 금일 재고량은 전날 재고량에서 금일 입고량을 더하고 금일 출고량을 뺀 것과 같다. 이를 수식으로 표현하면;

$$FI_{ikt} = FI_{ikt-1} + FQ_{ikt} - FH_{ikt} \quad (4)$$

이진수를 정의하는 수식들은 다음과 같다.

$$FQ_{ikt} \leq TKMX_{ik} * YFQ_{ikt} \quad (5)$$

$$FI_{ikt} \leq TKMX_{ik} * YFI_{ikt} \quad (6)$$

$$FH_{ikt} \leq TKMX_{ik} * YFH_{ikt} \quad (7)$$

여기서  $TKMX_{ik}$ 는 제품 i가 저장조 k에 저장될 때의 최대 저장량이다.

복잡한 저장조 운전을 표현하기 위해 생산활동 중첩(production spillover)을 나타내는 새로운 이진수  $YS_{ikt}$ 를 도입한다.  $YS_{ikt}$ 는 만약 제품 i가 저장조 k에서 일자 t와 일자 t+1에 연속 입고될 경우 1이고 그렇지 않으면 0이 된다. 이것을 수식으로 표현하면;

$$YS_{ikt} \leq YFQ_{ikt} \quad (8)$$

$$YS_{ikt} \leq YFQ_{ikt+1} \quad (9)$$

$$YS_{ikt} \geq YFQ_{ikt} + YFQ_{ikt+1} - 1 \quad (10)$$

반응기로부터 제품의 입고가 끝나자마자 저장조의 재고량에 대해 품질 분석을 실시하며 이 기간 동안에는 새로운 제품의 입고나 출고가 금지된다. 이러한 물리적 제약은 다음과 같이 표현된다.

$$YFQ_{ikt'} + YFQ_{ikt} \leq 1 + YS_{ikt} \quad t < t' < t + LAG(i) \quad (11)$$

$$YFH_{ikt'} + YFQ_{ikt} \leq 1 \quad t \leq t' < t + LAG(i) \quad (12)$$

여기서  $LAG(i)$ 는 제품 i가 품질분석에 소요되는 기간이다.

품질분석의 횟수를 줄이기 위해서는 가능한 어떤 저장조가 가득 채워질 때까지 생산을 계속하며 품질 분석을 실시한 저장조는 거의 다 비율 때까지 새로 입고하는 일이 없어야 한다. 다시 말하면 제품의 입고가 끝나는 순간 그 저장조의 재고량은 저장조 최대 크기의 80%를 상회해야 하고, 제품의 입고가 시작되는 순간 그 저장조의 재고량은 저장조 바닥 잔여물량보다 작아야 한다. 이러한 경험적인 운전 규칙은 특별한 사유가 없는 한 준수되어야 한다. 이들을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$FI_{ikt} + \delta \geq 0.8 * TKMX_{ik} * (YFQ_{ikt} - YS_{ikt}) \quad (13)$$

$$FI_{ikt} - \gamma \leq TKMN_{ik} + TKMX_{ik} * (1 - YFQ_{ikt+1} + YS_{ikt}) \quad (14)$$

여기서  $\delta$ ,  $\gamma$ 는 제약식의 불가해성을 나타내며 목적함수를 통하여 최소화 된다.

한 개의 저장조에 두 가지 이상의 제품이 동시에 저장될 수는 없다. 이러한 물리적 제약은 다음식으로 표현된다.

$$\sum_i YFI_{ikt} \leq 1 \quad (15)$$

저장조로부터 제품의 출고는 두 가지 형태로 이루어 진다. 하나는 드럼으로 포장되어 창고에 보관되는 것이고, 다른 하나는 저장조로부터 isocontainer로 포장되어 수송차량을 통해 고객에게 바로 출하되는 것이다. 일자  $t$ 에 대해서 창고에 포장 제품  $p$ 가 입고되는 물량을  $PQ_{pt}$ 라고 하고 포장 제품에 대한 고객의 수요 예측량을  $D_{pt}$ 라고 할 때 드럼 제품의 경우 해당 제품이 담겨 있는 저장조에서 출고된 물량은 창고에 입고된 물량과 일치할 것이며, isocontainer의 경우 해당 제품이 담겨 있는 저장조에서 출고된 물량은 고객의 수요 예측량과 일치해야 한다. 고객의 주문미달은 원칙적으로 허용되지 않지만 생산 계획상 근본적으로 불가능한 경우가 있다. 이를 반영하기 위하여 주문미달량  $BL_{pt}$ 을 도입한다. 주문미달은 가장 최소화되어야 할 변수로서 목적함수에 추가될 것이다.

$$\sum_k FH_{ikt} = PQ_{pt} + LAG(p) \quad (i, p) \in PACK(i, p) \quad (16)$$

$$i \in DRUM(i)$$

$$BL_{pt} = BL_{pt-1} + D_{pt} - \sum_k FH_{ikt} \quad (i, p) \in PACK(i, p) \quad (17)$$

$$i \in ISOCON(i)$$

여기서  $PACK(i, p)$ 는 반응기 생산 제품과 포장 제품과의 연결을 나타내고,  $DRUM(i)$ 는 드럼 포장을 하는 제품의 목록을 나타내며,  $ISOCON(i)$ 는 isocontainer로 포장하는 제품 목록을 나타낸다. 그리고  $LAG(p)$ 는 포장을 한 뒤 제품의 안정화를 위해 출하를 금하는 일자에 해당한다.

드럼 포장은 작업자의 노동력에 의존하므로 일자별로 용량계약이 있다. 즉 휴일에는 작업이 이루어 지지 않는다.

$$\sum_{i \in DRUM(i)} \sum_k FH_{ikt} \leq CAP_t + \lambda \quad (18)$$

여기서  $\lambda$ 는 제약식의 불가해성을 나타내는 것으로 목적함수를 통해서 최소화 된다. 그리고  $CAP_t$ 는 일자별 최대 포장 용량을 나타낸다.

드럼 포장은 제품이 바뀌면 새로운 작업 준비에 시간이 소모되므로 하루에 두 가지 이하의 제품만 포장할 수 있다. 이러한 제약은 어떤 제품이 저장조로부터 출고 유무를 나타내는 새로운 이진수  $YHF_{it}$ 를 도입하여 다음 식으로 표현된다.

$$YHF_{it} \leq \sum_k YFH_{ikt} \quad (19)$$

$$YHF_{it} \geq 0.1 * \sum_k YFH_{ikt} \quad (20)$$

$$\sum_{i \in DRUM(i)} YFH_{it} \leq 2 \quad (21)$$

창고에서 출하되는 물량을  $SH_{pt}$ 라고 할 때 창고에 저장된 드럼 제품의 재고량은 다음 식으로 계산된다.

$$PI_{pt} = PI_{pt-1} + PQ_{pt} - SH_{pt} \quad p \in DRUM(p) \quad (22)$$

드럼 제품에 대해서도 주문 미달은 허용되지 않지만 실제로 발생하므로 다음 식이 추가된다.

$$BL_{pt} = BL_{pt-1} + D_{pt} - SH_{pt} \quad p \in DRUM(p) \quad (23)$$

$$\sum_{t' \leq t} SH_{pt'} \leq \sum_{t' \leq t} D_{pt'} \quad (24)$$

창고에 저장되는 드럼 제품의 총량은 창고의 총 저장 용량  $MXWHS$ 에 제약을 받는다.

$$\sum_{p \in DRUM(p)} PI_{pt} \leq MXWHS \quad (25)$$

본 최적화 모형의 목적함수는 특정 제약식의 불가해성의 합을 최소화

하는 것이다.

$$\text{MIN } w_\alpha \alpha + w_\beta \beta + w_\delta \delta + w_\gamma \gamma + w_\lambda \lambda + w_{BL} \sum_{p,t} BL_{pt}$$

여기서  $w_\alpha, \dots, w_{BL}$ 는 각 불가해성에 대한 가중치로서 사용자에게 의해 결정된다.

#### 4. 적용 예제와 논의

본 연구의 최적화 모형은 GAMS/OSL와 Pentium III(500 MHz)을 사용하여 개발되었다. 입력자료는 실제 폴리부텐 공장에서 조업자료를 바탕으로 4 차례 수집되었으며, 각각의 경우 개발된 모형의 통계적 자료는 Table 1에 요약되어 있다. Table 1에 나타난 것처럼 모형의 난이도를 대표하는 이진변수의 개수가 1,500-2,000으로서 계산 시간도 30 분에서 1 시간에 달하는 대형 혼합 정수 계획법 모형이다. 첫째 계산 결과는 변수의 개수는 훨씬 많지만 계산 시간은 매우 짧은 예외적인 경우인데 이것은 가동중지(shut-down)를 포함하고 있기 때문이다. 본 모형에서 가동중지는 또 다른 생산 제품의 하나로 특별히 취급된다. 둘째 시험계산은 모든 저장조에 한 개의 제품만 할당되었고, 셋째 시험계산은 두 개의 저장조가 2개의 제품에 의해 공유되었으며, 넷째 시험계산은 한 개의 저장조가 두 개의 제품에 의해 공유되었다. 이를 이진변수의 개수와 결부해 비교해 볼 때 문제의 크기를 결정하는 가장 큰 요인은 두 개 이상의 제품이 공유하는 저장조(swing tank)의 개수인 것을 알 수 있다. 즉 공유 저장조가 하나 늘어날수록 이진변수가 약 10%씩 늘어난다. 공유 저장조가 3개 이상일 경우 현실적으로 최적화 모형은 풀기 어렵다. 다행히도 생산계획 고려 기간인 1 달 이내에 두 개 이상의 저장조를 공유해야 하는 상황은 매우 이례적이고 대부분의 경우 각 저장조에 생산계획 기간인 1 달 동안에는 한 개의 제품만 미리 지정되어 있다고 가정하여도 무리가 없다. 각 저장조에 미리 제품을 지정함에도 불구하고 본 최적화 문제는 이진 변수가 1,500 개 이상인 대형 혼합정수계획법으로서 보통 방법으로는 수렴이 불가능하였다. 분지 한계법(branch and bound)에서 분지의 우선순위(branching priority)를 조절하면 쉽게 수렴할 수도 있다는 사실은 잘 알려져 있지만 실제로 적절한 분지의 우선순위를 발견하는 일은 쉽지 않다. 우리는 적절한 우선 순위를 구하기 위하여 생산계획의 수작업 절차와 유사한 순서로 각 절차에 관련된 이진 변수에 순서를 부여하였다. 이러한 분석 작업에 의한 이진 변수의 분지 우선 순위는 다음과 같다.

(1) 주종 제품과 관련된 이진 변수는 비 주종 제품과 관련된 이진 변수에 비해 높은 우선 순위를 준다. 여기서 주종 제품이란 생산 물량이 상대적으로 많거나 포장용기가 isocontainer인 제품처럼 생산계획의 수립에 결정적인 영향을 미치는 제품을 의미한다.

(2) 허부공정 즉 고객의 수요에 가까운 변수에 대한 우선 순위가 상부 공정 또는 원료구매에 가까운 변수에 대한 우선순위보다 높다.

(3) 시간의 경과에 따라 변수의 우선 순위가 낮아진다.

위의 가설에 의한 이진 변수의 우선 순위를 적용한 결과 안정된 수렴

Table 1. Model statistics of test runs

Test run no.	Number of equations	Number of variables	Number of binary variables	CPU time (sec)
1	17880	7856	2202	432
2	13280	5009	1526	2932
3	12416	5848	1999	5465
4	12130	5451	1725	4322

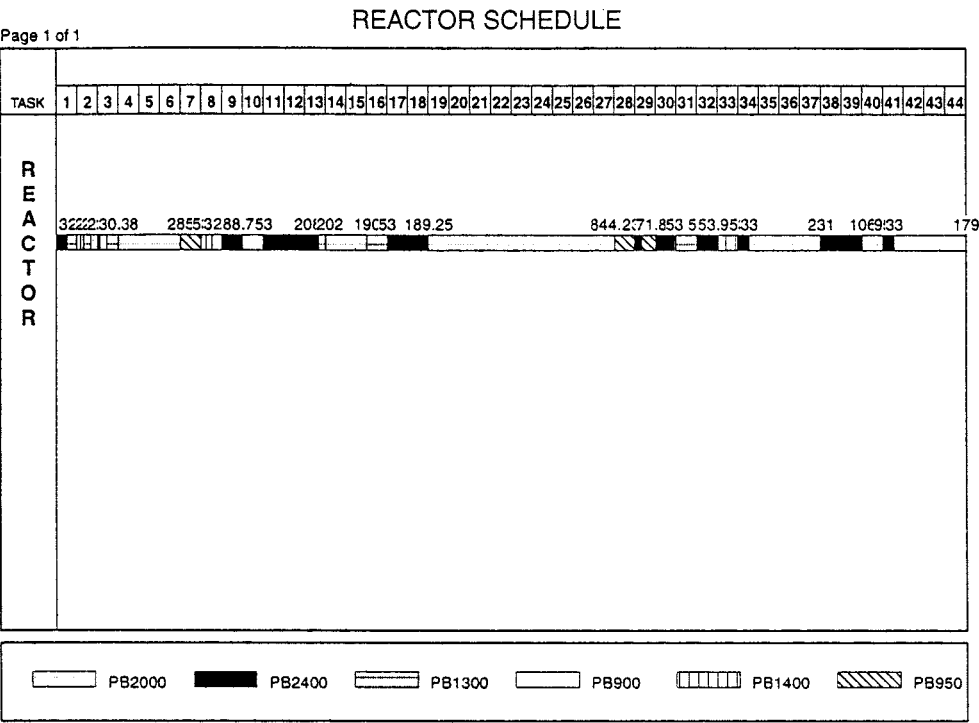


Fig. 2. Reactor schedule.

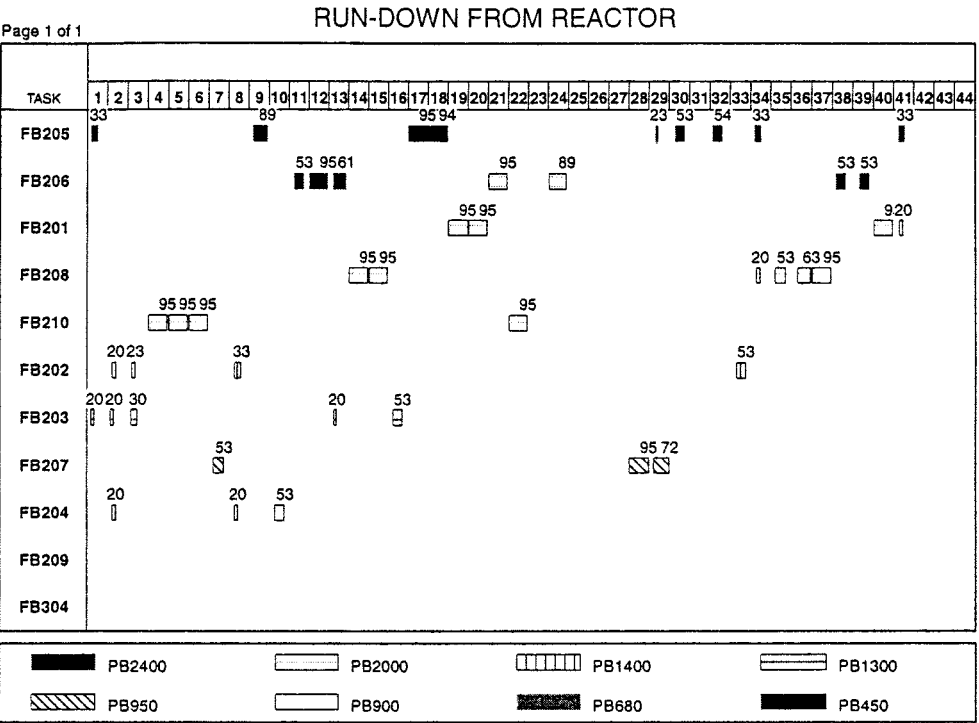


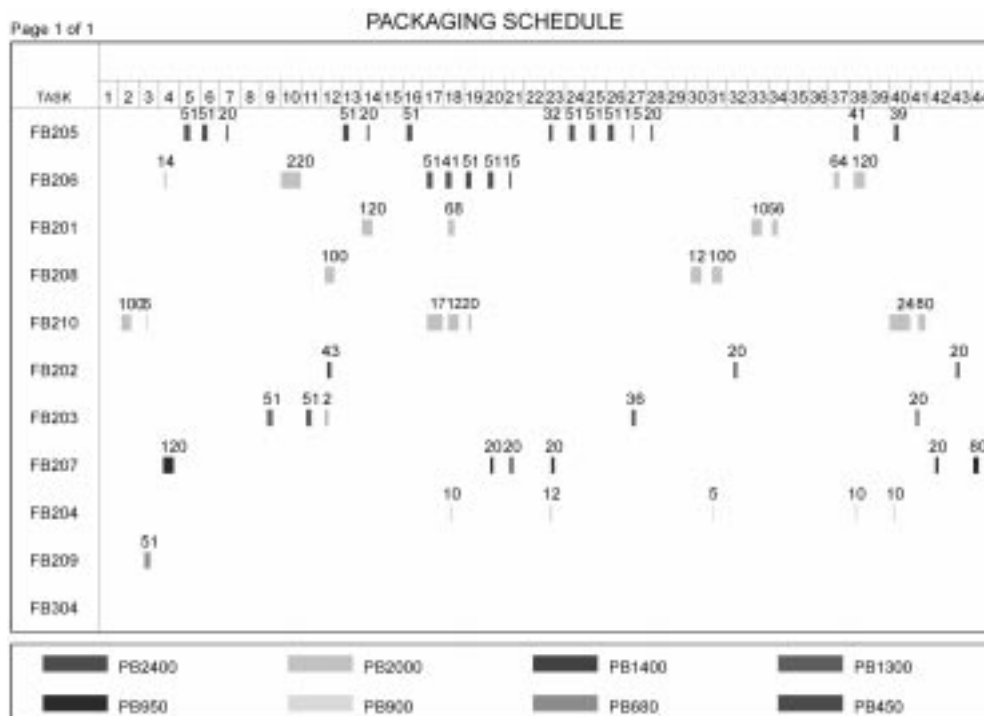
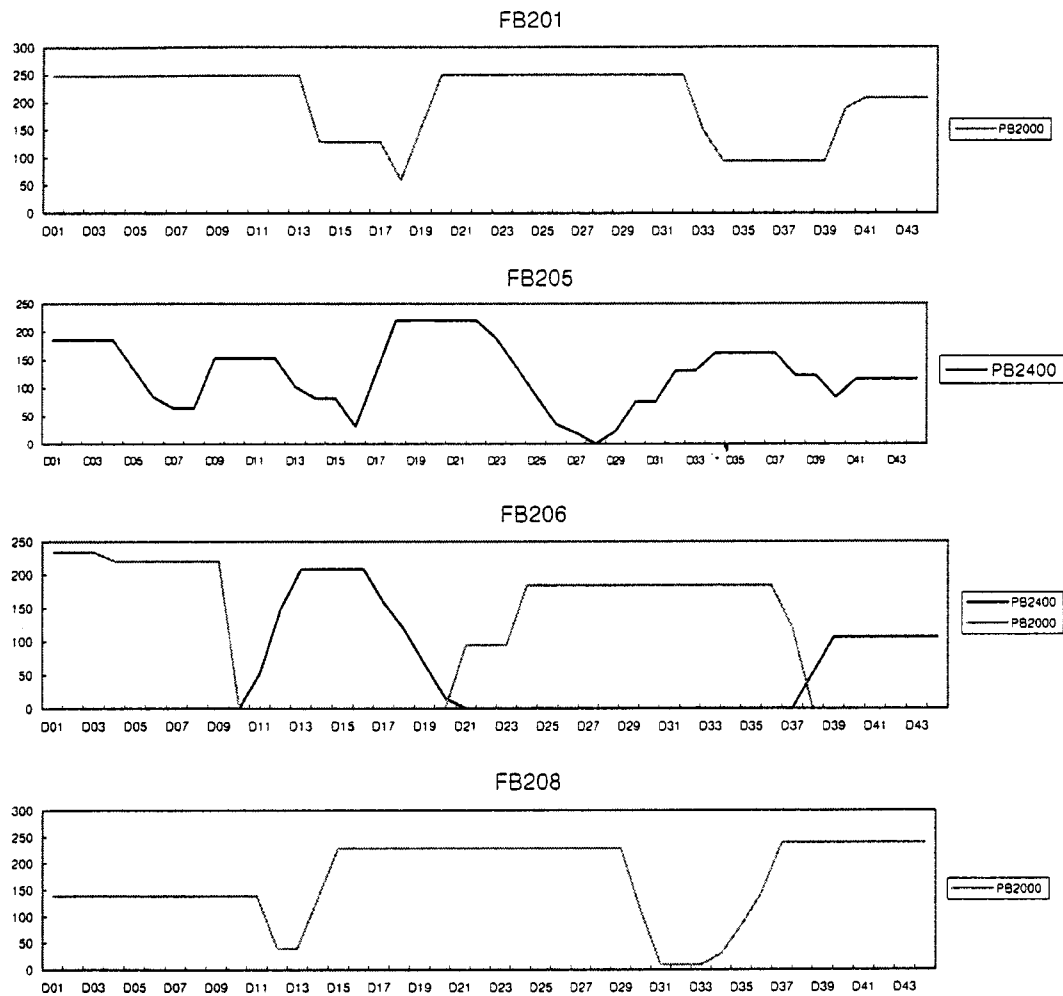
Fig. 3. Reactor run-down schedule.

성을 얻을 수 있었다. 이외에도 GAMS/OSL이 제공하는 몇 가지 선택 사양을 잘 조절함으로써 계산시간을 줄일 수 있었다. 그러나 모형의 수렴성을 좌우하는 중요한 요인은 변수의 개수나 알고리즘의 변화보다는 최적화 모형의 수학적 구조라는 것이 저자들의 경험적 결론이다.

4번째 시험 계산의 결과인 반응기 생산 일정, 탱크의 입고 및 출고, 탱크의 재고 변동, 저장 창고의 입고 및 출고, 저장 창고의 재고 변동에 대한 Gantt Chart 및 재고 그림표가 Fig. 2-7에 나타나 있다.

## 5. 결 론

액상 고분자 공정의 생산 일정 계획 최적화 모형이 개발되었다. 액상 고분자 공정은 분말 또는 입자 상태의 다른 고분자 공정과는 달리 제품 저장조의 운영이 매우 복잡하여 생산계획에 큰 영향을 미친다. 이러한 특성은 액체 상태로 생산되며, 품질 분석에 장시간이 소요되는 화학 제품에 공통적으로 나타난다. 예를 들어 정유 공장의 가솔린, 등유, 경유



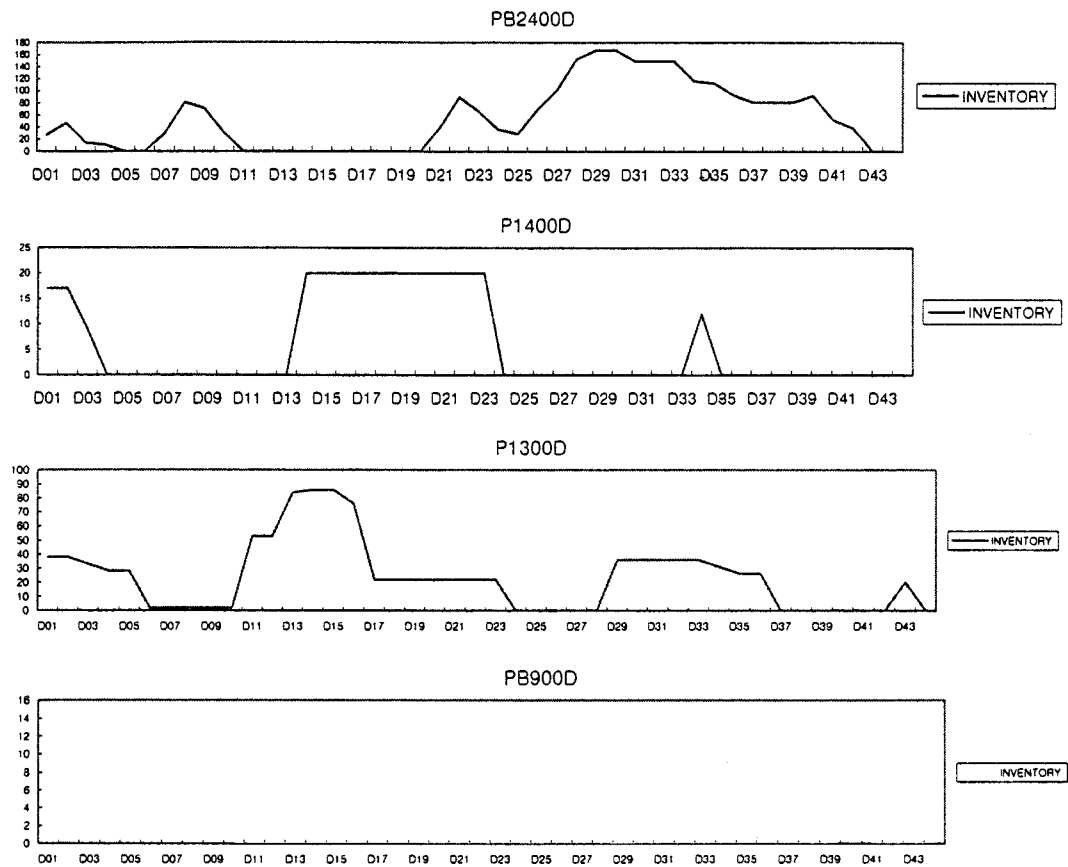


Fig. 6. Warehouse inventory profile.

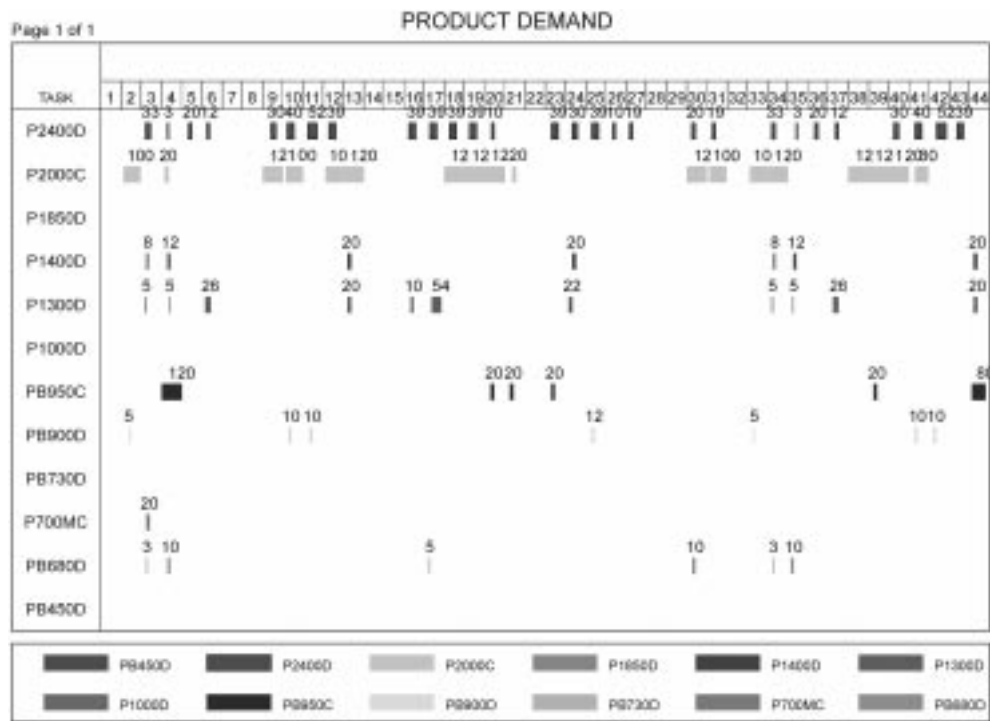


Fig. 7. Product demand.

등의 연료유 배합 생산이나 윤활유 제품의 배합 생산에서도 제품 저장조는 재고 물량을 보관하는 역할과 배합 생산 및 품질 분석을 위한 공정

정의 역할을 겸하고 있다. 분말 또는 입자 상태로 생산되는 고분자 공

으로 생산계획의 목적함수의 구성요소를 이루는 운전비용, 재고 유지비용, 판매 유실비용 등의 제 비용 항목은 입력 자료의 불확실성으로 인해 정확한 산정이 불가능하거나 공장 운영 방식상 직접적으로 고려할 필요가 없었다. 그대신 공장 운영상 큰 비용 발생의 요인으로 지목되는 반응기 가동률의 변동과 품질 분석 횟수를 줄이기 위한 엄격한 제약식을 설정한 다음 이러한 제약식을 만족시키지 못하는 불가해성의 정도를 목적함수로 설정하여 최소화하도록 했다. 즉 이중 가장 중요한 사항은 품질분석 횟수를 줄이고자 하는 목적으로서 목적함수는 이를 간접적으로 표현하고 있다. 제약식들은 반응기의 최대/최소 가동률, 반응기 생산 순서, 저장조 선택, 저장조 운영상의 물리적인 제약, 배합제품 생산, 저장조 용량 제약, 포장시설 제약과 저장조 및 창고의 재고 균형식 등을 포함하고 있다.

실제 폴리부텐 공장의 구조를 바탕으로 최적화 모형을 구성한 결과 이진변수가 1,500-2,000개에 달하는 대형 혼합정수 계획법 모형이 수립되었다. 모형의 수렴성을 개선하기 위해 분지 우선 순위를 결정하는 특별한 방법을 적용하였다. 실제 조업 자료로부터 입력자료를 준비하여 4차례의 시험 계산 결과 생산계획 실무자와 유사한 성능을 보였다. 본 공장의 특성상 생산계획의 목적함수가 불가해성을 최소화하는 것이기 때문에 가시적인 기대효과는 없었지만 생산계획 계산시간이 수작업으로 2 일정도 걸리던 것을 2 시간 이내로 줄일 수 있었다.

## 감 사

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

## 사용기호

i	: index for reactor products
p	: index for packaged products
k	: index for tanks
t	: index for time periods
$BL_{pt}$	: the backlogging quantity of packaged product p at the end of period t
$CAP_t$	: is the drumming capacity of period t
$D_{pt}$	: the customer demand of packaged product p at period t
DRUM(i)	: the subset of reactor products with drum package
$FI_{ikt}$	: the inventory hold-up of product i in tank k at the end of period t
$FH_{ikt}$	: the discharge quantity of product i from tank k at period t
$FQ_{ikt}$	: the quantity of product i moved from reactor into the tank k at t period

ISOCON(i)	: the subset of reactor products with isocontainer
LAG(i)	: is the quality checking period for product i
LAG(p)	: the time delay for drumming
NTC(i, i')	: the set of pairs of reactor products that can not be produced in sequence
PACK(i, p)	: the connection between reactor product and package product
$PQ_{pt}$	: the drumming quantity of packaged product p at period t
RXMAX	: maximum daily production rate of reactor
RXMIN	: minimum daily production rate of reactor
$SH_{pt}$	: the shipping quantity of packaged product p at period t
$TKMX_{ik}$	: the maximum storage size of tank k for product i
$w_{\delta}, \dots, w_{BL}$	: the weighting factors for infeasibility of relevant constraints
$Y_{it}$	: is set to 1 if product i is produced in reactor at t period, otherwise 0
$YFI_{ikt}$	: is set to 1 if $FI_{ikt}$ is positive, otherwise 0
$YFH_{ikt}$	: $YFH_{ikt}$ is set to 1 if $FH_{ikt}$ is positive, otherwise 0
$YFQ_{ikt}$	: is set to 1 if $FQ_{ikt}$ is positive, otherwise 0
$YS_{ikt}$	: is set to 1 if product i is continuously fed from reactor to tank k at period t and period t+1, otherwise it is set to 0
$YHF_{it}$	: is set to 1 if product i is packaged into drum at period t, otherwise 0
$\delta, \gamma$	: the infeasibility of the relevant constraints

## 참고문헌

1. Cho, I., Lee, B., Lee, I. and Lee, E. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 601 (1998).
2. Ha, J. K., Lee, B. S., Lee, I. and Lee, E. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 813(1998).
3. Bok, J. and Park, S.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 531(1999).
4. Jung, J. H. and Lee, H.: *Computers Chem. Engng*, **20**, 845(1996).
5. Jung, J. H., Lee, H., Yang, D. R. and Lee, I.: *Computers Chem. Engng*, **18**, 537(1994).
6. Karimi, I. A. and McDonald, C. M.: *I&EC Res.*, **36**, 2701(1997).
7. Ku, H. M. and Karimi, I. A.: *Computers Chem. Engng*, **14**, 49(1990).
8. Park, S. and Jung, J. H.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 411(1999).
9. Wiede, W. Jr., Kuriyan, K. and Rekalitis, G. V.: *Computers Chem. Engng*, **11**, 337(1987).
10. Wiede, W. Jr., Kuriyan, K. and Rekalitis, G. V.: *Computers and Chem. Engng*, **11**, 345(1987).
11. Wiede, W. Jr., Kuriyan, K. and Rekalitis, G. V.: *Computers and Chem. Engng*, **11**, 357(1987).