

회분식 공정과 회분식 증류공정을 복합한 순차적 다목적 공정의 최적 운용전략 및 생산일정계획

Optimal Operation Strategy and Production Planning of Sequential Multi-purpose Batch Plants with Batch Distillation Process

하진국, 이의수*
(Jin-Kuk Ha and Euy Soo Lee)

Abstract : Manufacturing technology for the production of high value-added fine chemical products is emphasized and getting more attention as the diversified interests of customers and the demand of high quality products are getting bigger and bigger everyday. Thus, the development of advanced batch processes, which is the preferred and most appropriate way of producing these types of products, and the related technologies are becoming more important. Therefore, high-precision batch distillation is one of the important elements in the successful manufacturing of fine chemicals, and the importance of the process operation strategy with quality assurance cannot be overemphasized. Accordingly, proposing a process structure explanation and operation strategy of such processes including batch processes and batch distillation would be of great value. We investigate optimal operation strategy and production planning of multi-purpose plants consisting of batch processes and batch distillation for the manufacturing of fine chemical products. For the short-term scheduling of a sequential multi-purpose batch plant consisting of batch distillation under MPC and UIS policy, we proposed a MILP model based on a priori time slot allocation. Also, we consider that the waste product of being produced on batch distillation is recycled to the batch distillation unit for the saving of raw materials. The developed methodology will be especially useful for the design and optimal operations of multi-purpose and multiproduct plants that is suitable for fine chemical production.

Keywords : multipurpose, batch distillation, optimization, scheduling, preordering

I. 서론

과거의 화학공정은 대규모 연속식 생산공정으로써의 대량 생산체계를 지향하여 왔으나, 최근 산업은 양적 생산체계에 서 질적 생산체계로 전환되고 있다. 또한 소비 형태나 소비 자의 취향이 매우 다양해지면서 점점 짧은 시간 내에 변동하 는 수요에 대응할 수 있는 다품종, 고부가가치, 소량생산의 회분식 화학공정이 점차 각광을 받기 시작하였다. 이러한 회 분식 조업이 관심의 대상이 됨에 따라 연속 공정에서와는 달 리 회분식 공정에서 일어날 수 있는 여러 가지 문제점들의 연구가 시작되었다[1-5]. 이러한 연구분야에서 화학 공정과 관련된 전산화와 최적화에 관한 가장 중심적인 역할을 하고 있는 것은 최적 생산계획 및 일정계획(optimal production planning and scheduling)과 관련된 분야이다. 일반적으로 계획 을 잡는 목적과 대상 기간의 길이에 따라 생산계획(planning) 과 일정계획(scheduling)으로 구분하게 되며, 생산계획에서는 장기간의 시장 수요와 제품의 가격 등을 고려하여 주어진 기 간 동안의 생산량을 결정하게 되며, 일정계획에서는 생산계 획 단계로부터 주어진 생산량을 만족시키기 위해 각 제품의 생산 순서와 생산 시간을 결정하는 역할을 하게 된다[6-10]. 생산일정계획에는 생산시간을 비롯하여, 장치준비시간, 수송 시간, 청정시간을 고려한 일정계획 및 납기일을 두는 경우 (due date penalties), 납기일을 맞추지 못하였을 때 일어나는 불 이익을 고려하는 경우(tardiness penalties), 선매권이 있는 제품 이 고려되는 경우(preemption) 등의 생산일정계획이 있다[11-

13]. 이런 생산일정계획 문제에서, 정밀 화학제품 생산 공정 에서 나타나는 불연속 공정인 회분식 공정의 생산일정계획 은 연속화학공정 보다 훨씬 복잡한 물류 흐름 구조를 가지게 되어 모형화 하기가 쉽지는 않아 최적 생산 일정 수립문제가 연속식 공정보다는 어려워지게 된다. 회분식 공정의 최적 생 산 일정 수립 문제는 현재 가지고 있는 장치, 인력, 시간, 유틸리티와 같은 자원(resource)을 가장 효율적으로 운영함으로 써 주어진 시간 동안 생산량의 증대와 이익을 최대화시키기 위한 문제를 말한다. 회분식 공정의 최적 생산 일정 계획에 관련된 연구는 지난 15여 년간 집중적으로 이루어져 왔다 [12-14].

최근에 와서는 정밀화학, 제약, 식품, 시약, 생물 공학, 고 분자 공업, 첨단재료 산업 등에서 회분식 다품종 생산체제를 도입함에 따라 그 관심이 고조되고 있으며, 이러한 정밀화학 제품들의 생산은 대부분 엄격한 품질 수준을 요구하는 고부 가가치 제품들로서 소량생산을 특징으로 한다. 이를 위해서 는 엄밀한 규격의 원료 확보 및 고도의 제품 품질관리가 요 구된다. 따라서 정밀화학제품 생산공정에서 회분식 정밀 증 류공정이 중요한 공정 요소 중의 하나로 부각되고 있다[17-19]. 이에 본 논문에서는 정밀 증류공정의 해석과 운용전략 을 마련하고 그 결과를 반응기 및 단순 분리기, 저장조로 구 성되는 기초적인 회분식 공정구조에 접목시킴으로써 통합하 된 회분식 공정의 설계 및 운용모형을 개발하였다.

먼저, 본 논문에서는 회분식 증류공정의 공정변수를 회분 공정의 생산계획모델에 통합시키기 위한 표현방법을 개발하 였으며, 이를 근거로 회분식 증류공정이 포함된 다목적 회분 식 공정에서의 최소생산시간을 위한 조업순서를 결정하는 MILP 모델을 개발하였다. 회분식 증류 공정은 하나의 장치

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 8. 30., 채택확정 : 2006. 10. 10.

하진국, 이의수 : 동국대학교 생명화학공학과

(hasung@dgu.edu/eslee@dgu.edu)

에서 소량의 다양한 제품을 생산해 내는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서 공정의 운용과 관련한 다양한 변수가 존재하며, 이들 변수 간에도 강한 상관관계가 존재한다. 우선 고려될 수 있는 문제는 원료로부터 제품의 분리순서(separation sequence)를 결정, 또한 회분식 증류탑으로부터 제품을 분리할 경우, 일차적으로 고려되는 공정 운용의 문제는 제품생산 시간을 최소화하거나(minimum time) 규격에 맞는 제품을 최대한 분리하는 문제(maximum distillate)이다. 이들 문제를 달성하기 위하여 주로 환류비 정책(reflux ratio policy)이 공정운용 변수로 도입되고 있다. 이외에도 공정운용전략과 관련하여 생산제품 및 중간증류제품(cut waste)의 생산계획을 결정하기 위한 체계적이 모델의 개발이 요구된다. 이와 관련하여 증류탑의 처리 전략이 함께 고려되어야 한다. 본 논문에서는 회분식 증류 공정이 제품의 분리순서 및 환류비 정책이 최적의 해를 가지고 있으며, 또한 증류탑의 처리 방안으로 일정한 시간 이후에 재순환하여 다시 회분식 증류 공정을 거치는 회분식 증류공정을 대상으로 회분식 증류공정이 포함된 다목적 회분식 공정에서의 최소생산시간을 위한 조업순서를 결정하는 혼합정수선형계획법(MILP) 모델을 개발하였다.

본 논문에서는 혼합생산방식(Mixed Product Campaign, MPC)을 고려한 순차적 다목적 회분식 공정의 일정 계획을 위한 수학적 모델을 제안하였다. 이 모델의 조업 순서를 결정하기 위하여 time slot의 개념을 도입하였다, 즉, 필요한 제품의 수만큼의 time slot이 있다. 조업순서를 결정하기 위해 time slot의 개념의 도입은 순차 다목적 회분식 공정의 일정계획을 single machine 문제로 표현할 수 있으며, 회분식 증류 공정을 포함하는 다목적 회분식 공정의 복잡한 생산계획을 보다 쉽게 풀 수가 있다.

II. Time slots 를 이용한 다목적 회분식 공정의 생산 일정 계획

회분식 생산공정의 생산계획 문제는 여러 가지 품종의 제품들이 주어진 시간 내에 각기 다른 량으로 주문되었을 경우, 주어진 공정과 설비를 이용하여 가장 짧은 시간 내에 제품 생산을 완료하고자 하는 최적화 문제이다. 생산계획의 중요한 요소는 산업현장을 정확히 파악하여 어떤 생산 공정요소를 변수로 선택하여 수식화하는가와 얻어진 수식적 함수를 어떤 방법으로 풀이할 때 보다 우수한 결과를 얻어낼 수 있을 수 있는지에 있다.

앞서 언급한 바와 같이 화학 공정과 관련된 전산화와 최적화에 관한 가장 중심적인 역할을 하고 있는 것은 최적 생산 계획 및 일정계획(optimal production planning and scheduling)과 관련된 분야이다[3,7,10]. 특히, 일정계획(scheduling)에서는 생산 계획 단계로부터 주어진 생산량을 만족시키기 위해 각 제품의 생산 순서와 생산 시간을 결정하는 역할을 하게 된다. 그림 1은 생산 일정계획의 모델들에 대한 일반적인 일정계획(scheduling) 문제들의 계략적인 분류를 그림으로 나타내었다.

생산일정계획 문제가 수학적 모델식을 통한 접근법으로 가장 관심을 끄는 이유는 시간표현(time representation) 때문이다. 시간표현을 나타내는 방법에는 이산시간표현법(discrete time representation)과 이를 보완하고자 하는 연속시간표현법(continuous time representation)이 있다[11,13,14].

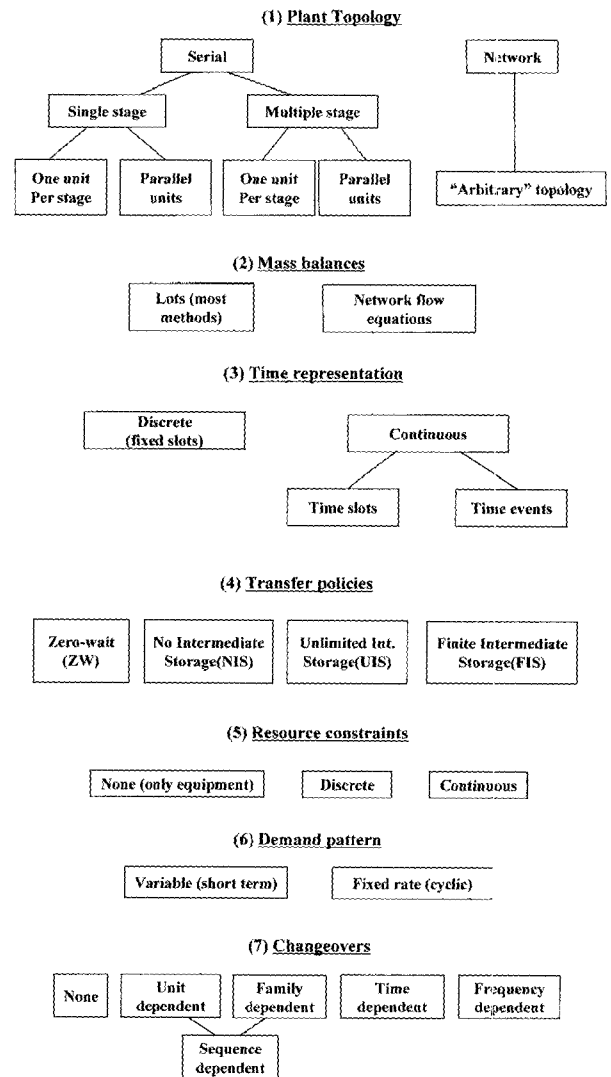


그림 1. 생산계획 문제의 분류도.
Fig. 1. Classification scheduling problems.

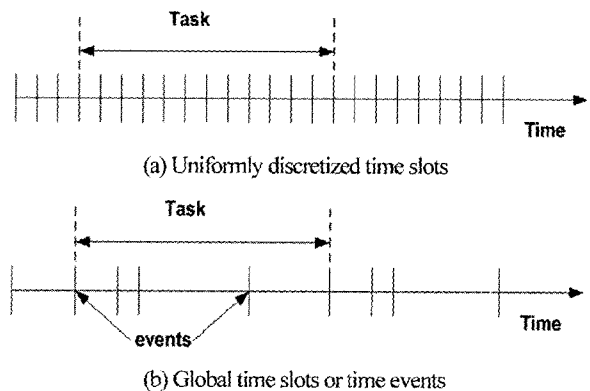


그림 2. 생산일정계획의 시간표현법.
Fig. 2. Time domain representation.

이산시간표현법은 그림 2(a)에서와 같이 주어진 시간 범위(horizon)를 균일한 간격을 갖도록 나누어서 각 단위 별로 사건이 일어남을 나타내는 이진변수를 도입함으로써 나타낼

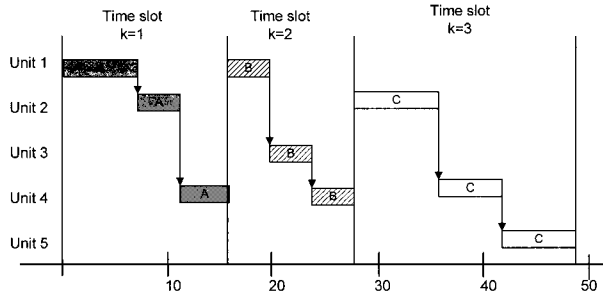


그림 3. 순차적 다목적 공정의 time slot 적용 예.
Fig. 3. Example of time slot on sequential multi-purpose batch plants.

수 있다. 이는 문제의 종류에 따라서는 그 간격이 상당히 줄어들 수 있고, 시간 범위를 나누는 단위 수가 늘어남에 따라 각 단위에서 사건 발생을 표현하는 이진변수의 숫자가 엄청나게 늘어날 수 있는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 연속시간표현법을 사용하는 데, 그림 2(b)는 연속시간표현법을 보여주고 있다. 연속시간표현법에서는 사건의 시작과 끝만을 결정하는 이진변수만이 필요하며, 장치의 할당을 위한 시간 간격을 time slots(or time events)이라고 정의하는데 연속시간표현법에서는 다양한 시간 간격 범위를 가지는 것이 특징이다.

Time slots을 기반으로 한 생산일정계획(scheduling)은 연속 시간표현법을 이용한 모델식으로 각 단위별로 사건의 시작과 끝만을 결정하는 이진변수를 이용하여 제품의 순서 및 최적조업시간을 구할 수 있다. 그림 3에서와 같이 제품 A-B-C와 단위공정 1~5units의 순차 다목적 회분식 공정에서의 time slot 모델을 적용한 것이다. 즉, time slot은 제품 i가 제품생산 경로로 제품이 생산(batches)되는 시간 구간을 말하며, 모든 제품이 생산경로를 따라 조업을 하기 위해서는 각각의 time slot k에 할당되어야 한다. 따라서, time slot k의 순서를 결정함으로써 제품의 생산순서를 결정할 수 있다.

따라서, 순차적 다목적 회분식 공정에서의 Time slot k에 있는 단위공정 j를 위한 시작시간과 끝나는 시간 및 주어진 제품생산경로에 포함된 연속적인 단위공정 j와 j' 사이의 시간 그리고 연속적인 time slot 사이의 k와 k+1의 관계 및 목적함수인 최종조업완료시간을 최소화하는 문제로 구성된다. 먼저, 모든 생산은 생산순서에 따라 정확히 할당되어야 하므로 각 제품이 time slot, k에 할당을 위한 이진변수는 다음과 같이 정의한다.

$$X_{ik} = \begin{cases} 1: & \text{if product } i \text{ is manufactured in time slot } k \\ 0: & \text{otherwise} \end{cases}$$

그리고 이진변수 X_{ik} 의 제한 조건식들은 다음과 같다.

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = n_i \quad \forall i \in I \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ik} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2)$$

여기서, K는 time slot k의 집합, I는 제품들의 집합을 말하는

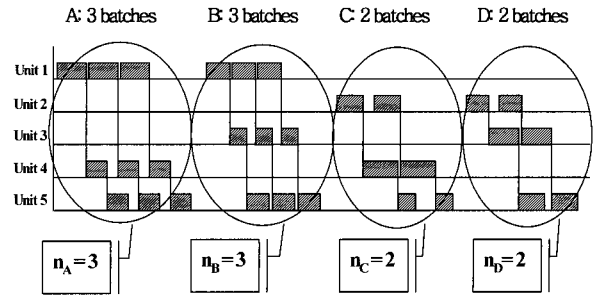


그림 4. 전체공정의 batches 횟수와 time slot 개수 관계.
Fig. 4. Example of the number of total batches and total time slots.

것이다. 또한 n_i 는 제품 i의 batches의 횟수를 뜻하는데 예를 들어 그림 4에서와 같이 5개의 단위공정(unit)이 있는 다목적 회분식 공정에서 서로 다른 네 개의 제품 A-D를 생산한다면, 제품 A와 B는 각각 3 batches 공정을, 제품 C와 D는 각각 2 batches 생산을 한다고 가정하면, 제품 A는 $n_A=3$, 제품 B는 $n_B=3$ 또한 제품 C와 D는 각각 $n_C=2$, $n_D=2$ 가 된다. 따라서 전체공정의 batches의 횟수는 $\sum_i n_i = 10$ 이다.

또한 순차적 다목적 회분식 공정의 상세일정계획의 목적함수인 최종조업완료시간은 (3)과 같다.

$$\text{목적함수: Min : Makespan} \geq ET_{\bar{k}j} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

Time slot k에서 단위공정 j의 시작 시간과 완료시간의 관계식:

$$ET_{kj} - ST_{kj} = \sum_{i \in I} P_{ij} X_{ik} \quad \forall k \in K, j \in J \quad (4)$$

Time slot k에서 주어진 경로의 단위공정 j와 다음 단위공정 j' 간의 관계식:

$$ST_{k'j'} - ET_{kj} \geq -U(1 - \sum_{i \in I} X_{ik}) \quad (5)$$

$$\forall k \in K, j \in J - \{\bar{j}\}, k' > k$$

연속된 Time slot k와 k+1의 시작 시간과 끝나는 시간 관계식:

$$ST_{k+1,j} - ET_{kj} \geq 0 \quad (6)$$

$$\forall k \in K - \{\bar{k}\}, j \in J$$

여기서, ST는 각 단위공정에서 공정시작시간, ET는 각 단위공정에서 공정완료시간, J는 set of units를 나타내며, \bar{j} 는 last unit, U는 sufficiently large positive number, \bar{k} 는 last time slot를 나타낸다.

이상과 같이 MPC에서 UIS 운용방안을 채택한 순차적 다목적 회분식 공정에서의 최종조업완료시간을 최소화하는 식은 (3)과 같으며 제약조건은 (1), (2) 및 (4)-(6)으로 표현된다.

III. Time slot 모델 적용을 위한 회분식 증류공정의 해석 회분식 증류공정을 time slot 모델을 적용하기 위해서는 복

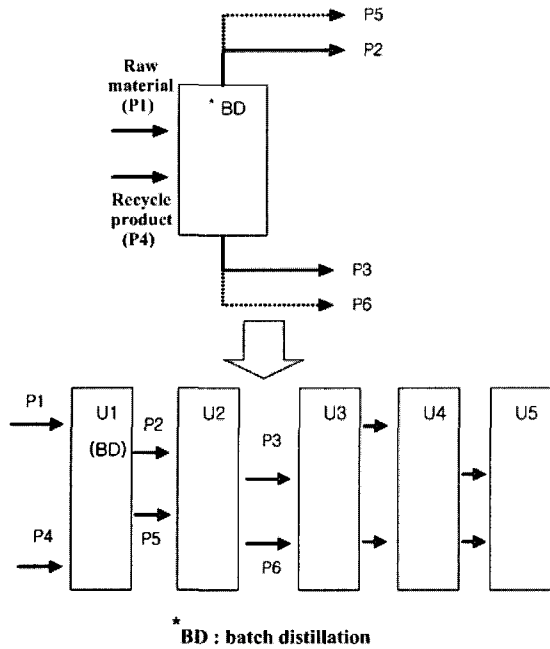


그림 5. 회분식 증류공정의 time slot 모델 적용을 적용한 순차적 다목적 회분식 공정도.

Fig. 5. A schematic diagram of conceptually converting a batch distillation process into a equivalent batch process.

잡한 해석을 요구한다. 그림 5에서와 같이 회분식 증류공정이 2성분계 생산공정이면, 원료(P1)이 회분식 증류공정을 거치면 새로운 제품 P2, P3 및 중간증류제품(cut waste) P4를 생산한다.

그리고 회분식 증류공정에서 생산된 제품 P2와 P3는 다음 제품생산경로 단위공정으로 이동하여 최종제품으로 생산될 것이다. 또한 중간증류제품(cut waste) P4는 일정시간 또는 일정용량이 되면, 재순환원료로 다시 회분식 증류공정을 거쳐서 제품 P4와 P5을 생산한다. 제품 P4와 P5는 제품 P2와 P3과 같은 제품이며, 같은 제품생산경로로 다음 단위공정으로 이동할 것이다. 특히, 원료 제품 P1과 중간증류제품(cut waste) P4는 회분식 증류공정 만을 거치는 제품이며, 제품의 yield는 제로(zero)인 제품이다.

순차적 다목적 회분식 공정의 생산계획에 있어서 조업순서를 결정하기 위해서는 전체 생산공정에서 모든 제품은 제품의 생산경로 즉 time slot k에 할당되기 위해서는 항상 제품이 첫 단위공정으로 이동할 준비가 되어있어야 한다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 제품 P2와 P3는 제품 P1이 회분식 증류공정을 거친 이후에 생산되는 제품이다. 또한 제품 P5와 P6 역시 제품 P4가 회분식 증류공정을 거친 이후에 생산되는 제품이다. 그리고, 중간증류제품(cut waste) P4 역시 제품 P1(원료제품)이 회분식 증류 공정을 거친 이후에 생산되는 제품이다. 따라서, 제품 P2, P3, P5와 P6의 제품생산경로의 첫 단위공정이 비워져 있어도 제품 P1과 제품 P4가 회분식 증류공정을 거친 이후에 제품 P2, P3, P5와 P6가 생산되어야 각 제품의 첫 단위공정에서 공정을 시작할 수 있다. 따라서 제품 P2, P3, P4, P5와 P6이 항상 제품생산경로의 첫 단위공정에서 조업을 할 수 있도록 준비되게 하는 제약 조건은 다음과

같다.

- 1) 제품 P2와 P3의 time slot k에 할당 순서는 제품 P1의 time slot k 보다 항상 뒤에 할당 받아야 한다.
- 2) 제품 P4의 time slot k에 할당 순서는 제품 P1의 time slot k 보다 항상 뒤에 할당 받아야 한다.
- 3) 제품 P5와 P6의 time slot k에 할당 순서는 제품 P4의 time slot k 보다 항상 뒤에 할당 받아야 한다.
- 4) 제품 P5와 P6의 time slot k에 할당 순서는 제품 P2와 P3의 time slot k 보다 항상 뒤에 할당 받아야 한다.

위 제약조건 1)-4)를 만족하는 새로운 이진변수 X_{ik} 의 제한 조건식 다음과 같다.

$$X_{i,k'} + \sum_{i' \in S_i} X_{i',k} \leq 1 \quad (7)$$

$$\forall i \in I_s, k, k' \in K - \{\bar{k}\}, k' < k$$

여기서, S_i 와 I_s 는 제품의 집합을 의미한다. 예를 들어 보면 다음과 같다. 제약조건에 관련되는 제품들을 각각 time slot k에 할당에 관련된 제품쌍으로 표시하면 (P1, P2), (P1, P3), (P1, P4), (P4, P5), (P4, P6), (P2, P5), (P2, P6), (P3, P5), (P3, P6)로 표시할 수 있다. 그리고, I_s 는 제품쌍에서 time slot k에 먼저 할당을 받아야 하는 제품의 집합을 의미하며, 위 제약조건에서의 $I_s = \{P1, P2, P3, P4\}$ 로 정의된다. 그리고 S_i 는 I_s 제품 집합의 각각의 제품의 time slot k보다 뒤에 할당 받아야 하는 제품들의 집합을 의미한다. 즉 $S_i = S_{P1} = \{P2, P3, P4\}$, $S_i = S_{P2} = \{P5, P6\}$, $S_i = S_{P3} = \{P5, P6\}$, $S_i = S_{P4} = \{P5, P6\}$ 가 된다.

IV. 회분식 증류공정을 포함한 회분식 공정 생산일정계획 모델

본 논문에서는 회분식 증류공정을 포함한 순차적 다목적 회분식 공정의 일정계획을 위한 MILP의 수학적 모델을 개발하였다. 본 모델에서 채택한 가정은 다음과 같다.

- 1) 혼합생산방식(Mixed Product Campaign, MPC)에서 순차적 다목적 회분식 공정을 가정한다.
- 2) 중간저장조의 운영방안은 UIS 정책이다.
- 3) 최소의 총작업소요시간을 가진 조업 순서는 time slot으로 결정된다.
- 4) 또한 각각의 생산제품을 위한 특정한 제품 생산 경로의 선택은 time slot으로 결정된다.
- 5) 회분식 증류공정은 2성분계 공정이다.
- 6) 중간증류제품(cut waste, P4)은 원료제품(P1)의 one batch 후에 재순환된다.

회분식 증류공정을 포함하는 순차적 다목적 회분식 공정의 제품별 공정순서 결정을 위해 각각의 제품들이 time slot k에 할당을 위한 이진변수 X_{kj} 는 다음의 제한 조건을 만족해야 한다.

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = n_i \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ik} = 1 \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$X_{i,k'} + \sum_{i' \in S_i} X_{i',k} \leq 1 \quad (10)$$

$$\forall i \in I_s, k, k' \in K - \{\bar{k}\}, k' < k$$

여기서, K는 time slot k의 집합, I는 제품들의 집합, n_i 는 제품 i의 batches의 횟수, S_i 와 I_s 는 제품의 집합이다.

Time slot k에 있는 단위공정 j를 위한 시작시간과 끝나는 시간 및 주어진 제품생산경로에 포함된 연속적인 단위공정 ST_{kj} 와 ET_{kj} 사이의 시간 그리고 연속적인 time slot k와 k' 사이의 관계를 나타낸 식들은 아래 식들과 같다.

$$ET_{kj} - ST_{kj} = \sum_{i \in I} P_{ij} X_{ik} \quad \forall k \in K, j \in J \quad (11)$$

$$ST_{kj'} - ET_{kj} \geq -U(1 - \sum_{i \in I} X_{ik}) \quad (12)$$

$$\forall k \in K, j \in J - \{\bar{j}\}, k' > k$$

$$ST_{k+1,j} - ET_{kj} \geq 0 \quad (13)$$

$$\forall k \in K - \{\bar{k}\}, j \in J$$

여기서 P_{ij} 는 단위공정 j에서 제품 i의 공정시간, U는 상한값으로 충분히 큰 양의 값을 가지며, \bar{j} 는 전체 생산공정의 마지막 단위공정을 뜻한다.

V. 적용 예제

회분식 증류공정을 포함하는 순차적 다목적 회분식 공정은 총 단위공정이 5 units이 있으며, 8개의 제품을 생산하는 공정이다. 회분식 증류공정은 첫 단위공정에 위치하며, 2성분계 공정이다. 각각의 제품들에 대한 제품생산경로와 생산경로의 각 단위공정에서의 생산시간은 Table 1과 같다.

제품 P2, P3와 P4는 제품 P1이 회분식 증류공정을 통해 생산되는 제품들이며, 제품 P4는 회분식 증류공정으로 재순환되는 제품으로 회분식 증류공정을 거쳐 제품 P5와 P6를 생산한다. 여기서 주목해야 할 것은 제품 P1과 P4는 회분식 증류공정을 거치면 제품 yield가 제로(zero)이다. 제품 P1~P6은 one batch 공정이며, 제품 P7과 P8은 two batches 공정을 한다.

따라서, 본 예제를 이진변수의 제약조건에 적용하면, $K = \sum_i n_i = 10$, time slot k에 할당에 관련된 제품쌍으로 표시

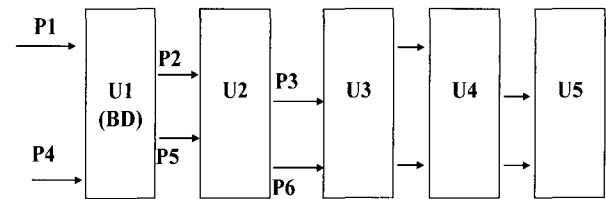
하면 (P1, P2), (P1, P3), (P1, P4), (P4, P5), (P4, P5), (P3, P6)로 표시되며, time slot k에 먼저 할당을 받아야 하는 제품의 집합을 의미하는 $I_s = \{P1, P2, P3, P4\}$ 로 정의된다. 그리고 S_i 는 I_s 제품 집합의 각각의 제품의 time slot k 보다 뒤에 할당 받아야 하는 제품들의 집합을 의미한다. 따라서, $S_{P1} = \{P2, P3, P4\}$, $S_{P2} = \{P5, P6\}$, $S_{P3} = \{P5, P6\}$, $S_{P4} = \{P5, P6\}$ 가 된다. 그림 6은 본 예제의 회분식 증류공정이 있는 순차적 다목적 회분식 공정을 time slot 모델에 적용한 공정도를 나타낸다.

본 예제는 PC, Intel Pentium III 800MHz를 이용하여 상용 최적화 프로그램 Hyper LINGO 6.0을 사용하여 최적해를 구하였다. 본 예제는 80 binary variables, 181 continuous variables, 그리고 252 constraints 이었으며, 계산시간은 16.0초가 소요되었다. 그림 7에서와 같이 제품의 최적조업순서는 P1-P8-P7-P4-P3-

표 1. 예제의 data.

Table 1. Data for example on sequential jobshop with batch distillation.

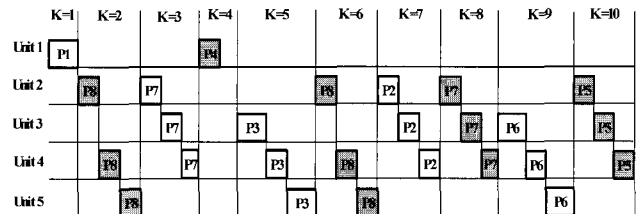
Product unit \	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Unit 1	7	-	-	5	-	-	-	-
Unit 2	-	4	-	-	4	-	4	5
Unit 3	-	5	6	-	5	6	3	
Unit 4	-	5	4	-	5	4	3	4
Unit 5	-	-	6	-	-	6	-	4
batch	1	1	1	1	1	1	2	2



* BD : batch distillation

그림 6. 예제의 회분식 증류공정을 포함한 순차적 다목적 회분식 공정의 공정도.

Fig. 6. A schematic diagram for example on sequential jobshop with batch distillation.



Gantt Chart for example

그림 7. 예제의 최적 스케줄.

Fig. 7. Optimal schedule of example.

P8-P2-P7-P6-P5이며, 최소생산시간(MS)은 45시간이다.

VI. 결론

회분식 증류공정의 운용전략이 전체 회분식 공정의 생산 계획과 연계된 통합 생산계획을 위한 모델을 완성하기 위해서는 3단계의 과정을 거치게 된다. 즉 문제들의 표현방법, 평가방법 및 모델해석방법이다. 본 논문에서는 다목적 회분식 공정의 운용방안에서 순차적 다목적 회분식 공정에 대해서만 다루었으며, 회분식 증류공정이 포함된 다목적 회분식 공정에서의 최소생산시간을 위한 조업순서를 결정하는 혼합정수선형계획법(MILP) 모델을 제안하였다. 회분식 증류공정과 다목적 회분식의 상세일정계획을 위해 preordering 기법을 도입하였다. 본 논문은 혼합생산방식(Mixed Product Campaign, MPC)을 고려한 순차적 다목적 회분식 공정의 일정 계획을 위한 수학적 모델이다. 향후 다양한 중간저장조 운영방안을 고려된 회분식 증류공정이 포함된 순차 다목적 회분식 공정 및 비순차 다목적 회분식 공정에 대한 표현방법 연구와 수학

적 모델을 개발하여 실제 산업 현장에 적용 가능한 모델을 개발할 것이다.

참고문헌

- [1] J. H. Jung and H. Lee, "Completion times algorithm of multi-product batch processes for CIS policy and nonzero transfer and set-up times," *Computers & Chem. Eng.*, vol. 20, pp. 845-852, 1996.
- [2] S. Moon and A. N. Hrymak, "Mixed-integer linear programming model for short-term scheduling of a special class of multipurpose batch plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 38, pp. 2144-2150, 1999.
- [3] J. K. Bok and S. Park, "Continuous time for modeling for short term scheduling of multipurpose pipless plant," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, pp. 3652, 1998.
- [4] J. M. Pinto and I. E. Grossmann, "An alternate MILP model for short-term scheduling of batch plants with preordering constraints," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 35, pp. 338-342, 1996.
- [5] J. M. Pinto and I. E. Grossmann, "A continuous time MILP model for short term scheduling of batch plants with pre-ordering constraints," *Comput. Chem. Engng.*, vol. 20, pp. 1197-1202, 1996.
- [6] V. T. Voudouris and I. E. Grossmann, "MILP model for scheduling and design of a special class of multipurpose batch plants," *Computers and Chem. Eng.*, vol. 20, no. 11, pp. 1335, 1996.
- [7] I. E. Grossmann and R. W. H. Sargent, "Optimum design of multipurpose chemical plants," *Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.* vol. 18, no. 2, pp. 343-348, 1979.
- [8] J. A. Vaselenak, I. E. Grossmann, and A. W. Westerberg, "Optimal retrofit design of multiproduct batch plants," *Ind. Engng Chem. Res.* vol. 26, no. 4, pp. 718-726, 1987.
- [9] H. M. Ku and I. Karimi, "Completion time algorithms for serial multiproduct batch processes with shared storage," *Computers & Chem. Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 49-69, 1990.
- [10] G. V. Reklaitis, A. K. Sunol, D. W. Rippin, and O. Hortacsu, "Batch processing systems engineering," *Springler*, pp. 751-778, 1992.
- [11] J. M. Pinto and I. E. Grossmann, "A continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 34, pp. 3037-3051, 1995.
- [12] 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.
- [13] M. G. Ierapetritou and C. A. Floudas, "Effective continuous-time formulation for short-term scheduling. 1. multipurpose batch processes," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, pp. 4341-4359, 1998.
- [14] J. M. Pinto and I. E. Grossmann, "A continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 34, pp. 3037-3055, 1995.
- [15] S. Hasebe, I. Hashimoto, and A. Ishikawa, "General reordering algorithm for scheduling of batch process," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 24, no. 4, pp. 484-489, 1991.
- [16] J.-K. Ha, E. S. Lee, B. S. Lee, and I.-B. Lee, "Completion times in serial multiproduct batch processes with storage time restriction," *HWAHAK KONGHAK*, vol. 36, no. 5, pp. 813-820, 1998.
- [17] J.-K. Ha, H.-K. Chang, E. S. Lee, I.-B. Lee, B. S. Lee, and Gyeongbeom Yi, "Intermediate storage tank operation strategies in the production scheduling of multi-product batch processes," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 24, no. 2-7, pp. 1633-1640, 2000.
- [18] G. B. Yi, D. I. Shin, H.-K. Lee, B. S. Lee, J.-K. Ha, and E. S. Lee, "Optimal scheduling of quality controlled product storage," *HWAHAK KONGHAK*, vol. 39, no. 2, pp. 176-183, 2001.
- [19] J.-K. Ha, Gyeongbeom Yi, I.-B. Lee, and E. S. Lee, "Completion time algorithm in multiproduct batch processes with storage time and product allocation restriction in intermediate storage tank," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 9, no. 9, pp. 727-735, September 2003.



하진국

1969년 12월 23일생. 1996년에 동국대학교 화학공학과 학사. 1998년에 동국대학교 화학공학과 석사. 2005년 동국대학교 화학공학과 박사. 관심분야는 회분식 공정설계, 공정스케줄링 및 최적화, 공정자동화 등.



이 의 수

1955년 3월 30일생. 1978년 서울대학교 화학공학과 학사. 1980년에 KAIST 화학공학과 석사. 1988년 PURDUE 대학 화학공학과 박사. 1980년~1994년 쥘포스코 캠 중앙연구소에서 연구실장. 1994년부터 동국대학교 생명화학공학과 교수.

관심분야는 회분식 공정설계 및 합성, 공정 스케줄링 및 최적화, 공정자동화 등.