

## 장치비용과 에너지 회수비용을 함께 고려한 다품종 회분식 공정의 최적 설계 및 생산계획

조익상 · 이범석<sup>†</sup> · 이인범\* · 이의수\*\*

경희대학교 화학공학과

\*포항공과대학교

\*\*동국대학교 화학공학과

(1998년 3월 8일 접수, 1998년 6월 1일 채택)

## Optimal Design and Production Plan of Multi-Product Batch Processes Considering Equipments Costs and Energy Savings

Iksang Cho, Bomsock Lee<sup>†</sup>, In-Beum Lee\* and Euy Soo Lee\*\*

Department of Chemical Engineering, Kyunghee University

\*Department of Chemical Engineering, Pohang Institute of Technology

\*\*Department of Chemical Engineering, Dongguk University

(Received 8 March 1998; accepted 1 June 1998)

### 요 약

연속식 공정에서와는 달리 회분식 공정에서 에너지 회수를 위한 열교환을 하기 위해서는 부득이 생산일정을 변경하여 야만 하고, ZW policy를 따르는 대부분의 회분식 공정에서는 이럴 경우 생산주기가 늘어나게 되어 결국은 회분식장치 크기의 증가가 요구된다. 늘어난 장치 설비비용의 부담으로 인해 공정설계 엔지니어들은 열교환의 가능성을 무시하고 초기설계를 마치는 경우가 많다. 본 논문에서는 다품종 회분식 공정의 생산일정, 필요한 회분식장치의 크기, 그리고 열 교환에 필요한 수학적 식들로서 구성된 혼합정수 비선형 프로그램의 최적화 해를 구하여서 회분식 공정에서의 열교환 가능성과 그 경제성을 검토해 보고자 한다. 이해를 돕기 위하여 열교환 가능성이 있는 다품종 회분식 공정을 예로 들어 본 연구 결과를 적용해 보았다.

**Abstract**—Differently from continuous processes, the processing schedule of batch processes should be modified for heat exchange between batch streams. In most batch processes in which ZW policy is adopted, the heat integration causes the increased production cycle time that requires the bigger batch equipments sizes. Process design engineers usually finish the initial batch process design neglecting the possibilities of heat integration due to the increased equipment costs in that case. In this study, the schedule of multi-product processes, the required equipments sizes and the heat exchange between batch streams are mathematically formulated in a mixed integer nonlinear programming. A solution of this formulation can be readily obtained with a commercial MINLP solver. Numerical examples are presented to illustrate the possibilities of heat exchange in a multi-product batch process.

Key words: Batch, Heat, Exchange, Energy, Schedule

### 1. 서 론

연속식 공정에서 에너지 회수를 위한 열교환망 합성에 관한 연구는 광범위하게 진행되어 왔으나, 회분식 공정의 경우 에너지 회수율이 낮다(전체 설비비용의 5%)는 이유로 인해 연구의 중요성이 낮게 인식되어져 왔다[10]. 또한, 회분식 공정은 초기 공정설계시에 시간이라는 변수를 함께 고려해야 하므로 에너지 회수의 어려움이 더욱

큰 것도 사실이다[4]. 그러나, 회분식 공정은 최근 들어서 공정 자체가 갖는 유연성으로 인해 고분자, 생화학, 제약, 식품 및 음료 등 화학공학의 많은 분야에서 인기를 끌고 있으며[14], 몇몇 회분식 공정에서는 에너지 사용량이 생산 경비의 많은 부분을 차지하고 있기도 하다. 따라서, 회분식 공정에서의 에너지 회수에 관한 연구는 그 경제성이나, 연구의 어려움에도 불구하고 최근 미국과 영국 등의 선진국뿐만 아니라 여러 개발 도상국에서 진행되고 있다[3].

본 논문에서는 회분식 공정의 생산설비 초기설계 단계에서, 열교환을 고려하였을 때 절약할 수 있는 에너지 비용과 그로 인해 추가되

<sup>†</sup>E-mail: bslee@nms.kyunghee.ac.kr

는 생산설비 비용과의 관계를 수학적인 모델을 통해서 알아보는데 그 목적이 있다. 최근까지 발표된 회분식 공정에서의 에너지 회수에 관한 연구는 크게 회분식 공정의 생산계획을 바꾸지 않은 상태에서 에너지 회수의 가능성을 연구한 논문[4, 6, 7, 11]과 생산주기(cycle time)는 변함없이 생산일정(process scheduling)을 조정하여 에너지 회수 가능성을 높인 논문[2, 3, 5]으로 나누어 볼 수 있다. 생산주기는 늘리지 않고 생산일정을 변경하기 위해서는 회분식 공정의 운전방법을 다양하게 채택하면 된다[5]. 그러나, 실제 회분식 공정에서는 공정이 끝난 batch는 곧 다음 장치로 이동해야 하는 Zero Wait(ZW) policy를 지켜야 하며, 이로 인해 에너지 회수를 위해 생산일정을 조절하게 되면 생산주기는 늘어나게 된다. 이러한 경우에 공정설계 엔지니어들은 생산계획에 차질을 빚기보다는 공정간에 열교환을 통한 에너지 회수를 포기하는 경우가 대부분이다. 그러나, 생산주기가 늘어나게 되어도 생산설비를 크게 설계하여 일회 생산량을 늘리면 연간 총 생산시간에 계획된 생산량을 맞출 수가 있으므로, 늘어난 생산설비 비용과 회수되는 에너지 비용을 함께 고려해 볼 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 ZW policy를 지키면서, 열교환을 하기 위해 생산일정이 변경된 경우 생산주기가 늘어나는 회분식 공정에 대하여 생산설비 비용과 에너지 비용의 합을 목적함수로 두고 최소화 하는 최적화 프로그램을 만드는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 최적화 프로그램의 제약조건(constraints)들은 생산일정과 회분식 단위 공정의 크기, 그리고 열교환을 설명하는 수학적인 식들로서 이루어지며, 프로그램의 해를 살펴봄으로써 다품종 회분식 공정에서의 에너지 회수의 가능성을 검토하고자 한다. 이러한 과정은 몇 개의 예제를 통해서 자세히 설명된다.

## 2. 다품종 회분식 공정의 생산계획

회분식 공정은 생산해내는 생산품목에 따라, 단일품목을 생산하는 단일종 회분식 공정(single product process), 비슷한 여러 품목을 생산해내는 다품종 회분식 공정(multi product process), 관련 없는 여러 품목을 생산해내는 다목적 회분식 공정(multi purpose process)으로 나눌 수가 있다[9, 13]. 본 논문에서는 회분식 공정에서 가장 사용이 많은 다품종 회분식 공정을 예로 들어 회분식 공정에서의 에너지 회수 가능성을 검토하기로 한다.

N개의 각각 다른 제품을 생산해내는 회분식 공정이 M개의 회분식 장치로 이루어져 있다고 가정하자. 회분식 공정을 이루고 있는 각각의 단위장치  $i(i=1, \dots, M)$ 에서 제품  $p(p=1, \dots, N)$ 마다 소요되는 단위 공정시간(unit processing time)을  $t_p$ 라고 하자.

다품종 회분식 공정에서의 생산일정(process schedule)을 결정하는 프로그램은 여러 문헌에서 설명되어 있으므로[5, 12] 본 논문에서는 간단히 설명하기로 한다. 각 장치에 batch가 유입되어 공정을 시작하는 시각을  $\Pi_{ip}$ , 공정이 끝나는 시각을  $TE_{ip}$ 라고 한다면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$TE_{ip} = \Pi_{ip} + t_p \quad i=1, \dots, M, p=1, \dots, N \quad (1)$$

공정을 끝내고 batch가 장치를 이동하는 시간은 공정의 운전 제약조건에 따라 달라질 수 있으며, 공정이 끝나자마자 이동하여야 하는 zero wait(ZW) policy를 따른다면, 장치  $i$ 에서 제품  $p$ 의 공정이 끝나는 시각,  $TE_{ip}$ 와 다음 장치  $i+1$ 에서 제품  $p$ 의 공정이 시작하는 시각,  $\Pi_{i+1,p}$ 는 서로 같아야 한다.

$$\Pi_{i+1,p} = TE_{ip} \quad i=1, \dots, M-1, p=1, \dots, N \quad (2)$$

본 논문에서는 회분식 공정의 운전조건 중 가장 일반적인 ZW policy를 채택한 경우에 대해서 본 연구를 수행하기로 한다.

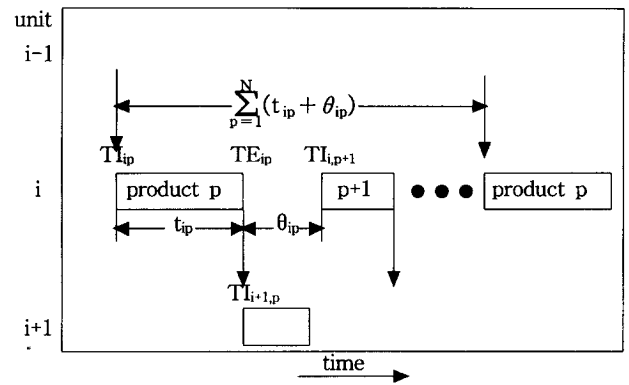


Fig. 1. The relations of time variables in batch processes.

장치  $i$ 에서 제품  $p$ 의 공정이  $TE_{ip}$ 에서 끝난 후, 같은 장치에서 다음 제품  $p+1$ 의 공정이 시작되는 시각,  $\Pi_{i,p+1}$ 은  $TE_{ip}$ 보다 뒤에 와야 하며, 두 시각 사이에 장치가동을 쉬게 되는 시간이 있다면, 이를 idle time,  $\theta_{ip}$ 이라고 부른다.

$$\Pi_{i,p+1} = TE_{ip} + \theta_{ip} \quad i=1, \dots, M, p=1, \dots, N-1 \quad (3)$$

Fig. 1에서는 위 식 (1)-(3)에서 사용되는 시간변수들의 관계를 보여주고 있다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 각 제품이 모두 한 번씩 생산되는 총 생산주기,  $T_{cl}$ 는 각 공정시간과 idle time,  $\theta_{ip}$ 의 합 중에서 가장 큰 것이 된다.

$$T_{cl} \geq \sum_{p=1}^N (t_p + \theta_p) \quad i=1, \dots, M \quad (4)$$

생산설비 비용의 최소화를 목적으로 회분식 공정의 생산계획을 결정짓는 문제에서 생산주기,  $T_{cl}$ 는 어느 일정한 값을 넘을 수 없도록 최적화 프로그램내에 제약조건을 삽입하도록 한다.

$$T_{cl} \leq T_{cl}^{max} \quad (5)$$

이때  $T_{cl}^{max}$ 는 변수  $T_{cl}$ 의 프로그램내에 주어지는 상한값(upper limit value)이다.

1년간 계획된 총 생산시간(total production time)  $T$ 에 각 제품( $p=1, \dots, N$ )이 생산되는 생산횟수는  $T/T_{cl}$ 가 되며, 편의상 컴퓨터 프로그램내에서 생산횟수는 정수형 변수로써 취급된다. 각 제품의 주어진 생산요구량( $R_p$ , [kg])을 생산하기 위해서는, 각 제품의 일회 생산량(batch size),  $B_p$ [kg]는 생산요구량을 생산횟수로 나눈 식으로 구할 수 있으므로 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$B_p = \frac{R_p}{(T/T_{cl})} \quad p=1, \dots, N \quad (6)$$

각 단위공정에서 제품  $p$ 의 생산량( $B_p$ )을 처리하기 위한 장치의 크기는  $S_p B_p$ 로 나타내어지며, 이때  $S_p$ 는 장치  $i$ 에서의 제품  $p$ 의 size factor[m<sup>3</sup>/kg]이다. 또한, 각 장치의 크기는 각 제품이 요구하는 크기 중에서 가장 큰 것으로 결정되어야 하므로 다품종 회분식 공정에서의 각 장치의 크기,  $V_i$ [m<sup>3</sup>]는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_i \geq S_{ip} B_p \quad i=1, \dots, M, p=1, \dots, N \quad (7)$$

공정의 초기설계 단계에서 장치의 크기가 결정되면 각 장치의 구입비용은 대부분  $a_i V_i^{b_i}$ 의 형태와 같은 지수법칙으로 예측할 수 있으며, 이때  $a_i$ ,  $b_i$ 는 장치  $i$ 에 대한 실험적인 상수이다[8]. 따라서, 회분식 공정에서의 초기 설비투자비용은 각 단위장치 구입비용의 합으로 나타내어진다.

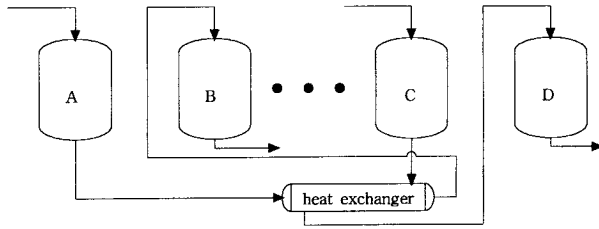


Fig. 2. Countercurrent heat exchange in batch processes.

$$\text{설비비용} = \sum_{i=1}^M a_i V_i^{b_i} \quad (8)$$

### 3. 회분식 공정에서의 열교환

회분식 공정에서의 열교환 방법은 단위공정에 필요한 열량공급 방법에 따라, cocurrent, countercurrent, 그리고 두 가지 방법이 혼용되는 co/countercurrent 방법 등 세 가지 방법으로 나누어 볼 수 있다 [11]. 본 연구에서는 단위공정 간에 이동하는 batch간의 열교환을 수행하는 countercurrent 열교환에 국한하여 열교환 문제를 설명하고자 한다.

Countercurrent 열교환은 Fig. 2에서 보듯이 단위공정간에 이동하는 두 개의 batch가 열을 공급받거나 내어놓을 때, 열교환이 가능해진다. 열교환기를 통하여 얻을 수 있는 두 batch간의 최대 열교환량,  $Q^{max}$  [kJ]은 다음 식으로 구하여진다.

$$Q^{max} = \min[(B_p C)_c |T_c^s - T_c^d|, (B_p C)_h (|T_c^s - T_h^s| - \Delta T_{min}), (B_p C)_h |T_h^s - T_h^d|, (B_p C)_h (|T_c^s - T_h^s| - \Delta T_{min})] \quad (9)$$

위 식 (9)는 참고문헌[11]에서 찾을 수 있는 식들로서 유도되었다. 여기서,  $B_p$ 는 batch의 크기[kg]를 나타내며  $C$ 는 열용량[kJ/kg°C]을 나타낸다. 또한,  $\Delta T_{min}$ 은 열교환기의 최소접근온도(minimum approach temperature)[°C],  $T^s$ 는 batch의 초기온도(starting temperature)[°C],  $T^d$ 는 batch의 원하는 최종온도(desired temperature)[°C]를 나타내며, 아래 첨자 c와 h는 각각 열을 필요로 하는 cold stream, 열을 내놓아야 하는 hot stream의 첫 글자를 의미한다.

#### 3-1. 예제 1(열교환량)

예제 1은 회분식 공정에서 두 개의 batch간에 countercurrent 방식으로 이루어지는 열교환량을 식 (9)로써 구하는 과정을 설명한다. Fig. 2의 탱크 A에서 나오는 batch는 열을 공급받아 탱크 B로 유입되어야 하며, 탱크 C에서 나오는 batch는 열을 내어놓은 후 탱크 D로 유입되어야 한다고 하였을 때 열교환의 가능성을 가지게 된다. 이때 탱크 A에서 나오는 batch는 cold batch stream, 탱크 C에서 나오는 batch는 hot batch stream으로 불리게 된다. 두 stream의 초기 온도  $T^s$ , 원하는 온도  $T^d$ , 그리고 batch의 양[kg]과 열용량은 실제 주정 제조공정에서 운전되는 운전데이터를 예로 들었으며, Table 1에 나타난 바와 같다.

두 batch간에 이루어지는 열교환량은 식 (9)를 사용하여 구할 수 있으며, 이때 열교환기의  $\Delta T_{min}$ 은 10 °C라고 가정한다. 식 (9)를 사용하면,  $Q^{max} = \min[2.57 \times 10^7, 3.98 \times 10^7, 1.92 \times 10^7, 2.72 \times 10^7]$ 가 되어 두 batch간의 가능한 최대 열교환량은  $1.92 \times 10^7$  [kJ]가 된다. 만약, 이 공정에 사용되는 유틸리티로서 열원으로는 hot steam, 냉매로는 냉각수가 된다고 하면, 열교환량만큼의 steam, 냉각수 비용을 절감할 수 있으며 이러한 에너지절감 비용은 관계문헌의 데이터[8]를 사용하여 우리가 원하는 최적화 프로그램에 도입할 수 있다. 참고로

Table 1. Data for example 1

Stream	Batch size ( $B_p$ , [kg])	Heat capacity ( $C$ , [kJ/kg°C])	Starting temperature ( $T^s$ , [°C])	Desired temperature ( $T^d$ , [°C])
Cold(A → B)	120,000	3.9	25	80
Hot(C → D)	100,000	3.2	120	60

Table 2. Utility cost

	25 °C cooling water	Steam		
		278 °C saturated	230 °C saturated	170 °C saturated
Cost[\$/kJ]	$0.2 \times 10^{-6}$	$9.7 \times 10^{-6}$	$7.3 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-6}$

steam과 냉각수 사용비용을 단위 환산하여 Table 2에 정리하였다.

두 batch간에 이루어지는 열교환으로 얻을 수 있는 에너지 절감비용은 steam과 냉각수 비용의 합에 열교환 횟수의 곱으로 얻어진다. 총 생산시간내에 수행되는 열교환의 횟수는 각 제품이 생산되는 생산횟수와 같으므로 연간 총 에너지 절감비용은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{연간 에너지절감비용} = \sum cQ_k \times (T/T_{ref}) \quad (10)$$

여기서  $c$ 는 Table 2에 나타내어진 값으로 구할 수 있는 에너지비용 factor이며,  $cQ_k$ 는 열교환  $k$ 가 수행되었을 때 절감할 수 있는 에너지 비용을 나타낸다. 열교환으로 얻어지는 에너지 절감비용은 매년 똑같은 액수만큼 얻어진다고 가정하고, 회분식 공정 설비의 사용년수를  $n$ 년이라고 하였을 때,  $n$ 년간 총 에너지 회수비용은 위 식 (10)에  $n$ 을 곱한 액수이다.

본 연구에서의 목적은 회분식 공정 장치의 설비비용의 최소화과 회수되는 에너지비용의 최대화이므로 회분식 공정 전체설비의 사용년수를  $n$ 년이라고 가정하고, 식 (8)과 (10)을 함께 고려한 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{목적함수} = \text{minimize} \sum_{i=1}^M a_i V_i^{b_i} - n \sum cQ_k \times (T/T_{ref}) \quad (11)$$

#### 3-2. 열교환을 위한 생산계획

회분식 공정에서 두 개의 batch간에 countercurrent 방식으로 열교환을 이루기 위해서는 탱크사이 batch 이동간에 열교환이 이루어져야 한다. 따라서, 두 batch 이동시간은 서로 같은 시각에 이루어져야 하며, 이를 수학적으로 표현하기 위한 작업이 필요하다.

앞서 설명한 바와 같이 ZW policy를 따르는 회분식 공정에서는  $i$ -1번째 장치에서 제품  $p$ 가 빠져나와  $i$ 번째 장치로 이동하는 시각은 제품  $p$ 가 장치  $i$ 에서 공정을 시작하는 시각  $TI_{ip}$ 가 되며, 제품  $r$ 이  $j$ -1번째 장치에서 빠져나와  $j$ 번째 장치로 이동하는 시각은 제품  $r$ 이 장치  $j$ 에서 공정을 시작하는 시각  $TI_{jr}$ 가 된다. 이때, 각 batch가 서로 열을 필요로 하거나, 열을 내어놓고자 할 때 열교환의 가능성이 생기게 되며 이때의 최대 열교환 가능량은 식 (9)를 사용하여  $Q_{ip,jr}^{max}$ 로 계산되어진다. 두 batch간에 열교환을 이루기 위해서는 각각의 이동시각,  $TI_{ip}$ ,  $TI_{jr}$ 가 서로 같아야 하며, 만약 두 batch의 이동시각이 서로 다르다면, 당연히 두 batch의 열교환량  $Q_{ip,jr}$ 은 0가 된다. 0 또는 1의 값을 갖는 이산변수(binary variable),  $Y_{ip,jr}$ 과 두 batch간의 열교환량  $Q_{ip,jr}$ 은 다음과 같은 식으로 관계지을 수 있다.

$$Q_{ip,jr} - Q_{ip,jr}^{max} Y_{ip,jr} \leq 0 \quad (12)$$

여기서 이산변수  $Y_{ip,jr}$ 이 1의 값을 갖는다면 두 batch간에 열교환량

$Q_{ip,jr}$ 은  $Q_{ip,jr}^{max}$ 가 되며, 0의 값을 갖는다면 열교환이 이루어지지 않음( $Q_{ip,jr}=0$ )을 나타낸다. 또한 두 batch간에 열교환을 이루기 위해서는 두 batch의 이동시간  $TI_{ip}$ ,  $TI_{jr}$ 이 서로 같아야 하므로 이를 수학적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_{ip,jr} \cdot (TI_{ip} - TI_{jr}) = 0 \quad (13)$$

위 식 (13)에서 0-1 binary variable  $Y_{ip,jr}$ 이 1의 값을 갖게 되면 등호를 성립시키기 위하여 두 batch의 이동시간  $TI_{ip}$ ,  $TI_{jr}$ 은 서로 같아지게 되며,  $Y_{ip,jr}$ 이 0의 값을 갖게 되면 두 batch의 이동시간  $TI_{ip}$ ,  $TI_{jr}$ 이 서로 같은 값을 가질 필요가 없게 되어 우리가 원하는 바를 만족하고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 회분식 공정에서 열교환을 수학적으로 표현하기 위해서는 이산변수  $Y_{ip,jr}$ 의 사용이 필요하고, 따라서 열고자 하는 최적화 문제는 정수형 변수가 포함된 혼합정수 비선형 최적화 프로그램(MINLP)으로 나타내어진다.

#### 4. 적용 예제

다품종 회분식 공정에서의 열교환 가능성을 검토하기 위하여 열교환을 고려하지 않고 공정설계를 한 경우의 생산설비 비용과 열교환을 고려하였을 때 늘어난 생산설비 비용과 회수되는 에너지비용을 서로 비교하여 설명하고자 한다.

##### 4-1. 열교환을 고려하지 않은 공정설계

예제로써 주어진 공정은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 5개의 회분식 장치( $M=5$ )로써 3개의 서로 다른 제품( $N=3$ )을 생산해내는 다품종 회분식 공정이다. 각각의 제품의 1년치 생산량,  $R_p$ 는 Table 3에 나타난 바와 같으며, 1년간 공장운전시간은 8,000 hr로 가정한다. 각각의 제품이 장치마다 머무르는 공정시간,  $t_p$ (processing time)은 Table 4에 주어진 바와 같으며, 각각의 제품은 공정간에 열을 필요로 하기도 하고(cold stream), 열을 내놓을 필요가 있다(hot stream). 각 batch의 열용량, 주어진 온도, 원하는 최종 온도는 Table 5와 같다.

각 공정에 필요한 장비의 크기는 식 (7)로써 나타내어지며, 이때 각 제품에 필요한 장비마다의 size factor,  $S_p$ 는 Table 6에 주어졌다. 장비의 구입비용은 앞서 설명한 바와 같이  $a_i V_i^{b_i}$ 의 형태와 같은 지수 법칙으로 예측할 수 있으며, 이때 비용상수  $a_i$ ,  $b_i$ 는 Table 7에 주어진 바와 같다. 열교환을 전혀 하지 않는다고 가정하고 최적의 생산

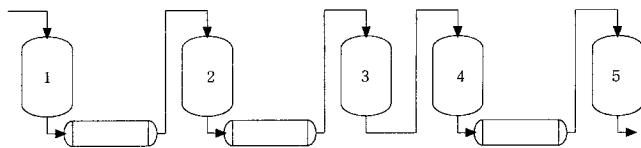


Fig. 3. Multiproduct batch processes consisting of 5 units.

Table 3. Production requirements,  $R_p$ [kg]

	$R_p$ [kg]
Product 1	4,000,000
Product 2	3,000,000
Product 3	3,500,000

Table 4. Batch processing time,  $t_p$ [hr]

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
Product 1	2	1	2	2	3
Product 2	3	1	3	2	2
Product 3	4	1	2	1	3

Table 5. Batch stream heat requirements

	C, [kJ/kg°C]	T <sup>i</sup> , [°C]	T <sup>f</sup> , [°C]	Status
Product 1(→unit 2)	3.9	320	110	hot
Product 1(→unit 5)	3.9	84	240	
Product 2(→unit 2)	3.2	360	110	
Product 3(→unit 5)	3.7	95	270	

Table 6. Volume factors,  $S_p$ [m<sup>3</sup>/kg]

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
Product 1	1.2	1.4	1.0	1.3	1.5
Product 2	1.1	1.2	1.5	1.2	1.3
Product 3	1.4	1.0	1.2	1.4	1.3

Table 7. Cost coefficients for equipments

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
$a_i$ [\$/m <sup>3</sup> ]	990	1062	2160	1404	666
$b_i$	0.65	0.40	0.52	0.34	0.67

계획 및 회분식 장비의 크기, 설비비용 등을 결정하기 위해서는 비선형 최적화 프로그램(NLP)의 해를 구하여야 하는데, 이때 목적함수는 식 (8), 제약조건은 식 (1)-(7)로서 주어진다.

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^M a_i V_i^{b_i}$$

subject to 식 (1)-(7)

위 비선형 최적화 프로그램은 상업용 프로그램인 GAMS/MINOS 5.3 [1]을 이용하여 풀 수 있다. Fig. 4는 위 예제의 해로서, 생산일정(process schedule)을 보여주고 있으며, 이때 생산주기,  $T_c$ 는 9[hr], 각 제품의 일회 생산량,  $B_p$ 는 각각 4504.5, 3378.4, 3941.4[kg]으로 구하여졌다. Table 8은 각 장비의 크기와 구입비용을 나타내고 있으며, 위 예제의 목적함수인 회분식 장비의 총 설비비용,  $\sum_{i=1}^M a_i V_i^{b_i}$ 은 \$757, 278로 구하여졌다.

##### 4-2. 열교환을 고려한 공정설계

위 4-1 예제의 결과인 Fig. 4에서는 열을 필요로 하거나(cold), 열을 내어놓는(hot) batch의 장치간 이동시간이 서로 달라서 열교환의

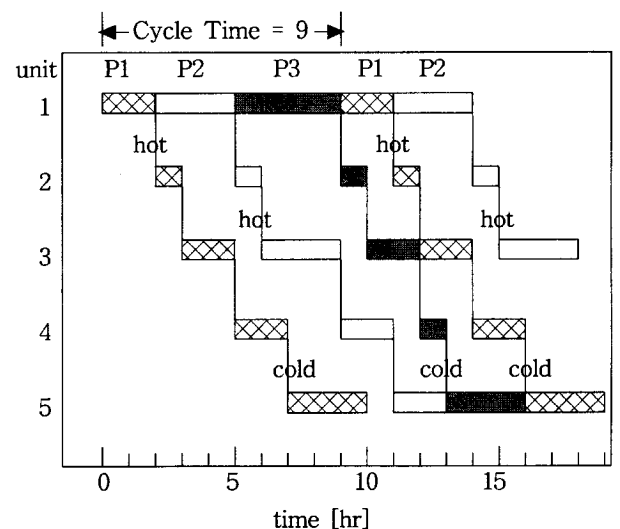


Fig. 4. Process schedule of multi-product batch process without heat integration.

Table 8. Equipment size and cost without heat integration

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
$V_p$ [m <sup>3</sup> ]	5,518	6,306	5,068	5,856	6,757
Cost[\$]	267,786	35,154	182,376	26,820	245,142

기회가 없다. 이때, 생산일정(process schedule)을 조정한다면, batch의 장치간 이동시간을 달리하여 열교환의 가능성을 갖게 되는데, ZW policy를 따를 경우 늘어난 생산주기로 인하여 각 제품의 일회 생산량이 늘어나게 되며 이는 곧 장치크기의 증가와 결국은 장치구입비용의 증가를 가져온다. 이런 경우 공정 설계 엔지니어들은 대부분 열교환의 가능성을 무시하고 공정설계를 마치는 경우가 많다. 본 예제에서는 앞서 설명한 열교환에 필요한 수학적인 식을 프로그램에 도입하여 총 장치구입비와 에너지회수 비용을 함께 고려한 최적화 문제를 풀고자 한다. 예제에 필요한 회분식 공정은 위 예제 4-1과 동일하며, 풀고자 하는 최적화문제에서는 열교환으로 얻어지는 에너지회수비용을 제외한 총 설비비용을 최소화하려고 한다. 이때 얻어지는 에너지회수비용은 총 생산시간내에 행해지는 열교환으로 얻어지는 열교환량에 해당하는 스팀비용과 냉각수비용의 합이다. 문제에 주어진 조건에 의하여, 278 °C 스팀을 사용한다고 가정하였으며, 따라서 열교환에 의해 회수되는 에너지비용 factor,  $c$ 는  $9.9 \times 10^{-6}$  [\$/kJ]로 가정한다. 또한, 열교환으로 얻어지는 에너지회수비용은 매년 같으며, 회분식설비의 사용년수,  $n$ 은 10년이라고 가정한다. 따라서, 풀고자 하는 최적화문제의 목적함수는 식 (11), 제약조건은 식 (1)-(7), (9), (12)-(13)이 된다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{i=1}^M a_i V_i^{h_i} - n \sum c Q_{p,jr} \times (T/T_{cr}) \\ & \text{subject to } \text{식 (1)-(7), (9), (12)-(13)} \end{aligned}$$

위 혼합정수 비선형 최적화 프로그램(MINLP)을 상업용 프로그램 GAMS/DICOPT++를 이용하여 해를 구한 후, 변경된 생산일정을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 열교환의 기회를 갖기 위하여 생산주기(cycle time,  $T_c$ )가 늘어났다. 늘어난 생산주기는 곧 제품의 일회 생산량,  $B_p$ 의 증가를 나타내며, 늘어난  $B_p$ 는 각각 6006, 4505, 5255[kg]으로 구하여졌다. 이에 따라서 늘어난 각 장치의 필요한 크기와 구입비용은 Table 9에 나타내었으며, 이때 회분식장치의

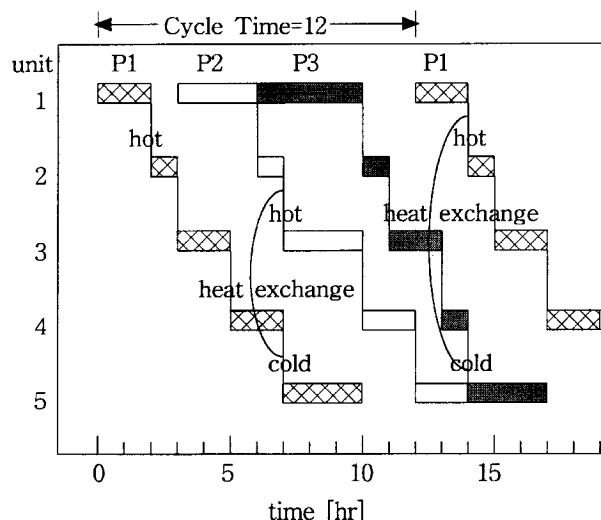


Fig. 5. Modified schedule of multi-product batch process for heat integration.

Table 9. Increased equipment size and cost for heat integration

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
$V_p$ [m <sup>3</sup> ]	7,357	8,408	6,758	7,808	9,009
Cost[\$]	322,842	39,446	211,816	29,569	297,240

총 구입비용은 \$900,913으로서 열교환을 고려하지 않은 경우보다 \$143,635 증가하였다.

Fig. 5에서 보여진 수정된 생산일정으로써 얻어지는 열교환은 제품 2가 세 번째 장치에 유입되는 hot stream과 제품 1이 다섯 번째 장치에 유입되는 cold stream과의 열교환, 제품 1이 두 번째 장치에 유입되는 hot stream과 제품 3이 다섯 번째 장치에 유입되는 cold stream과의 열교환 두 가지가 있으며 열교환량,  $Q_{p,jr}$ 은 각각  $3.6 \times 10^6$ ,  $3.4 \times 10^6$  [kJ]이며, 이로 인해 얻는 연간 에너지 회수비용은 \$46,154(회분식 장치비용의 5%)이다. 회분식설비의 사용년수를 10년이라고 가정한다면, 10년간 회수되는 에너지비용은 \$461,540으로서 늘어난 초기 설비투자비용보다 \$317,905만큼 많은 것을 알 수 있다. 따라서, 예로 든 바와 같은 회분식 공정의 경우 생산일정을 변경하여 열교환의 기회를 가졌을 때 초기 설비비용은 늘어나지만, 해를 거듭할수록 회수되는 에너지비용이 누적되어 회분식설비의 사용년수 안에 늘어난 초기 설비비용을 능가하는 경제성을 갖게 된다.

## 5. 결 론

다품종 회분식 공정에서의 열교환을 가능하게 하기 위하여 생산일정을 변경하였다. 열교환에 사용된 방법으로는 각 제품의 장치간 이동시간에 열교환을 하는 countercurrent 열교환방식을 가정하였으며, 회분식 공정의 운전방법으로는 엄격한 ZW policy를 사용한다고 가정하였다. 제품이 공정을 끝낸 후 장치내에서 무한정, 또는 일정시간 머무를 수가 있다면(unlimited wait policy), 생산주기를 늘리지 않고 생산일정을 조정할 수도 있겠으나, 문제의 보편성을 유지하기 위하여, 본 연구에서는 회분식 공정의 가장 일반적인 운전방법인 ZW policy를 적용하여 문제를 풀어보았다. 본 논문예로 든 공정은 5개의 장치로써 3개의 서로 다른 제품을 생산해내는 다품종 회분식 공정으로서, 생산일정을 조정하여 열교환의 가능성을 갖게 하였으며, 이로 인해 10년간 회수되는 에너지비용이 늘어난 초기 설비투자비용을 능가하는 경제성을 갖는 것을 확인하였다. 이러한 작업은 수학적인 모델링을 통한 혼합정수 비선형 최적화 프로그램의 결과로서 얻어졌다. 실제의 회분식 공정에서는 더 많은 장치와 더 많은 에너지회수 기회가 주어질 것으로 기대된다. 이러한 경우에 본 연구에서 유도된 프로그램에서 사용되는 변수, 특히 이산(binary)변수의 수가 크게 증가할 것이며, 최적화문제의 풀이를 위한 상업용 프로그램만을 이용하여 문제를 해결하기에는 어려움이 있을 것으로 예상된다. 따라서 문제의 크기가 큰 경우에는 적절한 최적화 풀이법의 적용이 요구된다.

## 감 사

이 논문은 한국과학재단(과제번호 96-0502-08-01-3)과 공정산업의 지능자동화연구센터(ARC)의 부분적인 재정지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 사용기호

$a_i$  : empirical coefficient used for equipment cost [\$/m<sup>3</sup>]

$b_i$	: empirical exponent used for equipment cost
$C$	: heat capacity of batch stream [kJ/kg°C]
$c$	: steam and cooling water cost factor [\$/kJ]
$B_p$	: batch size of product p [kg]
$n$	: useful life year of batch process [year]
$R_p$	: production requirement of product p over year [kg]
$S_{ip}$	: equipment size factor of unit i for product p [m <sup>3</sup> /kg]
$T$	: total production time over year [hr]
$T_{ct}$	: product cycle time [hr]
$t_{ip}$	: batch processing time of batch p on unit i [hr]
$TE_{ip}$	: finishing time of batch p on unit i
$TI_{ip}$	: starting time of batch p on unit i
$T_c^s$	: starting temperature of cold stream [°C]
$T_h^s$	: starting temperature of hot stream [°C]
$T_c^d$	: desired temperature of cold stream [°C]
$T_h^d$	: desired temperature of hot stream [°C]
$Q_{ip,jr}$	: heat exchange amount between batch p entering unit i and batch r entering unit j [kJ]
$Q^{max}$	: maximum heat exchange amount between two batch stream [kJ]
$V_i$	: equipment size of unit i [m <sup>3</sup> ]
$Y_{ip,jr}$	: 0-1 binary variable for heat exchange between two batch streams with transfer time $TI_{ip}$ and $TI_{jr}$ , respectively

#### 그리스 문자

$\theta_{ip}$	: idle time after processing of batch p on unit i
$\Delta T_{min}$	: minimum approach temperature [°C]

#### 약자

GAMS	: general algebra modeling system
MINLP	: mixed integer nonlinear programming
NLP	: nonlinear programming

UW	: unlimited wait
ZW	: zero wait

#### 참고문헌

1. Brooke, A., Kendrick, D. and Meeraus, A.: "GAMS User's Manual", Scientific Press(1988).
2. Corominas, J. A., Espuna, A. and Puigjaner, L.: *Computers Chem. Engng.*, **18**, 1043(1994).
3. Jung, S.-H., Lee, I.-B., Yang, D. R. and Chang, K. S.: *Korean J. Chem. Eng.*, **11**, 162(1994).
4. Kemp, I. C. and Deakin, A. W.: *Chemical Engng. Res.*, **67**, 495 (1989).
5. Lee, B. and Reklaitis, G. V.: *Computers Chem. Engng.*, **19**, 883 (1995).
6. Mignon, D. and Hermia, J.: *Computers Chem. Engng.*, **S17**, S51 (1993).
7. Papageorgiou, L. G., Shah, N. and Pantelides, C. C.: *Ind. Engng. Chem. Res.*, **33**, 3168(1994).
8. Peters, M. S. and Timmerhaus, K. D.: "Plant Design and Economics for Chemical Engineers", McGraw-Hill, New York, NY(1991).
9. Rippin, D. W. T.: *Computers Chem. Engng.*, **7**, 43(1983).
10. Vakliava-Bancheva, N., Ivanov, B. B., Shah, N. and Pantelides, C. C.: *Computers Chem. Engng.*, **20**, 989(1996).
11. Vaselenak, J. A., Grossmann, I. E. and Westerberg, A. W.: *Ind. Engng. Chem. Process Des. Dev.*, **25**, 357(1986).
12. Wellons, M. C. and Reklaitis, G. V.: *Computers Chem. Engng.*, **13**, 213(1989).
13. Lee, H.-K., Jung, J. H., Lee, I.-B. and Chang, K. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 581(1994).
14. Yoo, D. J., Lee, H.-K., Jung, J. H. and Lee, I.-B.: *HWAHAK KONGHAK*, **34**, 742(1996).