

다품종 생산용 회분식 공장의 예비 설계를 위한 최적 합성

이호경 · 정재학* · 문 일** · 이인범†

포항공과대학교 화학공학과

*영남대학교 화학공학과

**연세대학교 화학공학과

(1994년 7월 11일 접수, 1994년 11월 28일 채택)

Optimal Synthesis for Preliminary Design of Multiproduct Batch Plants

Ho-Kyung Lee, Jae Hak Jung*, Il Moon** and In-Beum Lee†

Dept. of Chem. Eng., Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

**Dept. of Chem. Eng., Yeung Nam University*

***Dept. of Chem. Eng., Yonsei University*

(Received 11 July 1994; accepted 28 November 1994)

요 약

공정 합성 문제에 있어서 새로이 평행하게 장치를 추가하는 경우 그 장치를 사용하는 방법에 따라 두가지로 분류할 수 있다. 하나는 이상조업이고 나머지 하나는 동상조업이다. 그러나, 지금까지 회분식 공정의 초기 합성 문제를 다루는 논문에서는 이상조업으로 사용되는 경우만을 다루었다. 이 논문에서는 혼합정수 비선형 프로그램, 경험적인 법칙, 그리고 비선형 프로그램을 이용하여 이상조업과 동상조업을 동시에 고려한 공정 합성 문제를 다룬다. 이러한 방법의 유용성은 네개의 문헌 예제를 통해 증명한다.

Abstract—In case of adding new equipments in parallel in the process synthesis problems, there are two operating modes to use the equipments. One is in sequence(out of phase) mode and the other is in phase mode. But, in the papers published so far, only in sequence mode has been considered in synthesis problems for the preliminary design of batch processes. In this paper, using a MINLP, heuristics and a NLP, we deal with the problems where in phase mode is also considered. The effectiveness of this method is verified by solving four literature problems.

1. 서 론

다제품 생산용 회분식 공정은 최근에 들어서 고분자, 생화학, 제약, 식품, 그리고 음료 공정과 같은 화학 공정 산업의 부문에서 많이 적용되고 있기 때문에 관심을 끌고 있다. 예를 들어 1992년도의 미국 내의 화학 공정 산업을 조사해 본 결과, 제약 공정의 약 80%와 식품과 음료 공정의 약 65%가 회분식 공정이라는 통계가 나

왔다(Reeve [8]). 따라서, 화학 공정 산업의 많은 부분을 차지하는 회분식 공정에 대한 연구는 미국과 영국 등의 선진국 뿐만 아니라 여러 개발 도상국에서 진행되고 있다.

본 논문에서 다루어질 내용은 회분식 공정의 합성에 서 평행하게 장치를 추가하는 문제에 관한 것인데 지금까지 발표된 논문에서는 평행하게 추가하는 위치, 추가 장치의 조업형태 그리고 그 크기를 구하기 위해서 수

학적인 방법(Kocis와 Grossmann[5], Briewar와 Grossmann[1])과 경험적인 방법(Yeh와 Reklaitis[9], Patel과 Mah[7])으로 문제를 해결하려고 시도해 왔다. 수리적인 방법은 주로 혼합정수 비선형 프로그램을 이용하여 그 해를 구하였는데 지금까지의 논문에서는 수식 모델의 한계성으로 장치를 평행하게 추가할 때 그 장치가 이상(in sequence mode)으로만 조업된다고 가정하여 문제를 풀었다. 그러나 이렇게 구해진 합성 구조는 장치를 평행하게 추가해서 구할 수 있는 최적 합성 구조와 비슷한 결과를 얻을 수 있지만 완벽한 결과로는 볼 수 없다. 왜냐하면 평행하게 추가된 장치가 경우에 따라서는 동상(in phase mode)으로 조업될 기회를 잃기 때문이다. 그래서 여기서는 먼저 혼합정수 비선형 프로그램을 이용하여 이상조업으로 추가하는 위치를 결정하고 이 결정된 위치에서 제약 일회 생산량을 체크해봄으로써 경우에 따라서는 동상조업의 가능성을 타진하여 좀 더 나은 합성 구조를 구한다. 이러한 과정은 네 개의 예제를 통해서 보다 자세히 설명된다.

2. 회분식 공정의 예비 설계

회분식 공정의 예비 설계의 목적은 크게 최적 생산 공정도와 최적 조업을 위해서 필요한 설계변수를 구하는 것이다. 여기서 말하는 설계변수란 장치의 크기, 제약 일회 생산량(LBS, Limiting Batch Size), 그리고 제약 회전 시간(LCT, Limiting Cycle Time)이다. 이러한 문제를 풀기 위해서 주어지는 데이터는 생산품의 갯수, 각 생산품이 최종 제품이 될 때까지 거치는 생산 단계, 각 제품의 수요, 각 장치에 대한 크기 인자, 공정 시간 그리고 총 조업 시간이다. 이렇게 주어진 데이터를 가지고 결정해야 할 것은 크게 세가지인데 합성문제, 설계문제, 그리고 생산 계획 문제이다. 합성문제에서 세부적으로 결정해야 할 것은 작업을 장치에 할당하는 것과 평행하게 장치를 추가하고 중간 저장 탱크의 추가 위치를 결정하는 것이고 설계 문제에서는 합성문제에서 결정된 공정 구조를 구성하는 장치의 크기들을 결정한다. 그리고 생산 계획에서는 단순 생산 계획(Single Product Campaign)과 혼합 생산 계획(Mixed Product Campaign)으로 대별되는 방법 중의 한가지를 선택해서 제약 조건에 추가하게 된다. 여기서는 이미 발표된 문헌 예제들과 비교하기 위해서 단순 생산 계획으로 제품을 생산하고 반연속식 설비를 고려하지 않았다.

3. 최적 합성

이 논문에서 다루게 될 내용은 합성문제에서 장치를

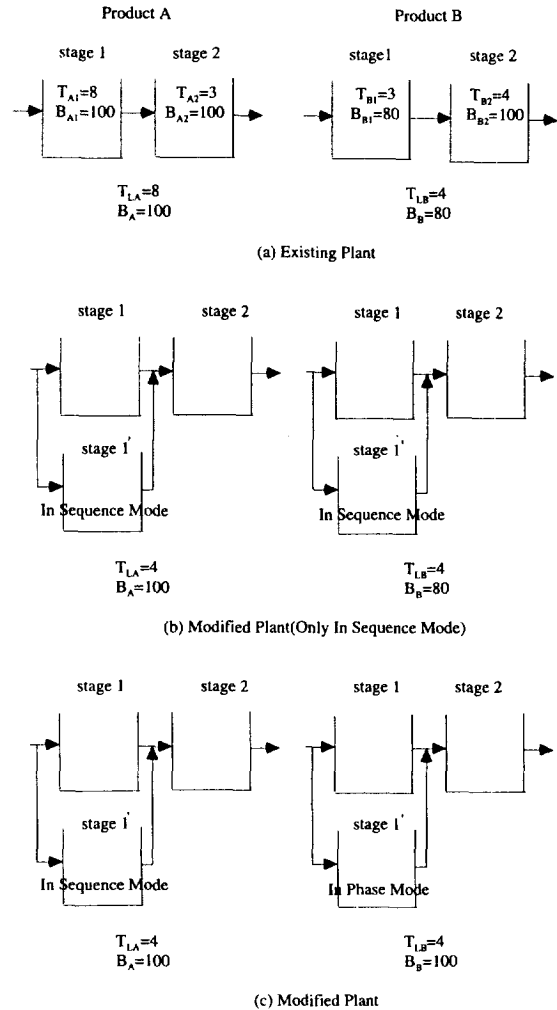


Fig. 1. Example problem.

평행하게 추가해서 최소의 자본비로 목표하는 생산량을 달성하는 장치의 크기를 결정하는 문제이다. 지금까지 이러한 문제를 풀기 위한 방법론으로는 수식적 모델을 사용하여 혼합정수 비선형 프로그램을 푸는 방법과 경험적인 방법을 사용하는 것이다. 장치를 평행하게 추가해서 조업하는 방식에는 동상조업과 이상조업이 있는데 동상조업이란 두 개의 평행한 장치에 동시에 물질을 장입하여 제약 일회 생산량을 늘리는 조업방법이고 이상조업은 같은 시간대가 아니라 다른 시간대에 물질을 장치에 장입하여 제약 회전 시간을 감소시키는 조업 형태이다. 즉, 동상조업은 제약 일회 생산량을 늘려 생산량을 증가시키는 것이고 이상조업은 제약 일회 시간을 줄여 생산성을 높이는 조업 방식이다. 예제를 통해서

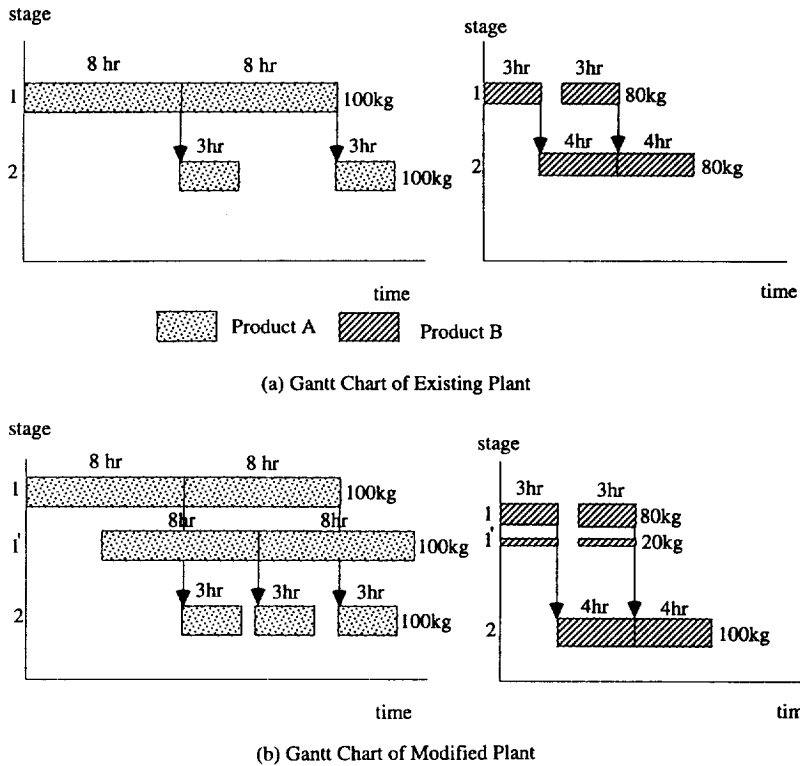


Fig. 2. Gantt chart of exmple problem.

이러한 조업형태를 살펴보면 Fig. 1의 (a)에서 보듯이 설명할 예제는 두개의 생산 단계를 가지면서 두개의 제품을 생산하는 회분식 공정이다. 예제에서는 제품 A를 생산할 때 첫번째 단계에서 시간 제약이 걸리고 제품 B를 생산할 때는 첫번째 단계에서 생산량 제약이 걸린다. Fig. 2(a)의 갠트 차트를 보면 제품 A의 경우 첫번째 단계에서의 생산 시간때문에 두번째 생산 단계에서 다섯 시간 썩의 장치 비사용(idle) 시간이 생기게 된다. 또한 제품 B의 생산시에는 두번째 장치가 100 kg까지 생산할 수 있는데도 첫번째 장치의 생산제약으로 20 kg의 가능한 생산 능력을 쓰지 못하고 있다. 지금까지 발표된 논문에서 다룬 혼합정수 비선형 프로그램을 이용하면 Fig. 1의 (b)와 같이 첫번째 단계의 장치를 이상으로 추가하는 구조를 얻게 된다. 그러나 이러한 구조를 가지고는 제품 A를 생산할 때는 평행하게 추가된 장치가 이상으로 조업됨으로써 제약 회전 시간을 절반으로 줄이지만 제품 B의 생산시에는 평행하게 추가된 장치가 아무런 효과도 거두지 못한다. 그러므로, 지금까지의 수학적 접근방법으로는 제품 B의 생산시에 걸리는 생산량 제약을 고려하지 못하였다. 이런 결점을 보완하기 위해서 여기서 제시하는 방법은 먼저 기존의

혼합정수 비선형 프로그램으로 이상으로 추가되는 구조를 합성하는데 아래의 목적함수와 제약조건은 Kocis와 Grossmann[5] 그리고 Birewar와 Grossmann[1]이 최적 합성 및 설계에 사용한 혼합정수 비선형 프로그램이다.

$$\text{Min. } C = \sum_{j=1}^M N_j \alpha_j V_j^{\beta_j} \quad (1)$$

Subject to

$$V_j \geq S_{ij} B_i \quad i=1, N, j=1, M \quad (2)$$

$$T_{Li} \geq \frac{t_{ij}}{N_j} \quad i=1, N, j=1, M, N_j=1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{B_i} T_{Li} \leq H \quad (4)$$

$$V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \quad (5)$$

$$B_i \geq 0, T_{Li} \geq 0 \quad (6)$$

위 식에서 평행하게 놓이는 장치의 수를 나타내는

N_j 가 정수형 변수이다. (1)은 자본비에 대한 목적 함수이고 (2)는 최분식 설비의 부피, (3)은 LCT 그리고 (4)는 생산량에 따른 총 조업시간에 관한 제약 조건이다. 나머지 두개의 제약 조건은 최분식 설비의 선택 가능한 범위와 LCT T_{Li} , LBS B_i 가 양수임을 제한하는 것이다. 이 혼합정수 비선형 프로그램을 풀기 위해서 DICOPT++ 이용해서 IBM RS/6000에서 문제를 풀었다 (Brooke 등[2]).

다음 과정은 Lee 등[3, 4]이 제안한 경험적인 법칙이 적용된다. 제안된 경험적인 법칙은 다음과 같다.

제안 1

제품 i 를 생산할 때 공정을 분석하여 LCT가 걸리는 단계에서는 장치를 병행하게 추가하되 이상조업으로 한다.

제안 2

제품 i 를 생산할 때 공정을 분석하여 LBS가 걸리는 단계에서는 장치를 병행하게 추가하되 동상조업을 하여야 한다.

병행하게 추가된 장치가 각 제품의 생산에서 이상으로 조업되어 제약 일회 시간을 줄이는지의 여부를 검토한다. 그리고 만약 병행하게 추가된 장치가 제약 회전 시간의 감소에 아무런 효과가 없으면 제약 일회 생산량을 증가시킬 수 있는지 여부를 검토해서 제약 일회 생산량을 증가시킬 수 있으면 혼합정수 비선형 프로그램에서 결정된 구조와 수정된 조업형태를 고려한 비선형 프로그램을 작성하여 더 나은 결과를 얻는다. 아래의 목적 함수와 제약 조건은 더 나은 설계값을 구하기 위한 비선형 프로그램을 나타내고 있다. 동상조업을 고려한 비선형 프로그램을 풀기 위해서 GAMS의 MINOS 5.3을 이용하였다(Brooke 등 [2]).

$$\text{Min. } C = \sum_{j=1}^M N_j^{\text{opt}} \alpha_j V_j^{\beta_j} \quad (7)$$

최분식 설비의 부피에 관한 제약 조건 중에서 만약 j 번째에 병행하게 추가된 장치가 i 제품을 생산할 때 동상조업으로 이용될 수 있으면 다음 제약 조건 (8)로 수정된다.

$$V_j \geq \frac{S_{ij}}{N_j^{\text{opt}}} B_i \quad \text{for } i=i \text{ and } j=j \quad (8)$$

$$V_j \geq S_{ij} B_i \quad i=1, N \text{ and } i \neq i, j=1, M \text{ and } j \neq j$$

$$T_{Li} \geq \frac{t_{ij}}{N_j^{\text{opt}}} \quad i=1, N, j=1, M, N_j^{\text{opt}}=1, 2, 3 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{B_i} T_{Li} \leq H$$

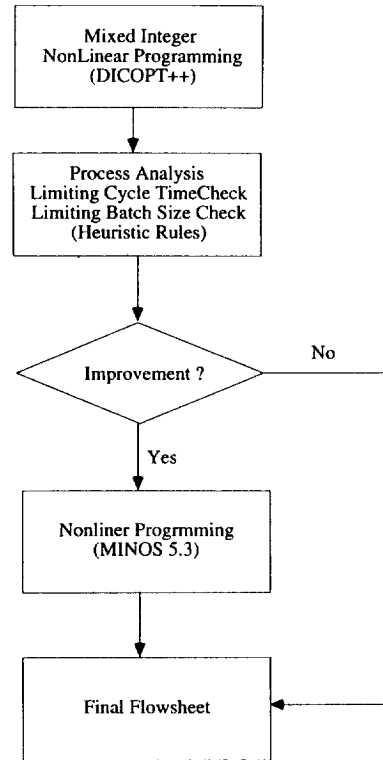


Fig. 3. Flowchart of our approach.

$$V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max}$$

$$B_i \geq 0, T_{Li} \geq 0$$

본 논문에서의 경험적인 법칙으로 Fig. 1의 예제 공정을 분석하여 동상조업을 고려한 최종적인 구조는 Fig. 1의 (c)와 같고 Fig. 2의 (b)와 같은 갠트 차트를 구성할 수 있다. 본 논문에서 제시되는 방법을 순서대로 정리해 보면 Fig. 3과 같다.

4. 적용 사례

본 논문에서 제시한 방법의 효율성을 증명하기 위해서 Kocis와 Grossmann[5], Birewar와 Grossmann[1] 그리고 Patel 등[6]이 푼 네개의 문헌 예제에 적용한다.

4-1. 문제 1(Kocis와 Grossmann[5])

문제 1은 세개의 장치에서 두개의 제품을 생산하는 공정이다. Table 1은 문제 1의 데이터이다. 먼저 혼합정수 비선형 프로그램을 이용하여 이상으로 조업되는 경우만 고려한 합성구조 및 최적 설계를 해보면 Fig. 4의 공정도와 장치의 크기, 제약 회전 시간 그리고 제약 일회

Table 1. Data for problem 1

(a) Size factors

Layout	Mixer	Reactor	Centrifuge
A	2	3	4
B	4	2	3

(b) Processing times(h)

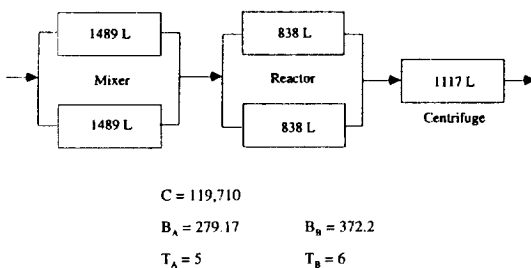
Layout	Mixer	Reactor	Centrifuge
A	8	10	4
B	6	12	3

(c) Projected market demand

i	Q_i , kg
A	200,000
B	150,000

(d) Unit data

Layout	Mixer	Reactor	Centrifuge
Cost coefficient	250	500	340
Cost exponent	0.6	0.6	0.6

**Fig. 4. Flowsheet of problem 1 by MINLP.**

생산량을 구할 수 있다. 그러면 여기에서 구해진 장치의 조업 형태를 검토해 보면 Table 2의 (a), (b)와 같이 이상으로 조업이 되는 곳과 그 쓰임을 알 수 있다. 이러한 조업 분석을 통해 제품 B를 생산할 때 첫번째 생산 단계에서 평행하게 추가된 장치는 이상으로 추가될 때는 조업에 아무런 효과를 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 그러므로 이런 위치에서 제약 일회 생산량을 줄일 수 있는 가능성을 검토해 볼 필요가 있다. 결과적으로 Table 2(c)의 수정된 조업 방식에 근거하는 비선형 프로그램 작성하여 Fig. 5의 장치크기를 가진 공정도를 얻게 된다. 전체적인 설계값이 새로이 제시한 방법의 의해 11% 정도 감소함을 알 수 있다.

4-2. 문제 2(Birewar와 Grossmann[1])

문제 2는 세개의 생산 단계에서 A, B, C 세개의 제품을

Table 2. Process analysis of problem 1

(a) Operating mode by MINLP

Stage	Mixer	Reactor	Centrifuge
Product			
A	In Sequence	In Sequence	-
B	In Sequence	In Sequence	-

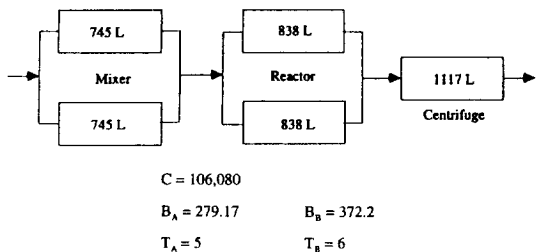
(b) LCT, LBS check

Stage	Mixer	Reactor	Centrifuge
Product			
A	O	O	-
B	X	O	-

O: LCT Reduction, X: No effect

(c) Modified operating mode

Stage	Mixer	Reactor	Centrifuge
Product			
A	In Sequence	In Sequence	-
B	In Phase	In Sequence	-

**Fig. 5. Flowsheet of problem 1 by NLP.****Table 3. Data for problem 2**

(a) Size factors

Layout	Mixer	Reactor	Tray dryer
A	2	1.4	3.5
B	2.5	1.5	4
C	3	1.4	5

(b) Processing times(h)

Layout	Mixer	Reactor	Tray dryer
A	2	12	9
B	2	7	12
C	7	13	3

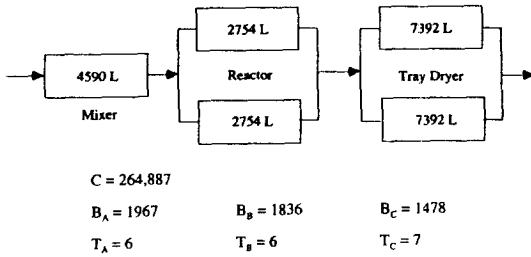
(c) Projected market demand

i	Q_i , kg
A	500,000
B	500,000
C	600,000

Table 3. Continued

(d) Unit data

Layout	Mixer	Reactor	Centrifuge
Cost coefficient	150	250	175
Cost exponent	0.6	0.6	0.6

**Fig. 6. Flowsheet of problem 2 by MINLP.****Table 4. Process analysis of problem 2**

(a) Operating mode by MINLP

Stage	Mixer	Reactor	Tray dryer
Product			
A		In Sequence	In Sequence
B	-	In Sequence	In Sequence
C	-	In Sequence	In Sequence

(b) LCT, LBS check

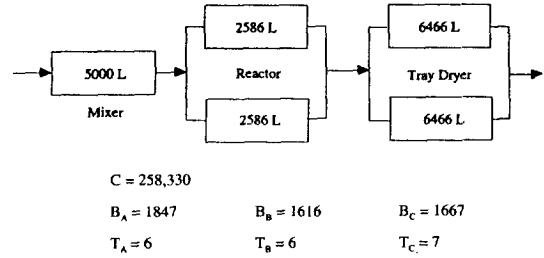
Stage	Mixer	Reactor	Tray dryer
Product			
A		O	O
B	-	O	O
C	-	O	X

O: LCT Reuction, X: No effect

(c) Modified operating mode

Stage	Mixer	Reactor	Tray dryer
Product			
A		In Sequence	In Sequence
B	-	In Sequence	In Sequence
C	-	In Sequence	In Phase

생산하는 회분식 공장이다. Table 3의 데이터를 이용하여 혼합정수 비선형 프로그램을 풀어 보면, Fig. 6의 공정도와 공정 변수 값을 얻게 된다. 문제 1과 같은 과정으로 이상으로 평행하게 작업되는 장치가 아무런 효과를 주지 않는 곳을 Table 4(b)와 같이 찾아내고 Table 4(c)의 새로운 조업 형태를 제시함으로써 비선형 프로그램으로 보다 나은 설계값을 구하게 된다. Fig. 7은

**Fig. 7. Flowsheet of problem 2 by NLP.****Table 5. Data for problem 3**

(a) Size factors

i \ j	1	2	3	4	5	6
A	7.9	2.0	5.2	4.9	6.1	4.2
B	0.7	0.8	0.9	3.4	2.1	2.5
C	0.7	2.6	1.6	3.6	3.2	2.9
D	4.7	2.3	1.6	2.7	1.2	2.5
E	1.2	3.6	2.4	4.5	1.6	2.1

(b) Processing times(h)

i \ j	1	2	3	4	5	6
A	6.4	4.7	8.3	3.9	2.1	1.2
B	6.8	6.4	6.5	4.4	2.3	3.2
C	1.0	6.3	5.4	11.9	5.7	6.2
D	3.2	3.0	3.5	3.3	2.8	3.4
E	2.1	2.5	4.2	3.6	3.7	2.2

(c) Projected market demand

i	Q_i , kg
A	250,000
B	150,000
C	180,000
D	160,000
E	120,000

(d) Unit data

	1	2	3	4	5	6
Cost coefficient	250	250	250	250	250	250
Cost exponent	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

비선형 프로그램에서 구한 장치 크기와 제약 일회 생산량 그리고 제약 회전 시간을 나타내고 있다. 전체적인 자본비를 Bireware와 Grossmann이 제시했던 값인 264,887에서 258,330으로 줄일 수 있었다.

4-3. 문제 3(Kocis와 Grossmann[5])

이 문제는 여섯개의 생산단계를 가지는 회분식 공장

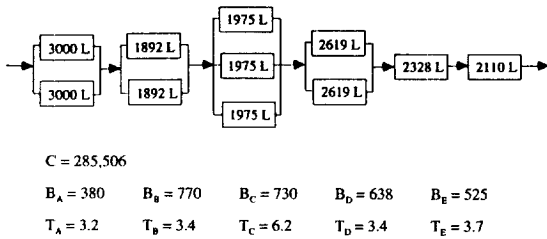


Fig. 8. Flowsheet of problem 3 by MINLP.

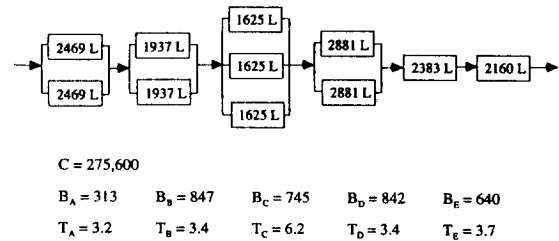


Fig. 9. Flowsheet of problem 3 by NLP.

Table 6. Process analysis of problem 3

(a) Operating mode by MINLP

Product \ Stage	1	2	3	4	5	6
A	S	S	S	S	-	-
B	S	S	S	S	-	-
C	S	S	S	S	-	-
D	S	S	S	S	-	-
E	S	S	S	S	-	-

(b) LBS, LCT check

Product \ Stage	1	2	3	4	5	6
A	O	O	O	O	-	-
B	O	O	O	O	-	-
C	X	O	X	O	-	-
D	X	X	O	X	-	-
E	X	X	O	X	-	-

O: LCT reduction, X: No effect

(c) Modified operating mode

Product \ Stage	1	2	3	4	5	6
A	S	S	S	S	-	-
B	S	S	S	S	-	-
C	S	S	S	S	-	-
D	P	S	S	S	-	-
E	S	P	S	S	-	-

In all of the tables the following notation is used: S refers to in sequence mode, P in phase mode.

에서 다섯개의 다른 제품을 생산하는 공정에 관한 것이다. Table 5는 이 문제에 대한 크기 인자, 각 단계에서의 생산 시간, 예측되는 수요량 그리고 장치에 대한 비용 데이터이다. 본 논문에서 제시하는 순서도에 의해서 먼저 이상조업을 고려한 혼합정수 비선형 프로그램을 풀고 Table 6의 공정 분석을 통해 최종적으로 Fig. 9와 같은 공정도를 얻는다. 장치에 대한 초기 설계 자

Table 7. Data for problem 4

(a) Size factors

$i \setminus j$	1	2	3
A	1.2	1.4	1.0
B	1.5	1.0	1.0
C	1.1	1.2	1.0
D	1.5	1.8	1.0
E	1.3	3.0	1.0
F	1.4	2.1	1.0
G	1.2	5.2	1.0
H	1.1	2.1	1.0
I	1.3	1.1	1.0
J	1.4	1.5	1.0
K	1.5	1.7	1.0
L	1.2	1.9	1.0
M	1.5	3.7	1.0
N	1.8	2.2	1.0
O	1.5	2.7	1.0

(b) Processing times(h)

$i \setminus j$	1	2	3
A	3.0	1.0	4.0
B	6.0	4.0	8.0
C	2.0	2.0	4.0
D	2.0	1.5	3.0
E	1.0	2.0	2.5
F	2.0	2.5	5.0
G	1.0	0.5	7.0
H	4.0	3.5	3.0
I	2.0	3.0	2.0
J	2.5	2.0	4.0
K	3.0	2.0	4.0
L	3.5	4.5	6.5
M	5.0	7.0	9.0
N	4.5	3.0	4.0
O	3.0	2.0	6.0

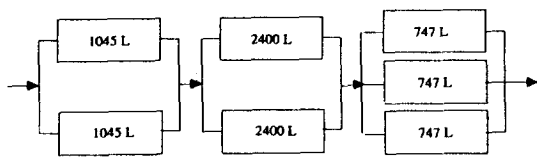
Table 7. Continued

(c) Projected market demand

i	Q _i , kg	i	Q _i , kg
A	400,000	I	200,000
B	300,000	J	190,000
C	100,000	K	150,000
D	350,000	L	120,000
E	330,000	M	90,000
F	270,000	N	70,000
G	250,000	O	50,000
H	220,000		

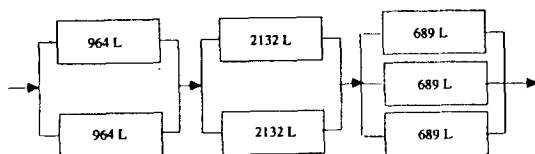
(d) Unit data

	1	2	3
Cost coefficient	592	582	1200
Cost exponent	0.65	0.39	0.52



C = 245,110

$B_A = 747$	$B_B = 697$	$B_C = 747$	$B_D = 697$	$B_E = 747$	$B_F = 747$
$B_G = 462$	$B_H = 747$	$B_I = 747$	$B_J = 747$	$B_K = 697$	$B_L = 747$
$B_M = 649$	$B_N = 581$	$B_O = 697$			
$T_A = 1.5$	$T_B = 3$	$T_C = 1.33$	$T_D = 1$	$T_E = 1$	$T_F = 1.67$
$T_G = 2.33$	$T_H = 2$	$T_I = 1.5$	$T_J = 1.33$	$T_K = 1.5$	$T_L = 2.25$
$T_M = 3.5$	$T_N = 2.25$	$T_O = 2$			

Fig. 10. Flowsheet of problem 4 by MINLP.

C = 233,870

$B_A = 689$	$B_B = 643$	$B_C = 689$	$B_D = 643$	$B_E = 689$	$B_F = 689$
$B_G = 689$	$B_H = 877$	$B_I = 742$	$B_J = 689$	$B_K = 643$	$B_L = 689$
$B_M = 576$	$B_N = 536$	$B_O = 643$			
$T_A = 1.5$	$T_B = 3$	$T_C = 1.33$	$T_D = 1$	$T_E = 1$	$T_F = 1.67$
$T_G = 2.33$	$T_H = 2$	$T_I = 1.5$	$T_J = 1.33$	$T_K = 1.5$	$T_L = 2.25$
$T_M = 3.5$	$T_N = 2.25$	$T_O = 2$			

Fig. 11. Flowsheet of problem 4 by NLP.**Table 8. Process analysis of problem 4**

(a) Operating mode by MINLP

Stage	1	2	3
Product			
A	In Sequence	In Sequence	In Sequence
B	In Sequence	In Sequence	In Sequence
C	In Sequence	In Sequence	In Sequence
D	In Sequence	In Sequence	In Sequence
E	In Sequence	In Sequence	In Sequence
F	In Sequence	In Sequence	In Sequence
G	In Sequence	In Sequence	In Sequence
H	In Sequence	In Sequence	In Sequence
I	In Sequence	In Sequence	In Sequence
J	In Sequence	In Sequence	In Sequence
K	In Sequence	In Sequence	In Sequence
L	In Sequence	In Sequence	In Sequence
M	In Sequence	In Sequence	In Sequence
N	In Sequence	In Sequence	In Sequence
O	In Sequence	In Sequence	In Sequence

(b) LCT, LBS check

Stage	1	2	3
Product			
A	O	O	O
B	O	O	O
C	O	O	O
D	O	O	O
E	O	O	O
F	O	O	O
G	O	X	O
H	O	O	X
I	O	O	X
J	O	O	O
K	O	O	O
L	O	O	O
M	O	O	O
N	O	O	O
O	O	O	O

O: LCT Reduction, X: No effect

(c) Modified operating mode

Stage	1	2	3
Product			
A	In Sequence	In Sequence	In Sequence
B	In Sequence	In Sequence	In Sequence
C	In Sequence	In Sequence	In Sequence
D	In Sequence	In Sequence	In Sequence
E	In Sequence	In Sequence	In Sequence
F	In Sequence	In Sequence	In Sequence
G	In Sequence	In Phase	In Sequence
H	In Sequence	In Sequence	In Phase

Table 8. Continued

(c) Modified operating mode

Product \ Stage	1	2	3
I	In Sequence	In Sequence	In Phase
J	In Sequence	In Sequence	In Sequence
K	In Sequence	In Sequence	In Sequence
L	In Sequence	In Sequence	In Sequence
M	In Sequence	In Sequence	In Sequence
N	In Sequence	In Sequence	In Sequence
O	In Sequence	In Sequence	In Sequence

Table 9. Comparison the case considering only in sequence mode with the case considering both in sequence and in phase mode

	The number of binary variables
The case considering only in sequence mode	$N_j \times M$
The case considering both in sequence and in phase mode	$N_j \times M \times 2 \times N$

본비는 285,506에서 275,600으로 감소함을 알 수 있다.

4-4. 문제 4(Patel 등[6])

문제 4는 여기서 제시한 방법을 좀 더 큰 문제에 적용하기 위해서 사용한 예제이다. 이 문제는 세개의 생산 단계에서 열 다섯개의 제품을 생산하는 공정이다. Table 7은 이 문제의 데이터이고 Fig. 10은 혼합정수 비선형 프로그래밍으로 푼 결과이고 공정 분석을 통해 G, H 그리고 I 제품을 생산할 때 평행하게 추가된 장치를 동상으로 조업할 수 있는 기회가 있다. Fig. 11은 동상 조업을 고려한 결과를 나타내고 있으며 약 5%의 자본비를 줄일 수 있다.

5. 결 론

회분식 공정의 예비설계에서 장치를 평행하게 추가하는 합성의 경우 지금까지는 장치가 이상으로 조업되는 경우만 고려하였다. 그 이유는 동상 조업을 고려하게 되면 Table 9와 같이 혼합정수 비선형 프로그램에서 결정해야할 이산(binary) 변수의 수가 크게 증가하기 때문이다. Table 9에서 알 수 있듯이 생산 제품의 수가 많아지면 이상, 동상 조업 둘다를 고려한 경우는 이산 변수의 수는 $2N$ 배로 증가한다. 지금까지 개발된 혼합정수 비선형 프로그램을 풀 수 있는 수학적인 알고리

즘으로는 이러한 문제를 해결할 수 없다. 그러므로, 본 논문에서는 평행하게 추가되는 장치가 제품의 종류에 따라 동상으로 조업되어 보다 나은 공정 구조와 설계값을 구할 수 있다는 가능성을 보여 주고 있다. 개조 문제에서는 이렇게 추가되는 장치가 두가지 조업 형태로 조업되어지는 경우의 문제를 다룬적이 있으나(Lee 등 [4]) 초기 설계시에 이러한 경우를 고려함으로써 초기 투자비를 줄일 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 공정 산업의 지능 자동화 연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로서, 연구비를 지원해 주신 연구센터에 감사드립니다.

사용기호

- B_i : limiting batch size of product i
- H : the operating time
- N_j : the number of parallel units in stage j
- N_j^{opt} : the number of parallel units in stage j obtained by MINLP
- t_{ij} : the processing time of product i in stage j
- Q_i : the production quantities of product i
- S_{ij} : the batch unit size factor of product i in stage j
- T_{Li} : limiting cycle time of product i
- V_j : the volume of batch unit in stage j
- V_j^{min}, V_j^{max} : the upper and lower bounds of batch unit size in stage j

그리스 문자

- α_j : the cost coefficients of a batch unit in stage j
- β_j : the cost exponent of a batch unit in stage j

약자

- C : capital cost
- GAMS : general algebra modeling system
- MINLP : mixed integer nonlinear programming
- NLP : nonlinear programming

참고문헌

1. Birewar, D. B. and Grossmann, I. E.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, 2242(1990).

2. Brooke, A., Kendrick, D. and Meeraus, A.: "GAMS User's Manual", Scientific Press(1988).
3. Lee, H.-K., Lee, I.-B. and Chang, K. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 237(1992).
4. Lee, H.-K., Lee, I.-B., Yang, D. R. and Chang, K. S.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, 1087(1993).
5. Kocis, G. R. and Grossmann, I. E.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, 1407(1988).
6. Patel, A. N., Mah, R. S. H. and Karimi, I. A.: *Computers Chem. Engng*, **15**, 451(1991).
7. Patel, A. N. and Mah, R. S. H.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, 1383(1993).
8. Reeve, A.: *Process Eng.*, **73**, 33(1992).
9. Yeh, N. C. and Reklaitis, G. V.: *Comp. Chem. Eng.*, **11**, 639(1987).