

## 다제품 생산용 회분식 공장의 개조를 위한 최적 합성

이호경 · 이인범 · 양대륙 · 장근수

포항공과대학 지능자동화연구센터  
(1992년 6월 15일 접수, 1992년 11월 6일 채택)

## Optimal Synthesis for the Retrofitting of Multiproduct Batch Plants

Ho-Kyung Lee, In-Beum Lee, Dae Ryook Yang and Kun Soo Chang

Automation Research Center, Pohang Institute of Science and Technology,  
Pohang P.O.Box 125, Pohang 790-600, Korea

(Received 15 June 1992; accepted 6 November 1992)

### 요 약

수요의 증가나 판매 가격 변경과 같은 시장 조건이 변화함에 따라 기존에 있는 다제품 생산용 회분식 공정에 대하여 새로운 장치를 추가하여 최적으로 개조하는 방법을 제시한다. 지금까지는 혼합정수 비선형 프로그램을 이용하여서 이 문제의 최적해를 구했으나 이 논문에서는 경험적인 방법을 제안함으로써 추가되는 장치가 놓이는 위치를 먼저 결정하고 비선형 프로그램을 이용하여 추가하는 장치의 최적크기를 구한다. 발표된 문헌 예제들을 통하여 본 방법의 효율성을 입증한다.

**Abstract**—For the change of market condition such as increase of demand and new selling price, an optimal retrofit method is proposed through adding new equipments to existing multiproduct batch plant. Until now, the optimum volume and the appropriate position of adding equipments are solved using mixed integer nonlinear program. In this paper, a heuristic procedure is presented which first determines the positions of adding equipments. Then a nonlinear programming is formulated to obtain their optimum sizes. The effectiveness of this method is verified by solving several literature problems.

### 1. 서 론

회분식 조업은 단일 공장에서 여러 장치를 상호 공유시킴으로써 원료 물질을 다양하게 선택하여 여러 제품을 생산하는 다품종 소량 생산에 적합하다. 특히 미생물 배양과 같은 조업의 특수한 상황을 고려할 수 있으며 시장 수요가 변화할 때 융통성있게 대처할 수 있는 유연성이 있다. 이와 같은 매력으로 최근 많은 연구가 새로운 공장을 설계하는 최적 설계뿐만 아니라 기존에 있는 회분식 공장에서 새로운 생산 목표와 판매 가격의 변화로 인해 발생하는 개조 문제에 대해 이루어지고 있

다. 기존의 공정에 새로운 장치를 추가 도입하는 개조 문제에서는 제품을 팔아서 얻는 판매 수익에서 도입한 장치의 비용을 뺀 이윤을 최대화하는 최적 개조 문제를 생각할 수 있다. 본 논문에서는 최적 개조 문제를 다제품 생산용 회분식 설비에 적용하고 이에 필요한 식들은 회분식 설비의 최적 설계에 사용했던 식들[1]을 이용한 다.

회분식 조업에 대한 최적 개조 문제는 1987년 Vaselenak 등[2]이 처음으로 다루었으며 이들은 혼합정수 비선형 프로그램을 이용하여 최적해를 구하는 접근 방식을 이용했다. 그리고 1991년 Fletcher 등[3]은 Vaselenak

등[2]의 제약조건중 추가되는 장치가 각 제품의 생산에서 다른 조업 방식으로 사용될 수 있음을 고려하여 제안식의 일부를 수정함으로써 더 좋은 결과를 얻었다. 본 논문에서는 이들이 제시한 혼합정수 비선형 프로그램을 사용하는 것이 아니라 경험적으로 장치가 추가되는 위치를 결정하고 비선형 프로그램을 이용하여 추가 장치의 최적 크기를 결정하는 알고리즘을 제안하고 이 알고리즘의 효율성을 증명하기 위해 4개의 문헌 예제를 다루었다.

## 2. 최적 개조

일반적으로 최적 개조 문제는 생산된 제품의 최대 판매 가능량과 총 조업시간이 주어진 기존공장에 대하여 판매 가능량이 더 증가하였을 경우 몇 개의 장치를 공정 중 어느 위치에 추가시킴으로써 최대 이익을 얻을 수 있는가를 결정하는 것이다. 이는 추가 장치를 어디에 놓을 것인가의 위치 설정 문제와 추가 장치의 크기 결정 문제로 나누어 생각할 수 있다.

### 2-1. 추가 장치의 위치 설정

M개의 장치에서 N개의 제품을 생산하는 다제품 회분식 공장에 대하여 일회 생산량(unit batch size)  $B_j$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$B_{ij} = V_j / S_{ij} \quad i=1, \dots, N \\ j=1, \dots, M \quad (1)$$

여기서  $V_j$ 는 장치 j의 부피이며  $S_{ij}$ 는 최종 제품 i의 단위량을 생산하기 위해 필요한 j번째 장치의 크기를 나타내는 크기인자이다. 따라서 제약 일회 생산량(LBS, limiting batch size)  $B_i$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$B_i = \min B_{ij} \quad i=1, \dots, N \\ j=1, \dots, M \quad (2)$$

일회 시간(unit cycle time)  $T_j$ 는 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

$$T_j = t_{0j} + c_{ij} B_i^{\gamma_j} \quad i=1, \dots, N \\ j=1, \dots, M \quad (3)$$

여기서  $i$ 는 생산되는 제품을 나타내며  $j$ 는 장치를 나타내며  $c_{ij}$ ,  $\gamma_j$ 는 일회당 생산되는 생산량  $B_{ij}$ 가 일회 시간에 영향을 미칠 때의 상관관계를 나타내는 계수이다. 문제를 간단히 하기 위해서 Fletcher 등[3]과 같이  $c_{ij}=0$ 으로 놓으면 일회 시간은 고정 시간  $t_{0j}$ 가 된다. 즉

$$T_j = t_{0j} \quad (4)$$

이며 다제품을 생산할 때 생산성에 제한을 가져오는 제약 회전 시간(LCT, limiting cycle time)  $T_{Li}$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$T_{Li} = \max(T_{ij}/N_j) \quad i=1, \dots, N \\ j=1, \dots, M \quad (5)$$

여기서  $N_j$ 는 장치 j에서 평행하게 설치된 장치의 수이다.

한편 기존의 공장에 장치를 추가할 때 추가된 장치의 조업 방식은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 장치를 평행하게 추가하여서 제약 회전 시간을 절반으로 줄이는 이상 조업(in sequence or out of phase mode)의 개조와 장치를 평행하게 추가하되 제약 일회 생산량을 증가시키는 동상 조업(in phase mode)의 개조가 있다 [3]. 이를 그림을 이용하여 설명하면 Fig. 1은 두 개의 단계를 가진 공정에서 LCT가 걸리는 1단계(1단계에서 제약 회전 시간이 생김)에서 이상 조업의 장치를 평행하게 추가함으로써 LCT를 절반으로 줄이는 효과를 나타내고 있으며, Fig. 2는 1단계에 새로운 장치를 동상 조업으로 평행하게 추가하여서 제품 B[기존에는 제품 B제조시 1단계에서 일회 생산량의 제약(LBS)이 걸림]의 일회 생산량을 80에서 100으로 증가시키는 예를 보여준다. 따라서 개조를 하기 위해서 다음과 같이 두 가지 경험적 방법이 제안된다.

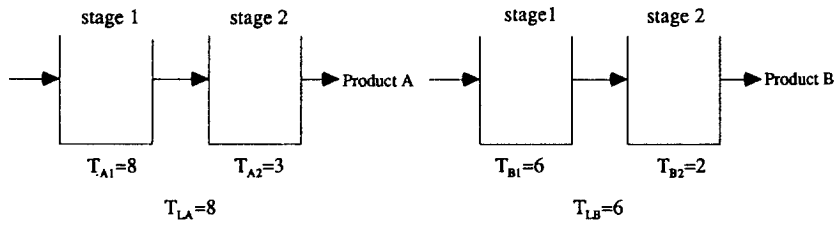
### 제안 1

제품 i를 생산할 때 식 (5)를 이용하여 기존의 공정을 분석하여 LCT가 걸리는 단계에서는 장치를 평행하게 추가하되 이상 조업으로 한다.

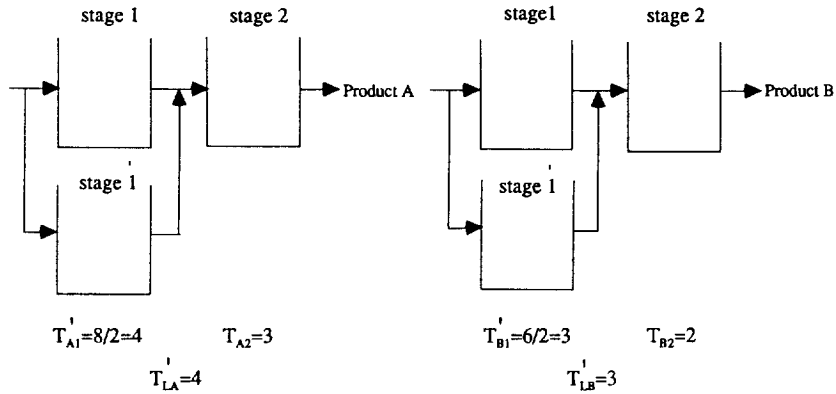
### 제안 2

제품 i를 생산할 때 식 (2)를 이용하여 기존의 공정을 분석하여 LBS가 걸리는 단계에서는 장치를 평행하게 추가하되 동상 조업을 하여야 한다. 이를 위한 알고리즘을 Fig. 3[3]의 일반적인 공정을 보면서 설명한다. 먼저 기존 공정의 조업 자료 Table 1을 참고하여 각 제품을 생산할 때 단위 회전 시간중 가장 큰 값인 LCT가 어느 단계에 있는지를 식 (5)를 이용해 구하고 각 단계에서 일회 생산량을 식 (1)로부터 계산하여 이 중 가장 작은 LBS가 어느 단계에 있는지를 식 (2)를 이용해 분석하여 Table 2와 같은 결과표를 만든다. Table 2를 바탕으로 개조를 위해 앞서 정의한 제안 1과 2에 의해 다음 세 가지 제안을 할 수 있다.

제안 1: 단계 1에 A를 생산할 때 제약 일회 생산량이 증가되도록 동상 조업으로 장치를 평행으로 추가하고 B를 생산할 때는 LCT를 감소시키도록 이상 조업으로 장치를 추가한다.



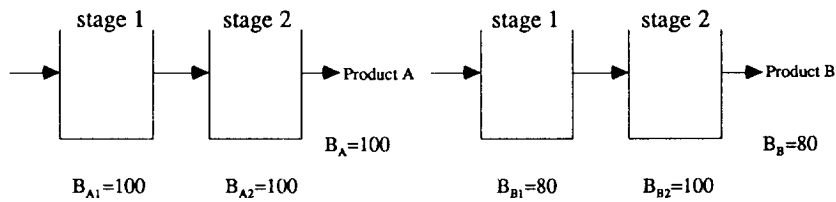
a) Existing Plant



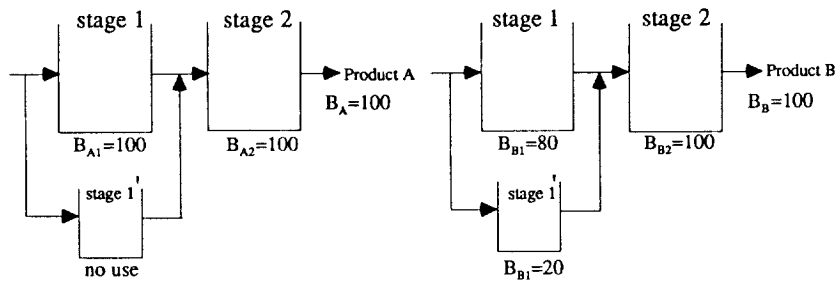
b) Modified Plant

Fig. 1. In sequence mode retrofitting.

(a) Existing plant, (b) Modified plant



a) Existing Plant



b) Modified Plant

Fig. 2. In phase mode retrofitting.

(a) Existing plant, (b) Modified plant

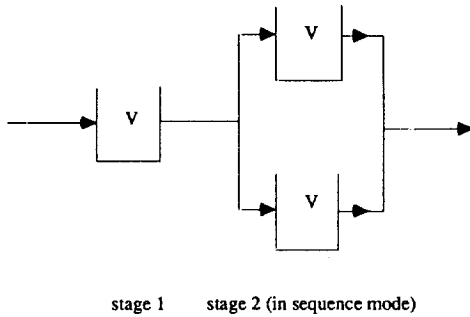


Fig. 3. Two stage batch plant.

Table 1. Data for illustrative example

Product	Stage 1	Stage 2
	$t_{ij}(\text{hr})$	
A	0.5	1
B	1	0.5
Product	$S_{ij}(\text{Lkg}^{-1})$	
	$V$	$V/2$
A	$V$	$V/2$
B	$V/2$	$V$
$V_j^{\text{old}}$	$V$	$V$

Table 2. Process analysis of illustrative example

Product	LCT	LBS	Stage 1	Stage 2
			LBS	LCT
A	$\max(0.5, 1)$ $= 1(\text{stage 2})$	$\min(V/V, V/(V/2))$ $= 1(\text{stage 1})$		
B	$\max(1, 0.5)$ $= 1(\text{stage 1})$	$\min(V/(V/2), V/V)$ $= 1(\text{stage 2})$		

제안 2: 단계 2에 A에 대해서는 이상 조업으로 B에 대해서는 동상 조업으로 조업되는 장치를 추가한다.

제안 3: 단계 1에서는 제안 1의 장치를 단계 2에서는 제안 2의 장치를, 동시에 추가한다.

이상의 세 가지 개조법에 대해 각 단계에서 병행하게 장치를 추가하는 일곱가지 경우를 생각해 본다(Fig. 4 참조). 이런 일곱 가지 경우의 개조가 생산 속도(LBS를 LCT로 나눈 값으로 시간당 제품 생산량을 의미함)에 어떤 영향을 미치는지를 Table 3에 정리하였다. Case 1은 기존의 공정으로 생산속도가 1인 반면 Case 6은 장치 3개를 추가 도입함으로써 생산속도가 4배까지 증가시킬 수 있었다. 이 경우 j단계에서 같은 크기의 평행한 장치를 추가할 때, 이상 조업때의 일회 시간과 동상 조업때의 일회 생산량의 변화는 다음 식과 같다.

$$(\text{Unit Cycle Time})_j = \left( \frac{\text{unit cycle time of existing units}}{\text{number of existing units} + \text{number of adding units}} \right)_{j\text{th stage}} \quad (6)$$

$$(\text{Unit Batch Size})_j = \left( \frac{\text{volume of existing units} + \text{volume of adding units}}{\text{size factor of existing units}} \right)_{j\text{th stage}} \quad (7)$$

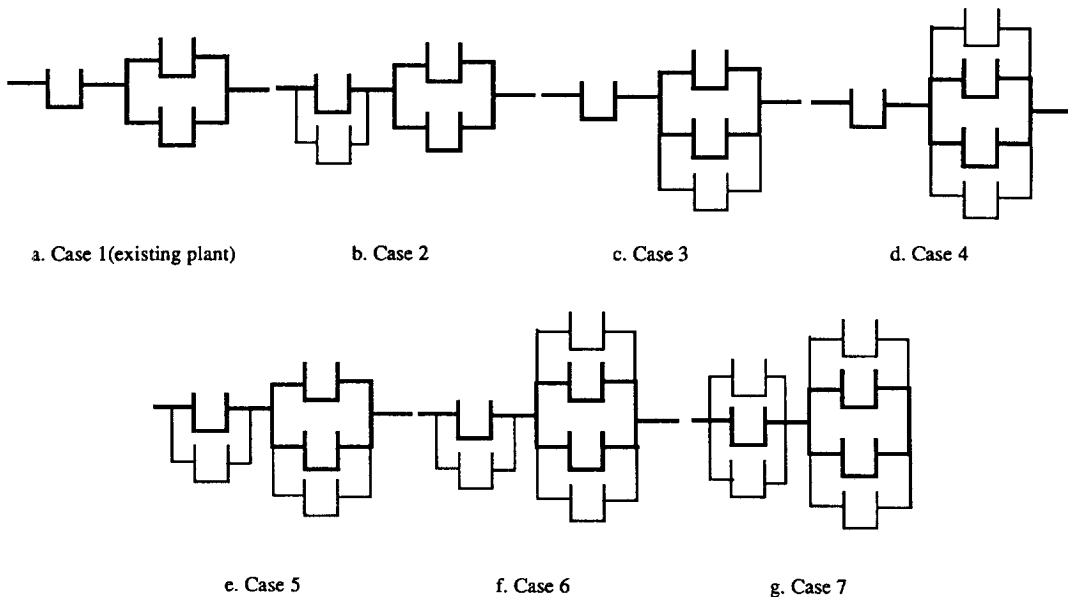


Fig. 4. Alternative retrofitting for illustrative example.

Table 3. Retrofit strategies of illustrative example

Case	product	Operation		Cycle times(hr)			Batch sizes(kg)			Rates(kg/hr)
		Stage		Stage		limit(LCT)	Stage		limit(LBS)	(= LBS/LCT)
		1	2	1	2		1	2		
1	A	-	-	0.5	1	1	1	2	1	1
	B	-	-	1	0.5	1	2	1	1	1
2	A	P	-	0.5	1	1	2	2	2	2
	B	S	-	0.5	0.5	0.5	2	1	1	2
3	A	-	S	0.5	2/3	2/3	1	2	1	3/2
	B	-	P	1	0.5	1	2	3/2	3/2	3/2
4	A	-	S	0.5	0.5	0.5	1	2	1	2
	B	-	P	1	0.5	1	2	2	2	2
5	A	P	S	0.5	2/3	2/3	2	2	2	3
	B	S	P	0.5	0.5	0.5	2	3/2	3/2	3
6	A	P	S	0.5	0.5	0.5	2	2	2	4
	B	S	P	0.5	0.5	0.5	2	2	2	4
7	A	P	S	0.5	1/3	0.5	3	2	2	4
	B	S	P	1/3	0.5	0.5	2	2	2	4

Operating strategy: P(operate in phase with existing units), S(operate in sequence with existing units)

이 경우 물론 팔 수 있는 양이 무한대일 때는 장치를 계속 추가하여서 생산속도를 증가시키는 것이 좋으나 한 개의 장치가 추가될 때마다 고정비용을 고려해야 하기 때문에 추가되는 장치의 수에 대하여 최대 이윤을 가져오는 Case 6이 최적임을 알 수 있다.

## 2-2. 추가 장치 크기 결정

일반적으로 회분식 공장에서는 생산량을 무한대로 늘려 모두 판매할 수 없으므로 생산량이 판매 가능한 양 이하로 제한된다. 따라서 다음의 제약조건이 생긴다.

$$n_i B_i \leq Q_i \quad i=1, \dots, N \quad (8)$$

여기서  $i$ 제품의 생산량  $n_i B_i$ 는  $i$ 제품의 최대 판매 가능량 ( $Q_i$ )보다 작은 값이고,  $n_i$ 는 제품  $i$ 의 생산량을 위한 회분식 공정의 조업 회수(number of cycles)를 나타낸다. 또한 작업 가능한 시간  $H$ 는 전체 제품을 생산하는데 소요되는 시간보다 크거나 같아야 한다는 제약조건은 다음과 같이 표시된다.

$$\sum_{i=1}^N n_i T_{Li} \leq H \quad i=1, \dots, N \quad (9)$$

한편 추가되는 장치  $j$ 의 연간 비용은 문제의 단순화를 위해 선형적인 다음과 같이 표현할 수 있다[3].

$$K_j + c_j V_j^{new} \quad j=1, \dots, M \quad (10)$$

여기서  $K_j$ 는 고정비용이고  $c_j$ 는 비용 계수이다. 그리고 제품을 팔아서 얻는 판매수익은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^N p_i n_i B_i \quad (11)$$

여기서  $p_i$ 는 제품  $i$ 의 판매가이다. 그러므로 목적함수는 (11)식에서 (10)식을 뺀 이윤을 최대로 하는 것이다. 이를 요약하면 다음 식과 같다.

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^N p_i n_i B_i - \sum_{j=1}^M (K_j + c_j V_j^{new}) \quad (12)$$

$$\text{Subject to } n_i B_i \leq Q_i \quad i=1, \dots, N \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N n_i T_{Li} \leq H \quad (14)$$

$$V_j^L \leq V_j^{new} \leq V_j^{Uj} \quad j=1, \dots, M \quad (15)$$

$$B_i, n_i \geq 0 \quad i=1, \dots, N \quad (16)$$

여기서  $B_i$ 와  $T_{Li}$ 는 식 (2)와 (5)로부터 구하며 변수는  $B_i, n_i$ 이다. 변수  $n_i$ 는 제품  $i$ 의 회분의 수이므로 정수형 변수이다.

새로운 장치 한 개가  $j$ 단계에서 제품  $i$ 에 대하여 이상 조업으로 추가되면 식 (2)와 (5)는 추가되는 장치의 크기( $V_j^{new}$ ) 및 이상 조업으로 인해 다음과 같이 변경되어 제약조건으로 윗 식에 추가된다.

$$\frac{V_j^{new}}{S_{ij}} = B_{ij}^{new} \quad (17)$$

$$B_j = \min(B_{ij}, B_{ij}^{new}) \quad j=1, \dots, M \quad (18)$$

$$T_{ij}^{new} = \frac{T_{ij}}{N_j + 1} \text{ (for } j=j) \\ T_{ij}^{new} = \frac{T_{ij}}{N_j} \text{ (for } j=1, \dots, M \text{ and } j \neq j) \quad (19)$$

$$T_{Li} = \max \{T_{ij}^{new}\} \quad j=1, \dots, M \quad (20)$$

식 (18)은 다음과 같은 부등식으로 표현된다.

$$B_i \leq B_j \quad (21)$$

$$B_i \leq \frac{V_j^{new}}{S_{ij}} \quad (22)$$

또한 새로운 장치가 j단계에서 제품 i에 대하여 동상 조업으로 추가되면 식 (5)는 변함없이 없고 식 (2)는 다음과 같이 변경되어야 한다.

$$B_{ij}^{new} = \frac{V_j^{new} + V_j^{old}}{S_{ij}} \text{ (for } j=j) \\ B_{ij}^{new} = B_{ij} \text{ (for } j=1, \dots, M \text{ and } j \neq j) \quad (23)$$

$$B_i = \min \{B_{ij}^{new}\} \quad j=1, \dots, M \quad (24)$$

식 (24)는 다음과 같은 부등식으로 표현된다.

$$B_i \leq B_{ij}^{new} \quad (25)$$

이상의 비선형 프로그램은 generalized reduced gradient algorithm을 이용하여 최적해를 구한다[4]. 기존 공정에 대한 해는  $V_j^{new}$ 를 0으로 하여 계산한다.

### 3. 적용사례

#### 3-1. 문제 1[2, 3]

문제 1은 Fig. 5와 같은 공정 네트워크를 가진 공장으로 제품 A는  $1 \times 10^6$  kg/year, 제품 B는  $8 \times 10^5$  kg/year의 판매 가능량을 가지고 있다. 시장 조건의 변화로 말미암아 최대 판매 가능량이, A가  $1.2 \times 10^6$  kg/year, B가  $1.0 \times 10^6$  kg/year로 증가하였을 경우 이에 대처하기



Fig. 5. Process network of example 1.

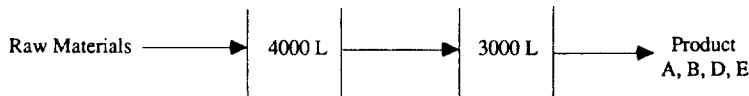


Fig. 6. Process network of example 2.

위하여 개조 문제가 발생한다. 본 논문에서 제시한 알고리즘에 의해 Table 4의 공정 데이터를 분석하여 Table 5와 같은 분석 결과를 만들고 이 경우 단계 1, 2에 대하여 각각 장치를 추가하거나 동시에 2개 추가하는 문제를 비선형계획법(NLP, nonlinear programming)을 풀어 최적해를 구한다. Table 6은 이 문제의 결과로 단계 1에서 제품 A에 대해서는 동상 조업으로 제품 B에

Table 4. Data for example 1

Product	Stage 1	Stage 2
	$t_{ij}$ (hr)	
A	4.0	6.0
B	5.0	3.0
Product	$S_{ij}$ (Lkg <sup>-1</sup> )	
	A	2.0
B	1.5	2.25
$V_j^{old}$	4000	3000
$V_j^L$	0	0
$V_j^U$	4000	3000
$K_j$ ( \$ )	30560	30560
$c_j$ ( \$ L <sup>-1</sup> )	32.54	32.24
	$p_i$ ( \$ kg <sup>-1</sup> )	
A	1.0	1200000
B	2.0	1000000

Table 5. Process analysis of example 1

	LCT	LBS	Stage 1	Stage 2
A	6	4000/2	LBS	LCT
B	5	3000/2.25	LCT	LBS

Table 6. Result of example 1

Stage	New unit size(L)	Operation		Profit
		A	B	
(existing)	-	-	-	\$ 2751500
1	1358	In phase	In sequence	\$ 3125200
2	1395	In sequence	In phase	\$ 3124500
1	1545	In phase	In sequence	
and 2	1554	In sequence	In phase	\$ 3041600

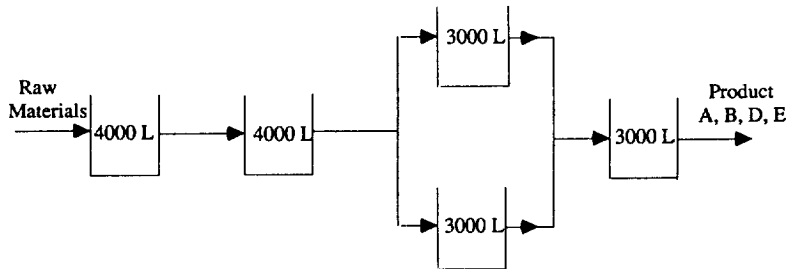


Fig. 7. Process network of example 3.

Table 7. Data for example 2

Product	Stage 1	Stage 2
	$t_{ij}(\text{hr})$	
A	4.7	10.1
B	4.1	3.8
D	2.9	2.7
E	5.3	11.8
Product	$S_{ij}(\text{Lkg}^{-1})$	
A	4.8	2.0
B	3.6	4.9
D	3.9	5.6
E	8.3	3.6
$K_i(\text{\$})$	12800	11400
$c_i(\text{\$ L}^{-1})$	13.63	12.14
$V_j^{\text{old}}(\text{L})$	4000	3000
$V_j^{\text{L}}(\text{L})$	1000	1000
$V_j^{\text{U}}(\text{L})$	4000	3000
Product	$p_i(\text{\$ kg}^{-1})$	$Q_i(\text{kg})$
A	0.63	290000
B	0.53	300000
D	0.44	350000
E	1.09	140000

Table 8. Process analysis of example 2

	LCT(hr)	LBS(kg)	Stage 1	Stage 2
A	10.1	4000/4.8	LBS	LCT
B	4.1	3000/4.9	LCT	LBS
D	2.9	3000/5.6	LCT	LBS
E	11.8	4000/8.3	LBS	LCT

Table 9. Result of example 2

Stage	New unit size(L)	Operation				Profit
		A	B	C	D	
existing		-	-	-	-	\$ 406300
1	3200	In phase	In sequence	In sequence	In phase	\$ 474170
2	1699	In sequence	In phase	In phase	In sequence	\$ 618730
1	2204	In phase	In sequence	In sequence	In phase	
and 2	2585	In sequence	In phase	In phase	In sequence	\$ 524740

대해서는 이상 조업으로 1358 L의 장치를 평행하게 추가하는 것이 최적 개조라는 결과를 얻었다.

### 3-2. 문제 2[3]

문제 2는 Fig. 6과 같이 두 개의 단계에서 4개의 제품을 생산하는 공장으로서 Table 7의 데이터를 사용하여

Table 10. Data for example 3

Product	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
	$t_{ij}(\text{hr})$			
A	6.3822	4.7393	8.3353	3.9443
B	6.7938	6.4175	6.4750	4.4382
D	1.0135	6.2699	5.3712	11.9213
E	3.1977	3.0415	3.4609	3.3047
Product	$S_{ij}(\text{Lkg}^{-1})$			
A	7.9130	2.0815	5.2268	4.9523
B	0.7891	0.2871	0.2744	3.3951
D	0.7122	2.5889	1.6425	3.5903
E	4.6730	2.3586	1.6087	2.7879
$K_i(\text{ \$ })$	15280	38200	45840	10180
$c_i(\text{ \$ L}^{-1})$	16.27	40.68	48.81	10.84
$V_j^{\text{old}}(\text{L})$	4000	4000	3000	3000
$V_j^{\text{L}}(\text{L})$	0	0	0	0
$V_j^{\text{U}}(\text{L})$	4000	4000	3000	3000
Product	$p_i(\text{ \$ kg}^{-1})$	$Q_i(\text{kg})$		
A	1.114	268200		
B	0.535	156000		
D	0.774	189700		
E	0.224	166100		

Table 11. Process analysis of example 3

	LCT(hr)	LBS(kg)	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
A	6.3822	4000/7.9130	LBS/LCT	-	-	-
B	6.7938	3000/3.3951	LCT	-	-	LBS
D	11.9213	3000/3.5903	-	-	-	LBS/LCT
E	3.3047	4000/4.6730	LBS	-	-	LCT

Table 12. Result of example 3

Stage	New unit	Operation				Profit
	size(L)	A	B	C	D	
existing		-	-	-	-	\$ 459000
1	4000	In phase	In sequence	-	In phase	\$ 466120
1	697	In sequence	In sequence	-	In phase	\$ 467000
4	2547	-	In phase	In phase	In sequence	\$ 521340
4	3000	-	In phase	In sequence	In sequence	\$ 521780

문제 1과 같은 과정으로 추가되는 장치의 최적 부피를 결정한다. Table 8 및 9의 결과에서 볼 수 있듯이 두 번째 단계에 1689 L의 장치를 평행하게 추가하는 것이 가장 많은 이윤을 낸다.

### 3-3. 문제 3[2, 3]

문제 3은 4개의 단계에서 4개의 제품을 생산하는 공정으로 Table 10의 주어진 데이터를 분석하여 Table 11의 개조를 위한 기초 자료를 만든다. Table 11의 결과 분석표를 보면 LCT와 LBS가 단계 1과 단계 4에서만 발생한다. 결과 분석표를 직접 사용한 제안 1, 2를 이용함으로써 기존의 정수 계획법이 단계 2, 단계 3에서 장치 추가 여부를 결정하는데 소요되는 시간을 없애 계산 시간이 크게 단축됨을 알 수 있다. 각 경우에 대해 기존의 제약(LCT나 LBS)을 없애주는 개조를 구한 것이 Table 12이다. 결론적으로 마지막 단계에 3000 L의 장치를 추가하는 것이 최적 개조이다. 이 문제에 대하여 추가되는 장치의 상한값을 3000 L보다 높게 두면 더 많은 이윤을 갖는 답도 구할 수 있었다.

## 4. 결 론

다제품 생산용 회분식 공정에 대하여 새로운 장치를 추가하여 최적으로 개조하는 방법을 제시하였다. 이 논문에서 제안한 방법은 경험적인 방법에 근거한 비선형 프로그램으로 혼합정수 접근법보다 계산이 간단하며 계산 시간이 훨씬 작으며 안정하게 최적해를 구할 수 있는 것이 장점이다. 이는 공정 개조를 위한 장치 추가의 합성 단계를 정수 계획법(integer programming)을 이용하지 않고 경험적인 법칙에 근거한 제안 1과 2를 이용하면서 기인한다. 이러한 알고리즘의 효율성을 증명하기 위해서

Fletcher 등[3]이 든 네 가지 예제에 적용하여 본 결과 더 많은 개조 방식이 찾아졌으나 최적해는 같았다. 그러나 문제의 크기가 커짐에 따라 계산량이 훨씬 줄어드는 장점이 있었다.

## 감 사

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 공정 산업의 지능자동화연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로, 연구비를 지원해 주신 연구센터에 감사드립니다.

## 사용기호

- $B_{ij}$  : the unit batch size of product  $i$  in stage  $j$
- $B_i$  : limiting batch size of product  $i$
- $B_{ij}^{new}$  : the new batch size of product  $i$  in stage  $j$
- $c_i$  : the annualized cost coefficients of a new unit in stage  $j$
- $H$  : the operating time period
- $K_j$  : the annualized fixed charge of a new unit in stage  $j$
- $n_i$  : the number of batches of product  $i$
- $p_i$  : the expected net profit per unit of product  $i$
- $Q_i$  : the upper bound on production of product  $i$
- $S_{ij}$  : the unit size factor of product  $i$  in stage  $j$
- $t_{ij}$  : the processing time of product  $i$  in stage  $j$
- $T_{ij}$  : the unit cycle time of product  $i$  in stage  $j$
- $T_{ij}^{new}$  : the new unit cycle time of product  $i$  in stage  $j$
- $T_{Li}$  : limiting cycle time of product  $i$
- $V_j^{new}$  : the volume of new unit in stage  $j$



$V_j^{old}$  : the volume of existing unit in stage j  
 $V_j^L, V_j^U$  : the upper and lower bound of adding unit in stage j  
 $\gamma_j$  : the correlation coefficient of batch size and unit cycle time in stage j

#### 약자

LBS : limiting batch size  
 LCT : limiting cycle time  
 NLP : nonlinear programming

#### 참고문헌

1. Lee, H-K., Lee, I-B. and Chang, K. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 237(1992).
2. Vaselenak, J. A., Grossmann, I. E. and Westerberg, A. W.: *Ind. Engng. Chem. Res.*, **26**, 718(1987).
3. Fletcher, R., Hall, J. A. J. and Johns, W. R.: *Computers Chem. Engng.*, **15**, 843(1991).
4. Lasdon, L. S. and Warren, A. D.: "GRG2 User's Guide", The Scientific Press(1982).