

회분식/반연속식 공정의 설계와 합성

이호경 · 이인범 · 장근수

포항공과대학 지능자동화연구센터
(1991년 11월 29일 접수, 1992년 3월 30일 채택)

The Design and Synthesis of Batch/Semicontinuous Processes

Ho-Kyung Lee, In-Beum Lee and Kun Soo Chang

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

(Received 29 November 1991; accepted 30 March 1992)

요 약

지금까지는 회분식/반연속식 공정의 초기설계를 향상시키기 위해서 진화론적 방법이나 경험적인 법칙을 사용하였다. 그러나, 본 연구의 접근방식은 모든 가능한 공정구조를 포함하는 superstructure를 만들고 MINLP (mixed integer nonlinear programming) 모델을 사용해서 최적 공정 네트워크를 얻는다. MINLP 모델로 일(task)의 합병과 평행 장치를 사용하는 후보자리를 결정할 수 있으므로, 병목(bottlenecking)단계에 장치를 평행하게 추가하거나 일(task)을 합병/분리함으로써 회분식/반연속식 공정에서 장치 투자비의 경제적인 절감을 가능하게 한다. MINLP 모델은 GRG(generalized reduced gradient) 알고리즘을 사용하며 풀며 MINLP 모델의 효용성은 예제 문제를 통해서 증명되어 진다. 또한 실제 공정에서 많이 응용되고 있는 중간저장탱크의 추가를 통하여 회분식/반연속식 설비의 장치투자비 감소 효과를 살피고 추가되는 중간저장탱크의 최적 크기를 결정하는 방법을 제시한다.

Abstract—Until now, an evolutionary method or empirical rule has been used to improve the initial design of batch/semicontinuous processes. In this paper, the proposed approach is to make a superstructure which fully contains all possible structures. And then using a MINLP(mixed integer nonlinear programming) model, we obtain the optimal process network. MINLP model contains methodology deciding the candidates of merging tasks and using parallel equipments. Thus, the economic savings of capital cost of batch/semicontinuous processes are possible by adding equipment in parallel for bottleneck stages or merging/splitting tasks. MINLP model is solved by using a generalized reduced gradient algorithm. The effectiveness of MINLP model in single product batch plant is demonstrated by solving example problems. Also, by inserting intermediate storage tank, we reduce the capital cost for batch/semicontinuous processes and determine the optimal size of intermediate storage tank.

1. 서 론

산업혁명 이후 화학 공정 산업은 생산성 향상과 성

력화를 위하여 소품종 대량생산 체제인 연속 조업 형태로 발전되어 왔으나 아직도 정밀화학, 생화학공정, 식품공정, 제약공업 등에 관련된 조업들은 생산 특성상

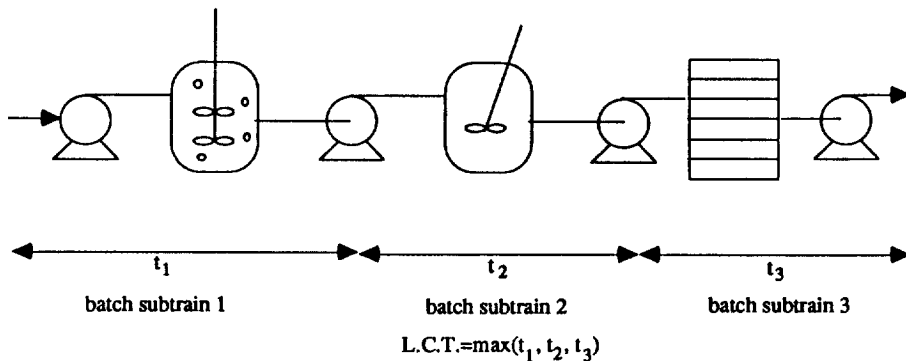


Fig. 1. Typical batch/semicontinuous processes.

회분식 공정으로 이루어지고 있다. 근래에 들어 선진국 뿐만 아니라 개발도상국들이 고부가가치제품 생산을 선호함에 따라, 회분식 조업의 중요성이 대두되고 있는데, 회분식 조업의 매력은 단일 공장에서 여러 장치를 상호 공용함으로써, 여러 제품을 생산하는 유연성이라고 볼 수 있다. 따라서 회분식 조업은 소량의 고부가가치 제품을 생산하거나 유사한 생산방식을 갖는 여러 종류의 제품을 제조할 때 경제적으로 바람직한 반면 노동집약적인 단점이 있다. 지난 30년간, 회분식 공정에 관한 연구가 계속 이어졌는데 회분식 조업에 대한 최근의 연구 동향은 공정설계, 장치크기결정, 중간 저장탱크 크기결정, 공정모사 그리고 최적 조업순서 결정, 자동화 등이다. 본 논문에서 다뤄진 분야는 최적 공정 설계, 장치크기결정 그리고 중간 저장탱크 크기결정에 관한 것인데 이에 관한 연구의 흐름을 알기 위해 지금까지 나온 논문을 간략하게 살펴보면, Ketner[1]와 Loonkar, Robinson[2]이 단일 생산공정의 설계에 미적분을 사용한 것이 회분식 조업에 관한 연구의 시작이었다.

Sparrow[3]가 장치의 크기 결정 문제에 경험적인 절차를 사용했고, Grossmann과 Sargent[4]가 장치의 크기 문제에 비선형 프로그램을 처음으로 도입하였다. Takamatsu 등[5]은 단일 생산 공장에서 중간저장탱크의 크기 결정에 관한 문제를 다루었다. Yeh와 Reklaitis[6]는 splitting, merging, 그리고 장치를 병행하게 추가하는 합성 문제에 진화론적인 과정(evolutionary procedure)을 도입하였다. 본 논문에서는 진화론적인 과정이나 경험적인 법칙이 아닌 가능한 공정 네트워크를 모두 포함하는 superstructure라는 개념을 제시하고 MINLP 모델에 의해 정해진 생산시간과 생산량에 대해서 장치 이용의 효율도를 높이고 장치 비사용시간(idle time)을 감소시킴으로써 초기설계와 개보수시에 장치의 투자비를 최소로 하는 최적 네트워크를 찾는 방법론을 제시하고자 한다.

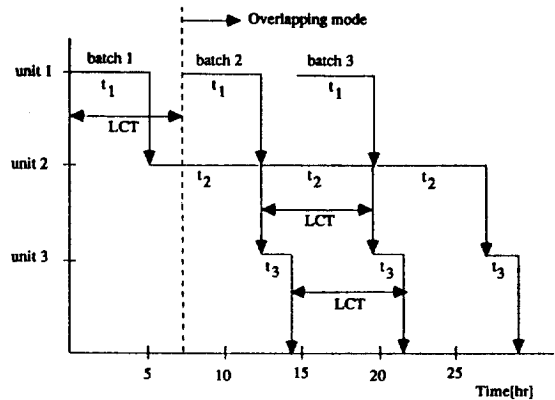


Fig. 2. Gantt chart for three-stage process.

2. 이 론

Fig. 1은 일반적인 회분식/반연속식 공정의 예를 든 것이며 여기서 회분식 설비와 이 회분식 설비에 물질의 도입과 반출을 맡는 반연속식 설비들을 합해서 batch subtrain이라고 한다. 회분식 설비에 원료를 도입하는 시간과 반출하는 시간 그리고 회분식 설비의 공정시간을 합한 시간을 batch subtrain의 공정시간 t 로 표시할 경우 Fig. 1에서는 3개의 batch subtrain이 있고 t_1 , t_2 , t_3 는 각 batch subtrain의 공정시간이며 이 중에서 가장 큰 값이 LCT(limiting cycle time)라고 하며 T 로 표현된다. Fig. 2는 세 개의 단계(stage)(여기서 단계란 하나 혹은 그 이상의 일들로 이루어진 조업을 말한다)를 가지고 있는 공정인데 가장 긴 t_2 가 LCT가 된다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 첫번째 회분이 들어가고 나서 두번째 회분이 들어가는 시간은 LCT로써 조정된다. 첫번째 회분이 들어가고 나서 완전히 처리된 후에 두번째 회분이 들어가는 것이 아니라 LCT가 경과한 후에, 다음 회분이 들어가는 중복양식(overlapping mode)으로 생산된다.

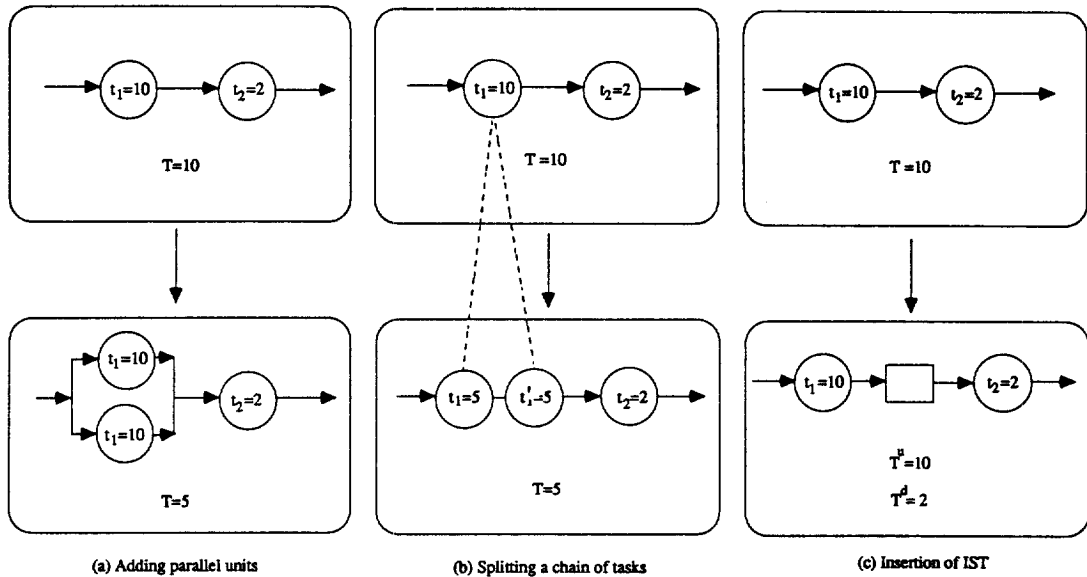


Fig. 3. Methods reducing limiting cycle time.

장치의 투자비를 최소로 하는 공정네트워크를 찾고 그 각각의 장치의 크기를 결정하기 위해서는 생산되어야 하는 생산량과 생산에 이용할 수 있는 생산시간, 원료가 들어가서 생산품이 될 때까지 거치는 일의 순서, 각 일에 대한 크기인자(size factor)(여기서 크기인자란 최종 생산물 단위 생산을 하기 위해서 각 일이 필요로 하는 부피를 말한다)가 주어져야 한다. 또한 목적함수가 장치의 투자비이므로 그 장치를 투자비로써 나타낼 수 있는 함수가 주어져야 하고 각 일을 수행하는데 필요한 적당한 장치의 형태가 주어져야 한다. 그리고 문제를 풀기 위해서는 네 가지 가정을 세운다. (1) 생산은 중복양식(overlapping mode)으로 이루어진다. (2) 평행하게 놓일 수 있는 장치의 형태는 동일하다. (3) 장치의 크기는 어떤 범위안에서 선택할 수 있다. (4) 중간저장탱크에 대한 비용은 회분식 설비에 비해 무시할 수 있다.

회분식 조업의 설계에서 T 는 전체생산시간과 장치의 투자비에 많은 영향을 미친다. 그 이유는 LCT를 가능한 한 작게 조정하는 것이 정해진 생산시간 동안에 많은 양을 생산할 수 있기 때문이다. Fig. 3은 LCT를 줄일 수 있는 세 가지 방법이다. (a)는 LCT가 걸리는 공정에 평행하게 장치를 추가하여 LCT를 반으로 줄이는 방법이고, (b)는 LCT가 걸리는 공정에 일(task)을 분리(split)하여 LCT를 반으로 줄인 방법이며 (c)는 upstream과 downstream 사이에 중간저장탱크를 넣어서 결과적으로 downstream의 LCT를 감소시킨 방법이다. 장치의 투자비를 최소로

하는 최적 공정 네트워크를 찾기 위해서 본 논문에서 사용된 방법은 MINLP(mixed integer nonlinear programming) 모델이며 최적화 방법은 GRG(generalized reduced gradient) algorithm[7,8]을 사용하였다.

3. 장치크기 결정 문제

주어진 공정 네트워크에 대해서 정해진 시간에 목적하는 생산량을 생산하기 위해서 필요한 장치의 최적 크기를 결정하는 문제는 이미 많은 연구가 이루어졌다 [3,4].

전체 공정이 M 개의 회분식 설비와 N 개의 반연속식 설비로 이루어져 있을 때 장치 크기를 결정하는 식들은 다음과 같다. 먼저, 회분식 설비의 부피 V_j 는 다음과 같이 표시되며 여기서 B 는 한번의 회분조업에서 생산되는 생산량이며 S_j 는 회분식 장치의 크기인자이다.

$$V_j = B \cdot S_j \quad j = 1, \dots, M \quad (1)$$

반연속식 설비에서 걸리는 시간 Θ_k 는 다음과 같이 나타나며 여기서 \bar{S}_k 는 반연속식 설비의 크기인자이며 R_k 는 반연속식 설비의 공정속도이다.

$$\Theta_k = \frac{\bar{S}_k B}{R_k} \quad k = 1, \dots, N \quad (2)$$

P_j 는 회분식 장치의 조업시간이다. 여기서 P_j^0 , c , d 는 회분식 장치의 조업시간을 B 의 함수로써 나타내기 위해

필요한 상수이다.

$$P_j = P_j^0 + c_j(B)^{\alpha_j} \quad (3)$$

$\Theta_{f(j)}$, $\Theta_{d(j)}$ 는 j 번째 회분식 설비에 물질을 도입하고 반출하는데 걸리는 시간을 말하며 batch subtrain j 의 공정시간 t_j 는 다음과 같이 표현되며 여기서 m_j 는 평행하게 놓일 수 있는 회분식 장치의 갯수이며 장치크기 결정 문제를 풀 때는 고정된 값으로 놓고 풀다.

$$t_j = \frac{\Theta_{f(j)} + P_j + \Theta_{d(j)}}{m_j} \quad j=1, \dots, M \quad (4)$$

회분식 설비간에 하나 이상의 반연속식 설비가 있는 경우는 반연속식 설비의 조업시간이 LCT에 미치는 영향을 고려해야 한다. 전체 공정에서 L 개의 반연속식 단계(stage)가 있고 각 단계는 R 개의 반연속식 설비를 가지고 있다고 할 때 Θ_l 은 각 반연속식 단계 1에서 가장 많은 시간이 걸리는 장치의 공정시간을 말하며 다음과 같이 표현된다.

$$\Theta_l = \max(\Theta_{rl}) \quad r=1, \dots, R_l \quad l=1, \dots, L \quad (5)$$

중복양식(overlapping mode)에서 LCT T 는 다음과 같다.

$$T = \max(t_j, \Theta_l) \quad j=1, \dots, M \quad l=1, \dots, L \quad (6)$$

전체생산시간은 총생산에 이용할 수 있는 시간 H 보다 작거나 같아야 한다는 제약조건이 존재하는데 이는 다음과 같이 표현되며 Q 는 필요로 하는 생산량이다.

$$(Q/B) \cdot T \leq H \quad (7)$$

이상과 같은 식들을 근거로 해서 장치 크기를 결정할 수 있는 목적함수와 제약조건들을 정리해 보면 다음과 같이 된다.

$$\text{Minimize} \quad \sum_{j=1}^M m_j a_j (V_j)^{\alpha_j} + \sum_{k=1}^N b_k (R_k)^{\beta_k} \quad (8)$$

Subject to:

$$V_j = B \cdot S_j \quad j=1, \dots, M \quad (9)$$

$$(B \cdot \bar{S}_k) / R_k \leq T \quad k=1, \dots, N \quad (10)$$

$$T \geq (\Theta_{f(j)} + P_j + \Theta_{d(j)}) / m_j \quad j=1, \dots, M \quad (11)$$

$$T \geq \Theta_l \quad l=1, \dots, L \quad (12)$$

$$(Q/B) \cdot T \leq H \quad (13)$$

$$V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \quad j=1, \dots, M \quad (14)$$

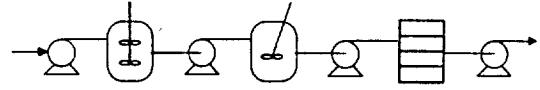


Fig. 4. Process network of sizing example.

$$R_k^{\min} \leq R_k \leq R_k^{\max} \quad k=1, \dots, N \quad (15)$$

위의 목적함수 (8)식은 장치의 투자비를 최소화하는 것이다. 회분식 설비의 자본비는 부피로써 나타내는데, a_j , α_j 는 부피와 자본비의 상관 관계를 나타내는 비용계수이며 반연속식 설비의 자본비는 공정속도로써 나타내는데 b_k , β_k 는 공정속도와 자본비의 상관 관계를 나타내는 비용계수이다. (9)식은 회분식 설비의 부피에 관한 제약조건이며 (10), (11), (12)식은 LCT에 관한 제약조건, (13)식은 전체생산시간에 대한 제약조건, (14), (15)식은 회분식, 반연속식 설비가 사용할 수 있는 범위를 나타낸다. 이 문제를 풀어서 결정할 수 있는 변수는 회분식 설비의 부피 V_j , 반연속식 설비의 공정속도 R_k 그리고 LCT T 와 한 회분의 생산량 B 이다. 장치의 크기를 결정하는 이 문제는 비선형 문제이며 본 논문에서 이 문제를 푼 방법은 GRG algorithm이며 IRIS 워크스테이션을 사용하였다.

예제 1

Fig. 4와 같은 공정 네트워크에 대하여 이용할 수 있는 생산시간 H 와 생산량 Q 를 달성하기 위한 장치의 최적 크기를 결정하였다. Table 1은 예제 1을 위한 데이터이고 Table 2는 최적화 프로그램을 계산하기 위해 필요한 각 변수들에 대한 초기값과 이들의 최적값이다.

4. 개보수 응용

3에서 다룬 장치크기결정에 대한 예제는 정해진 시간 내에 결정된 공정 네트워크에서 목적하는 생산량을 달성하기 위해 필요로 하는 장치의 최적크기를 결정하는 기초설계에 관한 것이다. 여기서 계산된 값들은 주어진 공정 네트워크에 대하여 구한 값이며 이러한 결과들을 분석함으로서 LCT가 걸리는 공정을 알 수 있다. 따라서, LCT가 걸리는 공정을 개선하는 개보수를 하기 위해 다음과 같은 제안을 하였다.

제안

LCT가 되는 batch subtrain에 장치를 평행하게 추가함으로써 LCT를 그 batch subtrain에서 없애고 아울러 평행하게 추가하는 장치의 최적 크기를 결정한다.

Table 1. Data of sizing example

				Q = 120,000 H = 7,200				
Batch equipment data				Semicontinuous equipment data				
M	1	2	3	M	1	2	3	4
S	2.74	1.44	1.20	S	2.74	2.74	1.44	1.20
P ⁰	3.0	20.0	35.0	b	250	200	210	370
c	0.172E-1	0.612E-5	0.364E-1	β	0.40	0.85	0.62	0.22
d	0.865	2.00	0.823	300 ≤ R _k ≤ 1800				
a	592	582	1200					
α	0.65	0.39	0.52					
300 ≤ V _j ≤ 2400								

Table 2. Results of sizing example

P.I. = 176,580		
Variable	Result	Initial value
B	780.0	1000
T	46.8	50
V ₁	2137.2	500
V ₂	1123.2	500
V ₃	936.0	500
R ₁	300	500
R ₂	300	500
R ₃	441.4	500
R ₄	1800	500

예제 2

Fig. 5는 예제 1의 결과로부터 얻은 각 batch subtrain에서 소요되는 시간을 나타내고 있다. 여기서 각 batch subtrain에서 걸리는 공정 시간은 $t_1 < t_2 < t_3$ 순이므로 t_3 가 LCT이다. 그러므로 세번째 batch subtrain의 공정시간을 감소시키기 위하여 평행하게 같은 형태의 장치를 추가하였다. 추가되는 장치의 최적크기는 세번째 batch subtrain의 공정시간이 두번째 batch subtrain의 시간이 될 때의 크기로 결정되며 평행하게 장치를 추가함으로써 전체 생산시간을 30% 정도 단축할 수 있으며 이것은 또한 생산성의 증대를 의미하게 된다. 이와 같이 LCT가

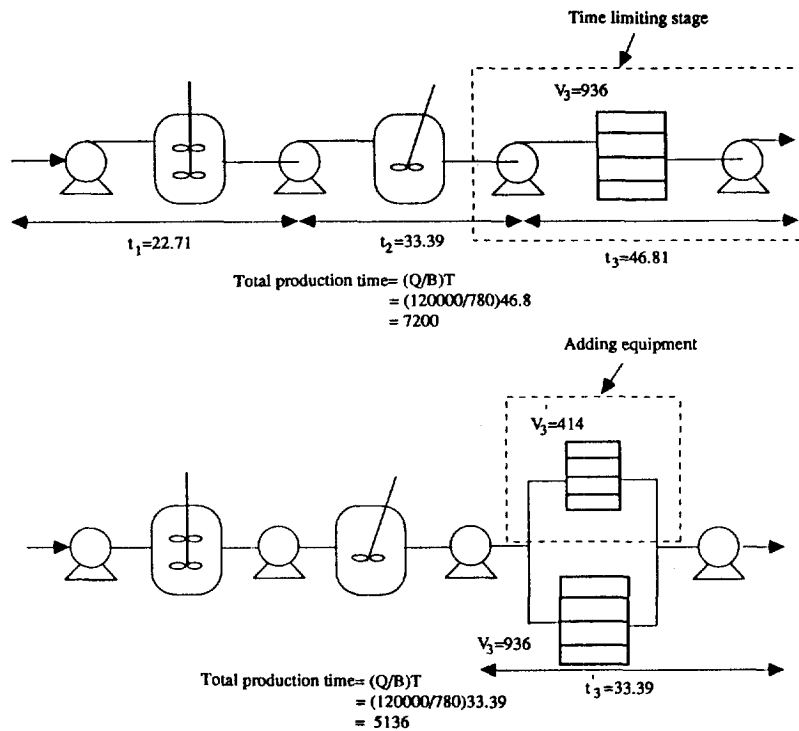


Fig. 5. Example of retrofitting.

걸리는 batch subtrain에 장치를 평행하게 추가함으로써 전체적인 장치의 자본비는 증가하지만 전체 생산시간의 단축과 아울러 생산량의 증가를 통한 생산성의 향상을 도모할 수 있었다. Fig. 6은 세번째 batch subtrain에서 추가되는 장치의 투자비와 LCT와의 관계로 전체 공정의 LCT가 추가하는 장치의 부피증가로 인해 줄어들다가 일정수준 유지되는 지점(LCT가 subtrain 2의 공정시간으로 바뀌므로 LCT가 더 이상 감소가 안됨)에서 장치의 최적크기가 결정되어야 함을 보여준다.

5. 합 성

5-1. Superstructure

앞의 개보수 예제에서 LCT가 걸리는 공정에 장치를 평행하게 추가함으로써 좀더 나은 공정구조를 얻을 수 있었다. 이러한 시도로부터 장치를 평행하게 또는 직렬로 추가함으로써 경우에 따라서는 공정이 개선됨을 알 수 있다. 따라서 초기설계시부터 최적 공정 네트워크를 효과적으로 찾는 방법을 제안한다. 최적 공정 네트워크를 찾는 방법은 가능한 공정구조를 모두 포함하는 superstructure를 만들고 이러한 superstructure에서 MINLP 모델에 의해 최적 공정 네트워크를 구하는 것이다. Fig. 7(a)는 원료물질이 생산품이 될 때까지 세 개의 단계(stage)와 여섯 개의 일(task)을 거치는 공정이며 (b)는 이러한 공정이 가질 수 있는 모든 공정네트워크를

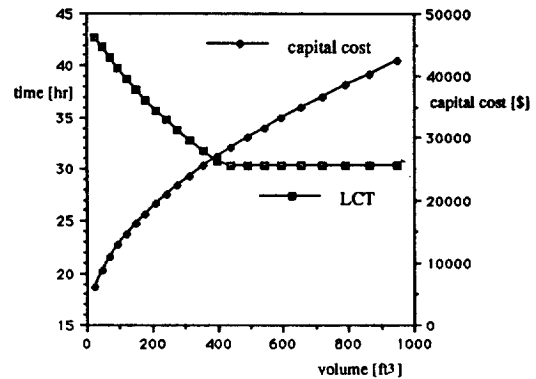


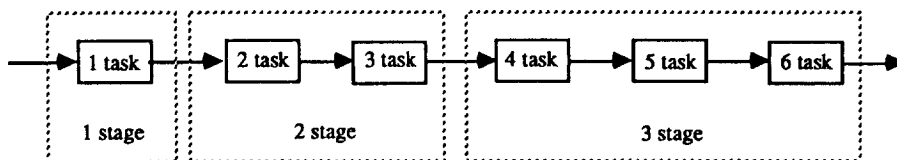
Fig. 6. Relation of LCT and capital cost of adding unit.

포함하는 superstructure를 보여주고 있다.

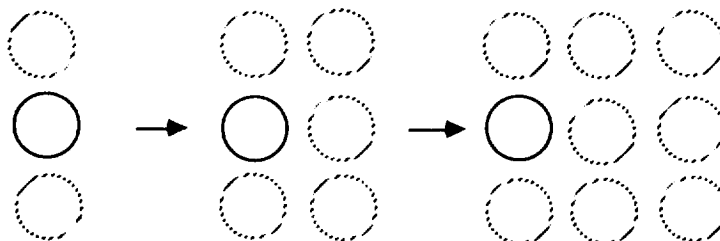
5-2. MINLP 모델

이런 superstructure에서 포함하는 공정구조를 모두 검토해 봄으로써 최적 공정 네트워크를 구하게 되는데 이러한 방법론으로 본 논문에서는 혼합정수 프로그래밍 (mixed integer programming)을 사용하였다. 3의 장치 크기 결정 문제에 m_{η} 와 X_{rki} 라는 정수형 변수를 추가함으로써 MINLP 모델이 만들어진다.

$$\text{Minimize } \sum_{r=1}^{K_i} X_{rki} m_{\eta} (V_{\eta})^{\alpha_i} \quad (16)$$



(a) Process with 6 tasks



(b) Possible process network



Fig. 7. Superstructure of batch processes.

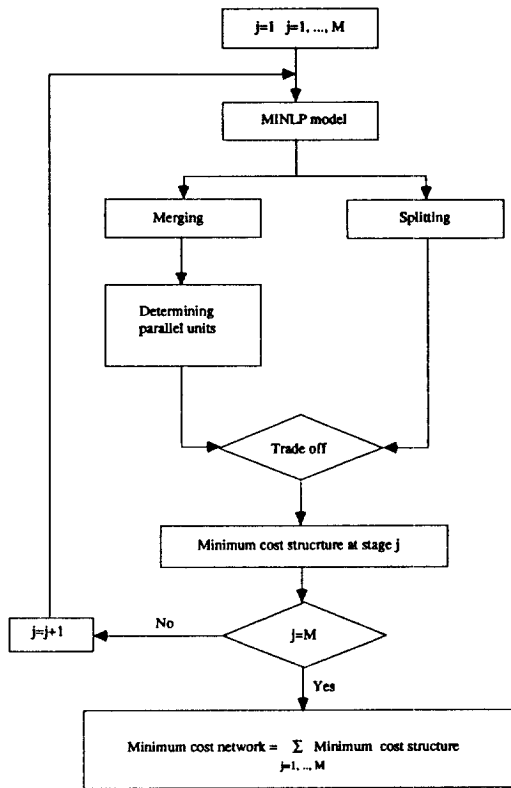


Fig. 8. Flowchart for optimal design procedure.

Subject to

$$Y_{rj} \geq X_{rkj} S_{kj} \quad r=1, \dots, K_j \quad (17)$$

$$k=r, \dots, K_j$$

$$V_{rj} = B Y_{rj} \quad r=1, \dots, K_j \quad (18)$$

$$\sum_{r=1}^K X_{rkj} = 1 \quad k=1, \dots, K_j \quad (19)$$

$$T \geq \sum_{k=r}^{K_j} (X_{rkj} P_{kj}) / m_{rj} \quad r=1, \dots, K_j \quad (20)$$

$$H \geq (Q/B) T \quad (21)$$

$$m_j^{\min} \leq m_j \leq m_j^{\max} \quad j=1, \dots, M \quad (22)$$

$$V_{rj}^{\min} \leq V_{rj} \leq V_{rj}^{\max} \quad r=1, \dots, K_j \quad (23)$$

$$j=1, \dots, M$$

MINLP 모델에서는 목적함수 (16)을 각 단계에서 회분식 장치의 투자비로 보고 있으며 m_{rj} 는 j번째 단계에서 r번째 장치가 평행하게 놓일 수 있는 갯수이며 V_{rj} 는 j번째 단계에서 r번째 장치의 부피를 나타내며 $X_{rkj}(k \geq r)$ 는 j번째 단계에서 k번째 일이 r번째 장치에서 이루어질

Table 3. Data of synthesis example

stage	1	2	3
task	1	1 2	1 2 3
S	2.74	1.44 1.44	1.20 1.20 1.20
P ⁰	3.0	12.0 8.0	10.0 10.0 15.0
c	0.172E-1	0.612E-5 0.0	0.0 0.0 0.364E-1
\bar{S}	0.865	2.00 0.0	0.0 0.0 0.832
a	592	582 582	1200 1200 1200
α	0.65	0.39 0.39	0.52 0.52 0.52

Table 4. Assignment of task and equipment in each stage

Stage 1	Stage 2	Stage 3
(1) ₁	(1, 2) ₁	(1, 2, 3) ₁
	(1) ₁ , (2) ₂	(1) ₁ , (2, 3) ₂
		(1, 2) ₁ , (3) ₂
		(1) ₁ , (2) ₂ , (3) ₃

때가 "1"이고 나머지 경우는 "0"이 되는 binary variable이다. Y_{rj} 는 각 단계에서 r번째 장치에서 수행되는 하나 또는 그 이상의 일들의 크기인자 중에서 가장 큰 값을 말하며 P_{kj} 는 j번째 단계에서 k번째 일이 걸리는 시간을 말한다. (22)식에서 m_j^{\min} , m_j^{\max} 는 j번째 단계에서 평행하게 놓일 수 있는 장치의 범위를 나타내고 있으며 (23)식의 V_{rj}^{\min} , V_{rj}^{\max} 는 j번째 단계에서 r번째 장치가 사용 가능한 범위를 나타내고 있다.

Fig. 8은 제시된 MINLP 모델을 가지고 최적 공정 네트워크를 찾는 순서도이다. MINLP 모델은 정수형 변수와 이러한 정수형 변수에 대한 제약조건이 추가되었고 이러한 모델에서 최적 공정 네트워크를 찾는 방법론으로는 GINO[9]를 이용하였다.

예제 3

Table 3은 MINLP 모델에 의해서 최적 공정 네트워크를 구하는 과정을 보여주는 예제의 데이터이며 Table 3에서 볼 수 있듯이 첫 단계에서 하나의 일이 두번째 단계에서는 두 개의 일이 세번째 단계에서는 세 개의 일이 수행된다. 각 단계에서 장치가 일렬로 놓일 때 가능한 일과 장치의 할당은 Table 4와 같다. 위에서 가령 세번째 단계의 (1)₁, (2, 3)₂는 1번 장치에서 1번 일이 2번 장치에서 2, 3번 일이 수행됨을 나타내고 있다. Fig. 9는 MINLP 모델에 의해서 구해진 공정 네트워크이며 (a)는 각 단계가 하나의 장치에서 이루어지는 것을 보여주고 있으며 (b)는 (a)에 평행하게 장치를 추가한 것이며 (c)는 세번째 단계에서 일 1과 일 2, 3을 분리한 것이다. Table 5는 주어진 공정네트에 대해 장치의 크기를 결정한 결과이고 Fig. 10은 Fig. 9의 (a), (b), (c)에

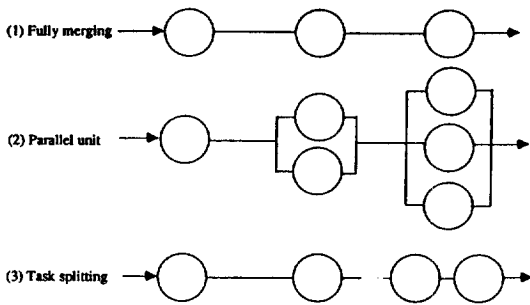


Fig. 9. Process networks by MINLP model.

Table 5. Results of synthesis example

	(1)	(2)	(3)
P.I.	176580	155,510	137,120
B	780.0	219.7	270
T	46.8	13.18	27
m ₁	1	1	1
m ₂	1	2	1
m ₃	1	3	1
V ₁	2137.2	602	1234.5
V ₂	1123.2	316	648.7
V ₃	936.0	300	540.6
R ₁	300	300	300
R ₂	300	300	300
R ₃	441.4	300	387
R ₄	1800	637	300

대한 장치 자본비를 나타낸 것이다. Fig. 10에서 이 때까지의 문헌[6]은 (b)가 최적 공정 네트워크라고 밝혔지만 우리가 제시한 MINLP 모델에 의해서는 (b)도 찾을 수 있을 뿐만 아니라 (c)가 장치의 투자비를 최소로 하는 최적 공정 네트워크임을 알 수 있다. 이와 같이 본 논문에서 제시하고 있는 MINLP 모델은 수학적인 방법을 사용하여 최적 공정 네트워크를 찾기 때문에 모든 가능한 공정 네트워크를 고려해 줌으로써 진화론적인 방법이나 경험적인 법칙에서 빠뜨릴 수 있는 경우를 고려해 줄 수 있는 장점이 있다.

6. 중간저장탱크

지금까지는 일을 합병하거나 분리 그리고 장치를 평행하게 놓음으로써 최적 공정 네트워크를 찾는 방법론을 언급하였고, 여기서는 초기설계시에 중간저장탱크를 추가하여서 회분식/반연속식 설비의 장치 투자비를 줄이는 방법을 제시한다. Fig. 11의 (a)는 중간저장탱크가 없는 상태이고 (b)는 하나가 (c)는 둘이 추가된 상태이다. Table 5는 (a), (b), (c)에 대한 장치의 투자비와 각

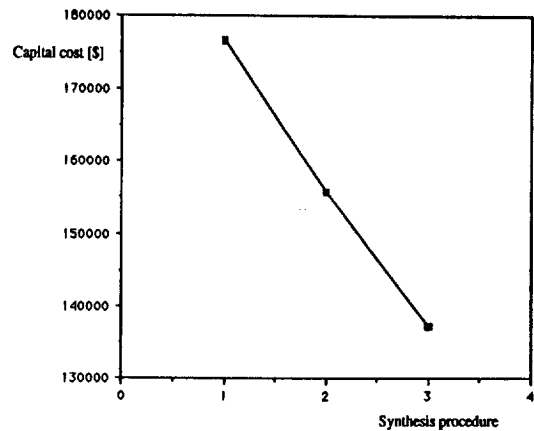


Fig. 10. Plot of capital cost.

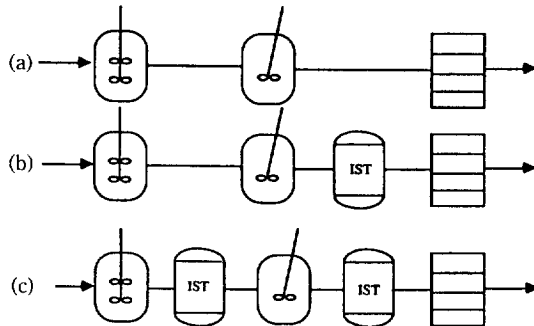


Fig. 11. Network with intermediate storage tank.

Table 6. Results of process with intermediate storage tank

P.I.	(a) 176580	(b) 148400	(c) 111380
B	780.0	448.8, 790.67	92.6, 462.6, 809.
T	46.8	26.93, 47.44	5.6, 27.76, 48.6
V ₁	2137.2	1229.7	300.0
V ₂	1123.2	646.3	666
V ₃	936	948.8	971
R ₁	300	300	300
R ₂	300	300	300
R ₃	441.4	404.9	300
R ₄	1800	1194.7	1463.8

변수의 결과이다. Table 6에서 중간저장탱크를 추가함에 따라 각 batch subtrain은 독립적으로 조절할 수 있고 LCT가 분리됨을 알 수 있다. 이와 같이 LCT의 분리 효과는 회분식 설비의 부피 감소를 가져와 결과적으로 장치의 투자비가 줄어듦을 알 수 있다. 물론 이는 추가되는 중간저장탱크에 대한 비용은 회분식 설비에 비

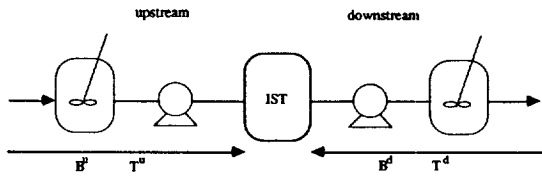


Fig. 12. Process with intermediate storage tank.

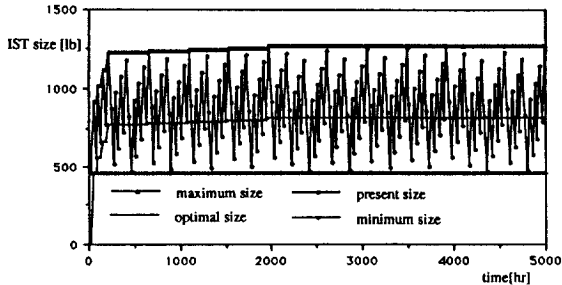


Fig. 13. Optimal size of intermediate storage tank.

교하여 무시할 수 있다는 가정이 있기 때문이다. 실제로 중간저장탱크의 비용은 회분식 설비의 비용과 같은 부피로 비교할 때 20-30% 정도이므로 중간저장탱크의 설치에 의한 회분식 설비의 부피 감소 효과와 각 batch subtrain의 독립적인 조업을 고려할 때 중간저장탱크의 설치가 유리하다. 또한 중간저장탱크를 추가함으로써 장치 비사용시간이 줄어들어 장치의 효율적인 사용이 가능하다. 이와 같이 중간저장탱크를 추가함으로써도 좀더 나은 공정 구조로 개선되는 것을 알 수 있다. 이 경우 추가되는 중간저장탱크의 최적 크기를 결정해야 하는데 Fig. 12와 같은 공정에 대해서 upstream과 downstream사이에서 중간저장탱크가 들어갈 때 upstream, downstream의 한 회분의 생산량 B 와 LCT T 를 이용해서 동적모사함으로써 중간저장탱크의 최적 크기를 결정할 수 있었다. 동적모사 결과인 Fig. 13으로부터 중간저장탱크의 최적 크기는 최대크기에서 최소크기를 뺀 값이다. 참고문헌 5에서와 같이 upstream과 downstream의 G.C.M.을 이용하여 크기를 구하는게 아니라 장치크기 결정문제의 결과로부터 중간저장탱크의 최적 크기를 동적모사를 통해 결정함으로써 중간저장탱크의 최적 크기 뿐만 아니라 최대, 최소 크기를 확인할 수 있다. 이 문제는 Fig. 11(b)의 중간저장탱크의 최적 크기를 Table 5(b)의 데이터를 가지고 계산한 것이다.

7. 결 론

본 논문에서는 지금까지의 논문과는 다르게 super-

structure라는 개념을 도입하여 MINLP 모델에 의해서 전체 일을 수행하기 위한 장치의 수와 그 장치에 합당한 일의 할당, 그리고 평행하게 놓일 수 있는 장치의 수를 결정하였다. 또한 이와 같은 최적 공정 네트워크를 가지고 주어진 시간에 정해진 양을 생산하기 위해서 필요한 회분식/반연속식 설비의 최적크기를 결정하는 방법을 제시하였다. 그리고 중간저장탱크가 설치될 때 중간저장탱크의 최적 크기를 다른 접근법으로 결정하였으며 기존에 있는 공장을 개보수하는 방법도 제안하였다.

감 사

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

NOMENCLATURE

- t_j : operation time of batch subtrain j [hr]
- T, LCT : maximum operation time in each batch subtrain [hr]
- j : batch equipment
- k : semicontinuous equipment
- l : semicontinuous stage
- N : number of semicontinuous equipment consisting of process
- M : number of batch equipment consisting of process
- L : number of semicontinuous stage consisting of process
- r : semicontinuous unit
- R_l : number of semicontinuous unit in semicontinuous stage l
- K_j : tasks at stage j
- V_j : volume of batch equipment j [ft³]
- B : batch size of the product [lb]
- B^u : batch size of upstream [lb]
- B^d : batch size of downstream [lb]
- T^u : limiting cycle time of upstream [hr]
- T^d : limiting cycle time of downstream [hr]
- S_j : size factor in batch equipment j [ft³/hr]
- Θ_k : processing time of semicontinuous equipment k [hr]
- $\Theta_{f(j)}$: filling time of batch equipment j
- $\Theta_{d(j)}$: discharging time of batch equipment j
- \bar{S}_k : size factor of semicontinuous equipment k [ft³]

- /lb]
- R_k : processing rate of semicontinuous equipment k [ft³/hr]
- P_j : operation time of batch equipment j [hr]
- Q : amount of product required [ft³]
- H : available production time, time horizon [hr]
- m_j : parallel units
- V_j^{min} : minimum volume of jth equipment
- V_j^{max} : maximum volume of jth equipment
- R_k^{min} : minimum processing rate of kth semicontinuous equipment
- R_k^{max} : maximum processing rate of kth semicontinuous equipment
- a_i, b_k : cost coefficients associated with particular types of equipment
- X_{rki} : if kth task of stage j is assigned to rth unit, $X_{rki} = 1$. Otherwise, $X_{rki} = 0$
- m_{rj} : parallel units of rth unit at stage j
- V_{rj} : volume of batch equipment r at stage j
- Y_{rj} : batch subtrain size factor of rth unit at stage j
- t_{rj} : batch subtrain cycle time of rth unit at stage j
- P_{kj} : processing time of kth task in stage j
- S_{kj} : size factor of kth task in stage j
- m_j^{min} : minimum parallel units in stage j
- m_j^{max} : maximum parallel units in stage j
- V_{rj}^{min} : minimum volume of rth equipment in stage j
- V_{rj}^{max} : maximum volume of rth equipment in stage j

Greek Letter

α_i, β_k : cost coefficients associated with particular types of equipment

Abbreviations

LCT : limiting cycle time
 GRG : generalized reduced gradient
 MINLP : mixed integer nonlinear programming
 IST : intermediate storage tank
 P. I. : performance index

REFERENCES

1. Ketner, S. E.: *Chem. Engng*, **67**, 121(1960).
2. Loonkar, Y. R. and Robinson, J. D.: *Ind. Engng Chem. Process*, **9**, 625(1970).
3. Sparrow, R. E., Forder, G. J. and Rippin, D. W.: *Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.*, **14**, 197(1975).
4. Grossmann, I. E. and Sargent, W. E.: *Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.*, **21**, 348(1979).
5. Takamatsu, T., Hashimoto, I. and Hasebe, S.: *Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.*, **21**, 431(1982).
6. Yeh, N. C. and Reklaitis, G. V.: *Comput. Chem. Engng*, **11**, 639(1987).
7. Reklaitis, G. V., Ravindran, A. and Ragsdell, K. M.: "Engineering Optimization", Wiley-Interscience(1983).
8. Lasdon, L. S. and Waren, A. D.: "GRG2 User's Guide", The Scientific Press(1982).
9. Liebman, J. and Lasdon, L. S.: "Modelling and Optimization with Gino", The Scientific Press(1986).