동상과 이상 조업을 고려한 회분식 공정의 예비 설계

이호경 정재학* 문 일** 이인범
포항공대 화공과, 영남대 화공과*, 연세대 화공과**

Preliminary Design of Multiproduct Batch Processes Considering both in Phase and in Sequence mode

Ho-Kyung Lee, Jae Hak Jung*, Il Moon**, In-Beum Lee
Dept. of Chemical Pohang University of Science and Technology
Dept. of Chemical Eng., Yeung Nam University*
Dept. of Chem. Eng.,Yonsei University**

서 론

화학 공정 산업의 많은 부분을 차지하고 최근에 들어서 많은 관심을 끌고 있는 회분식 공정에 대한 연구는 미국과 영국등의 선진국 뿐만 아니라 여러 개발 도상국에서 진행되고 있다.

회분식 공정의 예비설계의 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 데이타는 생산품의 갯수, 각 생산품이 최종 제품이 될때까지 거치는 생산 단계, 각 제품의 수요, 각 장치에 대한 크기 인자, 공정 시간 그리고 총 조업 시간이다. 이렇게 주어진 데이타를 가지고 결정해야 할 것은 크게 세가지 인데 합성문제, 설계문제, 그리고 생산 계획 문제이다. 합성 문제에서 세부적으로 결정해야할 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 방법중의 한가지를 선택해서 제약 조건에 추가하게 된다.

본 논문에서 다루어질 내용은 회분식 공정의 합성에서 평행하게 장치를 추가하는 문제에 관한 것인데 지금까지 발표된 논문에서는 평행하게 추가하는 위치, 추가 장치의 조업형태 그리고 그 크기를 구하기 위해서 수학적인 방법(Kocis와 Grossmann[5], Briewar와 Grossmann[1])과 경험적인 방법(Yeh와 Reklaitis[8], Patel과 Mah [7])으로 문제를 해결할려고 시도해왔다. 수학적인 방법은 주로 혼합정수 비선형 프로그램을 이용하여 그 해를 구하였는데 지금까지의 논문에서는 수식 모델의 한계성으로 장치를 평행하게 추가할때 그 장치가 이상(in sequence mode)으로만 조업된다고 가정하여 문제를 풀었다. 그러나 이렇게 구해진 합성 구조는 장치를 평행하게 추가 해서 구할 수 있는 최적 합성구조와 비슷한 결과는 얻을 수 있지만 완벽한 결과로는 볼 수 없다. 왜냐하면 평행하게 추가된 장치가 경우에 따라서는 동

상(in phase mode)으로 조업될 기회를 잃기 때문이다. 그래서 여기서는 먼저 혼합정수 비선형 프로그램을 이용하여 이상 조업으로 추가하는 위치를 결정하고 이 결정된 위치에서 제약 일회 생산량을 체크해봄으로써 경우에 따라서는 동상조업의 가능성을 타진하여 좀 더 나은 합성 구조를 구한다. 여기서는 이미 발표된 문헌 예제들과 비교하기 위해서 단순 생산 계획으로 제품을 생산하고 반연속식 설비를 고려하지 않았다.

이 론

이 논문에서 다루게 될 내용은 합성문제에서 장치를 평행하게 추가해서 최소의 자본비로 목표하는 생산량을 달성하는 장치의 크기를 결정하는 문제이다. 지금까지 이러한 문제를 풀기위한 방법론으로는 수식적 모델을 사용하여 혼합정수 비선형 프로그램을 푸는 방법과 경험적인 방법을 사용하는 것이다. 장치를 평행하게 추가해서 조업하는 방식에는 동상조업과 이상조업이 있는데 동상 조업이란 두개의 평행한 장치에 동시에 물질을 장입하여 제약 일회 생산량을 늘이는 조업방법이고 이상조업은 같은 시간대가 아니라 다른 시간대에 물질을 장치에 장입하여 제약 회전 시간을 감소시키는 조업 형태이다. 즉, 동상 조업은 제약 일회 생산량을 늘려 생산량을 증가시키는 것이고 이상조업은 제약 일회 시간을 줄여 생산성을 높이는 조업 방식이다. 여기서 제시하는 방법은 먼저 기존의 혼합 정수 비선형 프로그램으로 이상으로 추가되는 구조를 합성하는데 아래의 목적 함수와 제약 조건은 Kocis 와 Grossmann [5] 그리고 Birewar와 Grossmann[1]이 최적 합성 및 설계에 사용한 혼합 정수 비선형 프로그램이다.

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

Subject to

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

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

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

$$V_j^{min} \leq V_j \leq V_j^{max} \tag{5}$$

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

위 식에서 평행하게 놓이는 장치의 수를 나타내는 N_j가 정수형 변수이다. (1)은 자본비에 대한 목적 함수이고 (2)는 회분식 설비의 부피, (3)은 LCT 그리고 (4)는 생산량에 따른 총조업시간에 관한 제약 조건이다. 나머지 두개의 제약 조건은 회분식 설비의 선택 가능한 범위와 LCT T_{Li}, LBS B_i가 양수임을 제한하는 것이다. 이 혼합 정수 비선형 프로그램을 풀기위해서 DICOPT++ 이용해서 IBM RS/6000에서 문제를 풀었다 (Brooke 등[2]).

평행하게 추가된 장치가 각 제품의 생산에서 이상으로 조업되어 제약 일회 시간을 줄이는지의 여부를 검토한다. 그리고 만약 평행하게 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. 동상 조업을 고려한 비선형 프로그램을 풀기 위해서 GAMS의 MINOS 5.3을 이용하였다 (Brooke 등 [2]).

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

회분식 설비의 부피에 관한 제약 조건중에서 만약 j번째에 평행하게 추가된 장치가 i 제품을 생산할 때 동상 조업으로 이용될 수 있으면 다음 제약 조건 (8)로 수정된다.

$$V_j \geq \frac{S_{ij}}{N_j^{obt}} B_i \qquad \text{for i=i and j=j} \tag{8}$$

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

$$T_{Li} \geq \frac{t_{ij}}{N_j^{obt}} \quad i=1,N \ , \ j=1,M, \ N_j^{obt} = 1, 2, 3 \tag{9}$$

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

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

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

적용 사례

적용 문제는 Koces와 Grossmann [5]이 혼합 정수 비선형 프로그램을 사용하여 푼 문헌 예제로써 초기 설계 자본비를 285,506로 발표하였다. 이 문제는 여섯개의 생산단계를 가지는 회분식 공장에서 다섯개의 다른 제품을 생산하는 공정에 관한 것이다. 본 논문에서 제시하는 순서에 의해서 먼저 이상 조업을 고려한 혼합정수 비선형 프로그램을 풀고 공정 분석과 비선형 프로그램을 통해 최종적으로 공정도를 얻는다. 장치에 대한 초기 설계 자본비는 본 연구의 접근 방법으로 285,506에서 270,040으로 감소함을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 두단계 최적화를 통하여 동상조업과 이상조업 둘다를 고려한 합성 구조를 제시한다.회분식 공정의 예비설계에서 장치를 평행하게 추가하는 합성의 경우 지금까지는 장치가 이상으로 조업되는 경우만 고려하였다. 그 이유는 동상 조업을 고려하게 되면 혼합정수 비선형 프로그램에서 결정해야할 이산(binary) 변수의 수가 2N배로 증가하고 정형화된 수식을 만들기가 힘들기 때문이다. 지금까지 개발된 혼합 정수 비선형 프로그램으로는 이산 변수의 수가 많아지면 답을 구할 수가 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 조

업 형태로 조업되어지는 경우의 문제를 다룬적이 있으나 (Lee등 [4]) 초기 설계시에 이러한 경우를 고려함으로써 네개의 문헌 예제에 적용하여 3에서 12%의 초기 투자비를 줄일 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 공정산업의 지능자동와 연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로, 연구비를 지원해 주신 연구센터에 감사드립니다.

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, Ho-Kyung , Lee, In-Beum and Chang, Kun Soo : *HWAHAK KONGHAK* 30, 237(1992).
4. Lee, Ho-Kyung , Lee, In-Beum, Yang, Dae Ryook and Chang, Kun Soo : *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. Yeh, N.C. and Reklaitis, G.V. : *Comp. Chem. Eng.* , 11, 639 (1987).