

무배관 회분식 공정의 예비 설계

유동준, 이호경, 정재학*, 이인범
포항공과대학교 지능자동화 연구센터, *영남대학교 공과대학 화학공학과

Preliminary Design of Pipeless Batch Processes

Dong Joon Yoo, Ho-Kyung Lee, Jae Hak Jung*, In-Beum Lee
Automation Research Center, Pohang Univ. of Science and Technology,
*Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Yeungnam University

서론

최근 제품 생산의 다품종 소량화 추세에 맞추어 회분식 공정의 중요성이 부각되고 있다. 90년대 들어서는 기존 회분식 공정의 한계점을 보완한 새로운 공정 형태인 무배관 공정(pipeless process)이 활발히 연구되고 있다[5, 6, 7, 10, 11]. 무배관 공정은 물질이 배관을 통하여 운송된다는 기존의 개념을 바꾸어, 이동성을 갖는 회분식 반응기, 생산에 필요한 공정 단위들(원료 도입역, 반응역, 혼합역, 제품 방출역, 세척역 등)을 원하는 순서에 따라 이동이면서 제품을 생산하는 형태를 말한다. 이로써, 공장이 세워짐과 동시에 생산물의 종류 및 양이 결정되어 버리는 기존 공정의 한계가 극복되어 수시로 변하는 수요에 민첩하게 대응할 수 있게 되었다. 무배관 공정은 Lee 등[4]에 의해 국내에 소개된 바 있다. 무배관 공정을 구성하는 장치들은 각 제품 생산에 공용되는 다목적 장치들로, 다목적 공정(multipurpose process)의 설계 시에는 공정의 구성뿐만 아니라 생산 계획까지도 함께 고려해야 최적 설계 결과를 얻을 수 있다.

본격적인 무배관 공정의 설계는 Hasebe 와 Hashimoto[2]로부터 시작되었다. 그들은 생산 계획의 고려 없이 간단한 생산 절차를 갖는 제품들을 생산하는 동일 용량의 장치들로 구성된 무배관 공정의 설계를 위한 알고리즘을 제안하였다. Realff 등[8]은 일반적인 생산 절차를 갖는 제품 생산을 위한 다양한 특성의 장치들로 이루어진 무배관 공정의 설계를 혼합정수선형계획(Mixed Integer Linear Programming, MILP)문제의 형태로 나타내었다. 그런데, 그들의 방법은 결과를 내기 위해 대단히 큰 규모의 MILP 문제를 풀어야 하기 때문에 극히 적은 수의 제품을 생산하는 소규모의 공정 설계 시 적용하는 것으로 만족해야 했다. 또한, 그들은 역의 배치(layout)도 고려하여 설계하고자 했는데, 이로 인해 문제의 복잡도가 커졌고, 새 제품이 기획되어 생산되는 제품의 구성이 달라질 때마다 역들을 다시 배치해야 하는 등 무배관 공정 고유의 유연성을 감소시킬 여지가 있었다.

본 연구에서는 공정 구성과 생산 계획을 동시에 고려하여 무배관 공정의 설계 문제를 풀었다. 공정 설계 방법론으로 MILP를 채택했고, MILP 상의 정수 변수의 수가 작아지도록 하여 실제 공정의 설계에 적용 가능하도록 했다.

이론

무배관 공정 설계에 있어 생산 계획은 주기적이며, 이산 시간(discrete time)에 기초하고[3], 용기와 AGV(Automated Guided Vehicle)는 고정되어 있고, 모든 용기 및 역의 용량은 같고, 과업은 비선점적(non-pre-emptive)인 것으로 가정했다. 이들 가정 하에 무배관 공정 설계를 위한 MILP 문제를 구성하면 다음과 같다.

목적함수

1. 장치비의 최소화(minimization of capital cost)

$$\min OF_1 = M CC_v(V) + \sum_{n \in N \cup \{wait\}} S_n CC_n(V) \quad [\$] \quad (1)$$

2. 공정이익의 최대화(maximization of the plant profit)

$$\begin{aligned} \max OF_2 = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{s \in SP_i \in D_t} \sum B_{it} v_s - \sum_{s \in SF_i \in F_t} \sum B_{it} p_s - \sum_{i \in I} \{W_{it} OC^0_i(V) + B_{it} OC^1_i(V)\} \right. \\ \left. - \sum_{s \in S} W_{st} OC_s(V) \right] \times \frac{HourPerMonth}{T} - OF_1 \times CCF \quad [\$ / month] \quad (2) \end{aligned}$$

제약 조건

$$\sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T W_{it} \leq M \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$\sum_{n' \in N'} \sum_{i \in I_n'} \sum_{t=1}^T W_{it'} \leq \sum_{n \in N_n} S_n \quad \forall i' \in I, t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S} W_{st} \leq S_{wait} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$0 \leq M \leq M^{\max} \quad (6)$$

$$0 \leq S_n \leq S_n^{\max} \quad \forall n \in N \quad (7)$$

$$0 \leq S_{wait} \leq S_{wait}^{\max} \quad (8)$$

$$0 \leq B_{it} \leq W_{it} V \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$0 \leq B_{st} \leq W_{st} V \quad \forall s, t \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I_t^n} \sum_{t=1}^T W_{it} = \sum_{i \in I_t^{out}} \sum_{t=1}^T W_{it} \quad \forall s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I_t^{in}} \sum_{t=1}^T \rho_{is}^{in} B_{it} = \sum_{i \in I_t^{out}} \sum_{t=1}^T \rho_{is}^{out} B_{it} \quad \forall s \in SM \quad (12)$$

$$W_{st} = W_{s,t-1} + \sum_{i \in I_t^{in}} W_{it} - \sum_{i \in I_t^{out}} W_{it} \quad \forall s \in S, t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$B_{st} = B_{s,t-1} + \sum_{i \in I_t^{in}} \rho_{is}^{in} B_{it} - \sum_{i \in I_t^{out}} \rho_{is}^{out} B_{it} \quad \forall s \in SM, t = 1, \dots, T \quad (14)$$

$$P_s^{\min} \leq \sum_{i \in D_s} \sum_{t=1}^T B_{it} \frac{H}{T} \leq P_s^{\max} \quad \forall s \in SP \quad (15)$$

제시된 MILP 문제의 해를 구하기 전에 우선 주기 T 와 용량 V 의 값을 정해야 한다. 가능한 (T, V) 의 모든 조합에 대한 MILP 문제의 최적해로부터 전체적인 최적해를 얻을 수 있다. 정수 할당 변수에 관해서는, W_{it} 만을 정수로 지정하면, 목적 함수와 제약 조건에 의해 최적 해에서 다른 정수 변수는 모두 정수 값을 갖게 된다. Fig. 1 은 MILP 로부터 구한 무배관 공정의 생산 계획 결과의 한 예이다.

결론

본 연구에서는 생산 계획을 고려한 무배관 공정의 설계를 위한 MILP 문제 형태의 최적화 기법을 제시하였다. 제시된 방법에서는 목적 함수가 장치 가격, 운전 비용 및 생산 계획 등의 세부 사항을 고려하기 때문에 기존에 Hasebe 와

Hashimoto[2]나 Realff 등[8]에 의해 제시된 방법들을 사용할 때보다 정확한 설계 결과를 얻을 수 있다. 또한, 주기적인 운전 방식을 채택하고, 설계 및 운전에 관련된 변수(M , S_n , S_{wait} , W_{it} , W_{st})들을 Realff 등[8]이 사용한 이진 변수가 아닌 정수 변수로 정의하는 기법등을 통해 정수 변수의 수가 현저하게 줄어 들어, 제품의 수와 과업의 종류가 다양한 실제 무배관 공정 설계로의 적용이 가능하였다. 제안된 대기 과업의 개념은 필요한 대기역의 수를 계산하는데 이용될 뿐더러, 불안정한 상태의 물질에 대한 대기 배용(OC_s)을 크게 지정함으로써 이들이 대기하는 일을 생산 계획 상에서 배제할 수 있다. 생산 계획 결과의 예를 통해 알 수 있듯이, 이동 용기 및 각 역종의 이용 빈도가 전체 시간 간격에 걸쳐 고르게 분포할수록 적은 수의 장치로 많은 수의 과업을 수행할 수 있다. 이를 무배관 공정 최적 생산 계획의 특징으로 볼 수 있다.

사용기호

B_{it} : sum of batch sizes that start undergoing task i 's at the beginning of time period t [kg]

B_{st} : sum of batch sizes in state s that start waiting tasks at the beginning of time period t [kg]

CCF : capital charge factor

$CC_n(V)$: cost of station of type n , a function of V

$CC_v(V)$: cost of movable vessel, a function of V

$CC_{wait}(V)$: cost of waiting station, a function of V

D_s : set of tasks discharging the product of state s

F_s : set of tasks feeding the feed(raw material) of state s

H : planning horizon

$HoursPerMonth$: monthly working hours

I : set of tasks

I_n : set of tasks suitable in station n

M : number of movable vessels

M^{max} : maximum number of movable vessels

N : set of station types excluding waiting station

N_i : set of station types suitable for task i

$OC_i^0(V)$: fixed operating cost of task i , a function of V

$OC_i^1(V)$: variable operating cost of task i , a function of V

$OC_s(V)$: waiting cost of batch in state s , a function of V

P_s : production of product s

P_s^{max} : maximum production of product s

P_s^{min} : minimum production of product s

S : set of states

SF : set of feed states

SM : set of (physical) material states

SP : set of product states

S_n : number of type n stations

S_n^{max} : maximum number of type n stations

S_{wait} : number of waiting stations

S_{wait}^{max} : maximum number of waiting stations

T : integer variable(multiples of Δt) representing the cycle time

T^{set} : set of T 's available

$T_s^{in(out)}$: set of tasks producing(consuming) the vessel in state s

V : capacity of units(movable vessels and / or stations) [kg]

V^{set} : set of V 's available

W_{it} : number of batches that start undergoing task i at the beginning of time period t

W_{st} : number of batches in state s that start waiting tasks at the beginning of time period t

p_i : processing time for task i

p_s : price of unit mass of feed s

v_s : value of unit mass of product s

그리이스 문자

Δt : elementary step time or unit time

ρ_{is}^{in} : proportion of material state s produced by task i

ρ_{is}^{out} : proportion of material state s needed for task i

참고문헌

1. Douglas, J. M.: "Conceptual Design of Chemical Processes", McGraw-Hill, New York(1988).
2. Hasebe, S. and Hashimoto, I.: "Optimal Design of a Multi-purpose Pipeless Batch Chemical Plant", *Proc. Fourth Intl. Symp. on Proc. Systems Engng.*, Montebello, Canada(1991).
3. Kondili, E., Pantelides, C. C. and Sargent, R. W. H.: "A General Algorithm for Short-term Scheduling of Batch Operations. Part I - MILP Formulation", *Comput. chem. Engng.*, 17, 211-227(1993).
4. Lee, H., Jung, J. H. and Lee, I.: "Pipeless process technology of batch operations", *Chemical Industry and Technology*, 13, No.3, 272-282(1995).
5. Niwa, T.: "Transferable Vessel-type Multi-purpose Batch Processes", *Proc. Fourth Intl. Symp. on Proc. Systems Engng.*, Montebello, Canada (1991).
6. Niwa, T.: "Pipeless Plants Boost Batch Processing", *Chem. Engng.*, June(1993).
7. Niwa, T.: "Evaluation of pipeless process and recipe-based operation", *Proc. 5th Intl. Symp. on Proc. Systems Engng.*, Kyungju, Korea, 497-502(1994).
8. Realf, M. J., Shah, N. and Pantelides, C. C.: "Simultaneous Design, Layout and Scheduling of Pipeless Batch Plants", *Proc. 5th Intl. Symp. on Proc. Systems Engng.*, Kyungju, Korea, 463(1994).
9. Shah, N., Pantelides, C. C. and Sargent, R. W. H.: "Optimal periodic scheduling of multipurpose batch plants", *Annals of Operations Research*, 42, 193-228(1993).
10. Shimatami K. and Okuda, K.: "Pipeless batch chemical plants offer a new approach", *Chem. Engng.*, 99, 181-182(1992).
11. Zanetti, R.: "'Pipeless' Batch Chemical Plants Offer a New Approach", *Chem. Engng.*, June(1992).

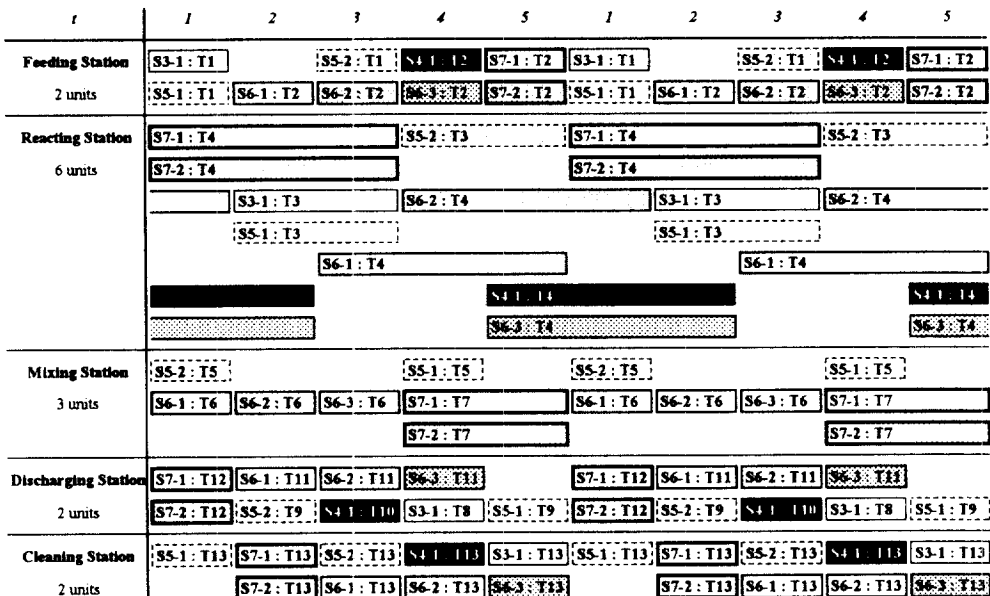


Fig. 1. 제시된 MILP로 구한 생산 계획 결과의 예.