

## 다목적 회분식 공정을 위한 조업 시간 결정 알고리즘

김민석, 이인범

포항공과대학교 화학공학과, 공정산업의 지능자동화연구센터

### Completion Time Algorithm for Multi-purpose Batch processes

Minseok Kim, In-Beum Lee

Department of Chemical Engineering, Automation Research Center, POSTECH

#### 서론

제약, 고분자 등 다품종 소량 생산을 위해 많이 사용되어지고 있는 회분식 조업에는 다제품(multi-product) 회분식 조업과 다목적(multi-purpose) 회분식 조업으로 크게 구분되어지며, 회분식 조업의 주요 특징인 유연한 생산 능력을 최대화하기 위해 생산계획에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

다제품 회분식 공정은 그 공정에서 생산될 수 있는 제품의 생산을 위해 거쳐야 할 단계의 순서가 동일하여, 그 공정에 설치된 장치들이 그 순서에 따라 고정되어 설치되어 있는 반면, 다목적 회분식 공정은 각 제품의 생산을 위한 공정 순서가 각 제품마다 다른 상황에서도 모든 제품을 하나의 공정 하에서 생산할 수 있도록 장치간의 연결이 유연하게 설치되어 있는 특성을 가지고 있다.

이러한 다목적 회분식 공정을 위한 생산계획에 관한 연구는 전체 생산 계획 문제를 production planning 단계, campaign generation 단계, production line scheduling 단계의 부문제로 나뉘어져 접근되어지고 있다[2]. Mauderli[1]등에 의해 처음 시도되어진 후 많은 시도가 있어왔다. 그러나 이들 연구에서는 문제 해결의 편의를 위해 setup time 과 각 장치 간의 이송시간(transfer time)에 대해서는 고려하지 않았으며, 각 장치 사이에서 병목현상을 해결하기 위해 설치되는 중간 저장 탱크의 활용 방안에 대해서도 고려하지 않고 모두 NIS 형태로 문제를 설정하여 생산계획을 작성하였다. 하지만 이러한 중간 저장 탱크 사용 전략은 실제 조업에서 조업 완료 시간에 미치는 영향이 중대하기 때문에, 이에 대한 고려 없이는 복잡한 수식 전개 과정을 통해 어렵게 구해진 생산계획을 실제 상황과 일치시킬 수 없게 된다.

#### 이론

본 연구에서는 이전의 문헌에서 문제 해결의 편의를 위해 고려되지 않았던 각 장치에서의 setup time, 장치간의 이송시간(transfer time), 각 장치 사이에서의 중간 저장 탱크 사용 전략으로는 중간 저장 탱크가 설치 되어 있지 않은 경우의 NIS 방안과, 설치되어 있는 FIS 방안, 그리고 설치 유무와 관계 없이 중간 생성체의 특성상 지체없이 다음 단계의 task 로 넘어가야하는 경우에 생기는 ZW 방안등으로 나눌 수 있다.

각 장치에서 각 회분이 머무는 시간은 다음 그림 2 에서와 같은 duration time 을 정의하여 할당하게 되며, setup time 은 장치의 특성치이고, transfer time

은 이송에 관여하는 pump의 특성에 의해 주어지며 다음 식들로 계산되어진다. 여기서  $\alpha, \beta, \gamma, \kappa, \lambda$  등은 각각의 장치 또는 제품의 특성에 따라 주어지는 상수 값들이다.

$p_{ijkl}$  : Processing time of  $l$ th batch for  $i$  product at  $j$  unit for  $k$  task =  $\alpha_{ik} + \beta_{ik} \cdot BS_i^\gamma$

$s_j$  : setup time of  $j$  unit =  $\kappa_j \cdot S_j + \lambda$

$t_{ij}$  : transfer time for  $i$  product from  $j$  unit to next unit =  $\tau_j \cdot BS_i$

본 연구에서는 각 회분들이 공정 상에서 거쳐가야할 생산 경로가 미리 주어지기 때문에 batch size가 결정되면 duration time block을 미리 계산해 둘 수 있게 된다.

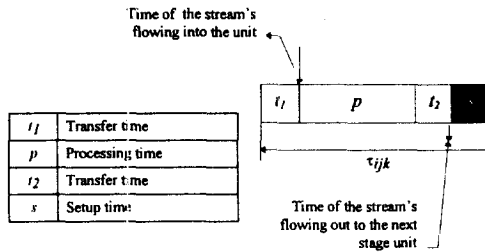


그림 1. Duration time block의 정의

본 연구에서는 기존의 수식적 방법에 의해 계산되어져온 조업완료시간 결정 방식을 지양하고 새로운 접근 방안으로서 simple heuristic rule-based 형태의 Gantt Chart Mapping Method를 제안하고자 한다. 이는 앞에서 정의한 duration time block을 미리 계산한 후 이를 Gantt Chart와 같은 Process Map 상에 순서대로 할당해 나가면서 각 회분간의 연결을 정의하는 중간저장탱크 사용 전략에 따라 해당되는 rule을 사용하여 할당하며, 만약 특정 block의 할당이 여타 rule에 배치되면 배치되는 rule이 모두 만족될 수 있을 때까지 그 이전에 대한 할당을 모두 지연시키는 방안을 사용하였다. 이러한 time block의 할당은 다음 그림 2에서 예를 보였다.

다목적 회분식 공정에서는 주어지는 campaign에 대해 1회에 공정에 투입할 양으로 나누어 생산을 하게 되며 각 회분들은 공정 상에서 각 제품의

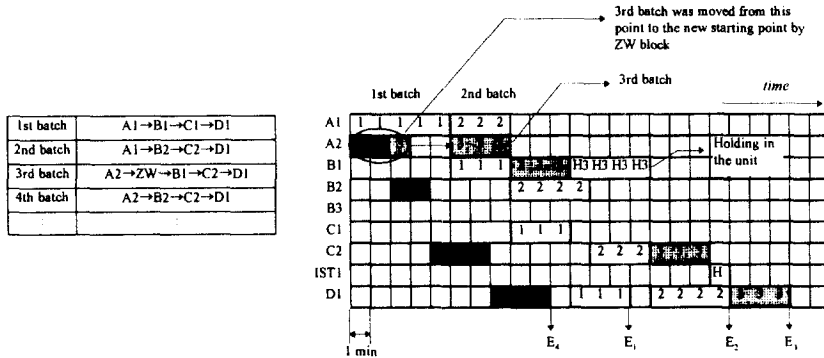


그림 2. Gantt Chart Mapping 방법에 의한 각 batch의 장치에 대한 할당

생산을 위해 필요로 되는 생산 단계를 수행하기 위해 각 단계를 수행할 수 있는 장치를 따라 생산이 이루어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 각 제품의 생산을 위한 campaign 으로부터 각 회분의 크기와 각 회분이 공정상에서 거쳐야할 생산 경로가 주어지는 경우, 그 제품의 생산 recipe 에 따라 주어진 생산 경로 상에 위치하는 각 장치에서 언제 그 제품의 생산을 위한 조업이 시작되고 언제 완료가 되는지를 결정하는 알고리즘을 개발하였다. 이때, 각 장치에서 다음 제품의 생산을 위한 setup time 과 각 장치 간의 이송시간 (transfer time)을 고려하여 계산하였다.

**적용**

앞의 방식으로 개발된 조업 완료 시간 결정 알고리즘의 적정성을 검토하기 위해 기존 문헌[1]에 각 장치에서의 조업 완료 시간을 확인할 수 있는 예제 공정을 선택하여 example 1 으로 하여 그 문헌에서의 조업 완료 시간과 본 연구에 의해 개발된 결정 알고리즘에 의해 계산된 조업 완료 시간을 비교하였으며, 본 연구의 새로운 고려 사항들을 위해 example 1 에서 사용되어진 같은 공정에 대해 가상의 중간 저장탱크를 가장 병목 현상이 심한 위치에 하나를 위치시킨 후 그 제품의 recipe 중 중간 단계를 ZW policy 로 가정하여 문제를 구성하여 이에 따른 조업이 이루어질 때의 각 장치에서의 조업 완료 시간을 새로 개발된 알고리즘으로 계산하였다.

**Example 1**

고려된 공정은 다음 표 1 에서 보이는 장치들로 이루어져 있으며, 표 2 에서 보인 recipe 를 가지는 하나의 product 를 생산하기 위한 하나의 campaign 에 대해 각각선택한 후 이에 따라 생산할 때의 1 product 를 위한 campaign 상에서의 setup time, transfer time 과 중간 저장 탱크 활용 방안, in-phase, out-of-phase mode processing 등에 대한 고려를 하지 않고 계산하여 기 문헌에서 제시된 결과와 비교하여 보았다.

Equip. Type	Volume	No. of Units
RU1	2500	4
RU2	6300	4
RV1	2500	4
RV2	4000	4
RD	4000	5
FS	300	4
FP	2000	7
DT	1000	4
DP	1000	4

표 1. 예제 공정

Task	Size Factor	Processing Time Constants			feasible Equip. Type
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	
1	2.74	15	1.72e-2	0.865	RD
2	0.26	2	6.12e-6	2.000	FS
3	5.85	16	3.64e-2	0.823	all R
4	1.78	0	4.28e-3	1.000	all R
5	1.98	0	4.12e-2	0.808	RV1, RV2
6	1.58	1	4.28e-5	2.000	FP
7	1.44	2	3.70e-2	1.000	DT

표 2. 제품 생산 Recipe

**Example 2**

Example 1 에서 고려된 공정 중 FS 의 단계에서 병목현상이 심하게 나타나기 때문에 이 부분에 중간저장탱크를 설치한 것으로 가정하고, Example 1

에서 고려한 제품의 recipe 중 task 4 와 task 5 사이에 존재하는 중간체가 매우 불안정한 상태로 존재하는 것으로 가정하여 ZW policy 를 적용하여 이러한 조업 상황에서 각 장치에서의 조업 완료 시간을 개발된 알고리즘을 이용하여 계산하였다.

### **결론**

본 연구에서는 다목적 회분식 공정에서 주어지는 campaign 에 따라 각 제품을 생산하기 위해 각 장치에서 소요되는 시간을 계산하여 조업이 완료되는 시간을 결정할 수 있는 새로운 접근법을 이용한 조업 완료 시간 결정 알고리즘을 개발하였다. 이렇게 개발된 algorithm 을 기존 논문에서 제시되는 MINLP 형태에 의한 문제 설정을 통해 복잡한 계산으로부터 구해지는 마지막 단계에서의 완료 시간과 비교해 함으로써, 본 알고리즘이 적절히 구축되었음을 확인할 수 있었다.

이렇게 개발된 조업 완료 시간 결정 알고리즘은 최적 생산계획을 위해 필요로 되는 다양한 형태의 목적 함수의 계산을 행할 수 있게 해주며, 이렇게 개발된 조업완료시간결정 알고리즘을 이용함으로써, 초기 생산계획에 따라 생산을 행하던 중 조업의 상황에 따라 조업의 지연 등이 발생했을 경우 이 알고리즘에 의해 계산되어진 완료 시간과의 비교를 통해 바로 조업의 이상을 확인할 수 있으며 이로부터 그 이후의 제품 생산을 위해 재조정 생산계획을 수립하기 위해 필수적인 기능으로 사용되어질 수 있다.

### **감사**

본 연구는 한국과학재단지정 우수연구센터인 공정산업의 지능자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과임.

### **참고문헌**

1. A. Mauderli and D. W. T. Rippin, Production Planning and Scheduling for Multipurpose batch chemical plants, *Computers and Chem. Engng.*, **3**, 199~206(1979)
2. Michael C. Wellon and Gintaras V. Reklaitis, Scheduling of Multipurpose Batch Chemical Plants. 1. Formation of Single-Product Campaigns, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **30**, 671 ~ 688 (1991)
3. Athanasios G. Tsirukis, Savoula Papageorgaki and Gintaras V. Reklaitis, Scheduling of Multipurpose Batch Chemical Plants with Resource Constraints, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, 3037 ~ 3050 (1993)
4. Jae Hak Jung, Ho-Kyung Lee, Dae Ryook Yang and In-Beum Lee, Completion times and optimal scheduling for wserial multi-product processes with transfer and set-up times in zero-wait policy, *Computers and Chem. Engng*, **18**, 537 ~ 544 (1994)