

**P. 정밀화학제품을 위한 다목적 다품종
생산기술의 발전방향**

동국대학교 화학공학과
이 의 수

정밀화학제품을 위한 다목적 다품종 생산기술의 발전방향

1. 서론

그간의 산업의 흐름이 단순히 새로운 기능의 제품을 생산하는 단계로부터, 보다 값싸게 대량 생산을 추구하는 단계로 바뀔에 따라 연속 공정에 의한 제품의 생산으로 공정기술의 발전이 전개되었다. 즉 2차 세계대전 이후 내구소비재 화학제품의 대량 수요를 충족하기 위하여 연속공정의 중요성이 대두된 이후 연속공정에 대한 집중적인 연구가 이루어지면서 규모의 대형화와 운전제어의 자동화를 통하여 저비용 고효율의 제품생산이 가능하게 되었으며 이러한 추세는 컴퓨터의 발달과 맞물리면서 단순히 제품 생산 공정만을 대상으로 하는 개선뿐만 아니라, 구매, 판매, 인사관리까지를 관장하는 총체적인 CIM (Computer Integrated Manufacturing)의 구축이라는 단계로까지 발전되고 있다. 그러나 현대의 다양화된 소비패턴과 고급화되고 있는 시장의 변화로 인하여 다양한 규격의 고부가가치제품 즉 정밀화학제품 생산의 중요성이 점차 주목을 받기 시작함에 따라서 회분식 공정의 중요성이 커지고 이에 관한 연구가 점차 활기를 띄고 있다. 이는 회분식 공정이 공정운용의 유연성을 가지고 있으므로 불확실한 수요에 대비하기 위한 공정 운용 전략의 설정 및 다품종 소량생산에 적합한 장점을 가지고 있기 때문이다.

전통적으로 고분자 중합이나, 발효공정 등과 같이 반응 속도가 근본적으로 긴 공정의 경우 회분식 공정이 채택되어져 왔으며, 근래에 들어서는 고부가가치의 정밀화학제품의 중요성이 증대되면서 이의 생산에 적합한 회분식 공정의 채택이 늘어나고 있다. 전 세계적으로는 정밀화학 제품의 시장규모가 80년 1,900억 달러에서 1993년 4,735억 달러로 년 평균 7.3%의 높은 성장을 보였으며, 향후 세계시장은 2000년 6,744억 달러, 2005년 8,651억 달러의 급성장이 예측된다. 한편 우리나라의 정밀화학 산업 시장규모는 12조4천억원으로(1993년) 80년 이후 년 평균 증가율 15% 내외의 높은 성장률을 나타내고 있다. 이러한 시장규모는 세계정밀화학 시장규모의 약 3%에 상당하는 것으로, 70년대에 우리나라 정밀화학제품의 세계시장 점유율이 1%이하인 것에 비하면 비약적인 발전을 이룩한 것을 알 수 있다. 한국

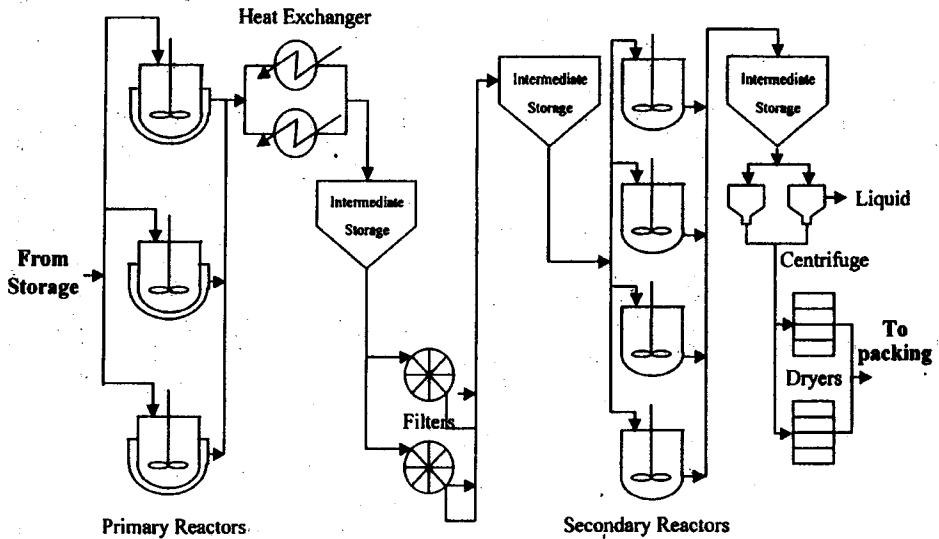
산업의 구조조정과 관련하여서도 화학분야에 있어서는 사업구조의 고도화가 절실한 것으로 지적되고 있다. 즉 정밀화학, 의약 등의 고부가가치 제품을 생산할 수 있는 기반의 확충을 최대 과제로 삼고 있다. 일반적으로 염료, 안료, 의약품 등과 같은 정밀화학 제품들은 제품의 생산 품목이 다양할 뿐만 아니라, 기술의 진보나 신제품 개발, 후발 국가들의 급속한 추격에 의한 시장 이전 및 새로운 생산품목으로의 변화 등이 끊임없이 요구된다. 따라서 이들 제품의 생산을 위하여는 이러한 시장상황 변화에 유연하게 대처할 수 있는 회분식 공정이 주로 채택되고 있으며 농약제품 등과 같이 계절적으로 각기 다른 제품을 생산하는 경우에 있어서도 회분식공정을 도입할 경우 여러 가지 이점을 가지게 된다.

특히 정밀화학산업은 대체로 소규모의 제조시설을 이용하여 다품종 소량생산체제를 통해 고부가가치의 제품을 생산하며, 제품의 라이프사이클이 보통 4-5년에 불과하므로 새로운 기술이나 제품개발을 위하여 지속적인 연구개발이 필요하다. 따라서 외국에서 개발된 공정 관련 기술을 도입할 경우 사용환경의 변화에 따라 언제든지 개량 개선될 수 있어야 하나, 많은 경우에 있어서 도입 초기에 일정기간 사용 후 응용의 부족으로 사장되고 있다. 따라서 필요에 따라 빠른 시간 내에 개발 팀과의 협동작업으로 새로운 공정 환경에 적합한 모델로의 변형이 가능한 국산화된 공정기술의 보유를 통한 국제 경쟁력의 제고가 절실히 요구되고 있다.

2. 회분식 공정 일반

2.1. 회분식 공정

화학공정은 운영방식에 따라 연속식 공정과 회분식 공정으로 나뉘어진다. 회분식 공정은 한 공정에서 여러 가지의 제품을 생산하는 특성을 가지고있으며, 따라서 불연속적인 방식으로 운영된다. 최근에는 소비자의 기호가 다양해지고 제품의 라이프 사이클이 짧아짐에 따라, 다품종 소량생산에 적합한 회분식 공정이 주목받고있다. 회분식 공정이 채택되고 있는 대표적인 산업으로써는 정밀화학, 고분자, 식품, 제철 등을 들 수있다. 그림 1에는 간단한 회분식 공정을 나타내었다.



< 그림 1. 회분식 공정도 >

그림 1에서 보는바와 같이 회분식 공정은 반응기 등과 같이 장치크기 (volume)로 처리량이 결정되는 회분식 장치(batch units)와 펌프, 열교환기, 필터 등과 같이 물질의 유출 및 유입시 공정에 관여하며 따라서 유량 (flow rate)으로 처리량이 결정되는 반 연속식 장치(semi-continuous) 및 중간제품이나 완제품을 저장하는 저장조(storage)로 나뉘어 진다.

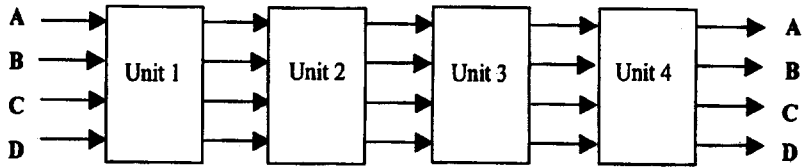
회분식 공정은 주로 비 정상상태로 운전되는 경우가 많고, 생산량 증가 등을 위하여 동일한 장치를 병렬로 설치하여 사용하기도 하며, 하나의 장치 내에서 물질의 유입, 반응, 유출, 세척 및 준비, 대기 등의 여러 공정단계가 동시에 일어난다. 또한 여러 가지 제품을 생산할 때마다 동일한 순서로 동일한 장치를 사용하거나(다품종 회분식 공정; multi-product batch process), 다른 순서로 다른 장치를 사용(다목적 회분식 공정; multi-purpose batch process) 할 수도있다. 이에 따라 조업자가 공정 운전 중 실수를 범할 여지가 많은 등 공정의 운용이 까다로운 단점이 있다. 따라서 회분식 공정의 설계 및 제품생산 계획 등을 작성하기가 몹시 복잡하다. 1980년대 이후 회분식 공정에 관한 연구가 집중 적으로 수행되면서 주로 다음의 분야에 관한 연구가 진행되고있다.

- 생산일정 모델링 및 최적화

- 공정 설계 및 합성
- 생산 관리기 개발 및 제어 시스템
- 중간 저장조 해석

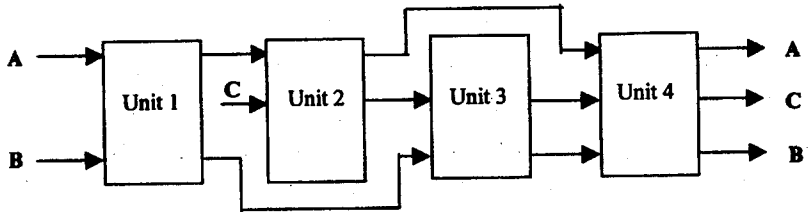
2.2. 회분식 공정의 분류

회분식 공정은 생산되는 제품이 동일한 순서로 동일한 장치에서 제조되는 다품종 회분식 공정(multi-product batch process, flowshop) 과(그림 2 참조), 각 제품들간의 제조 경로가 다르고 따라서 각 장치에서 처리하는

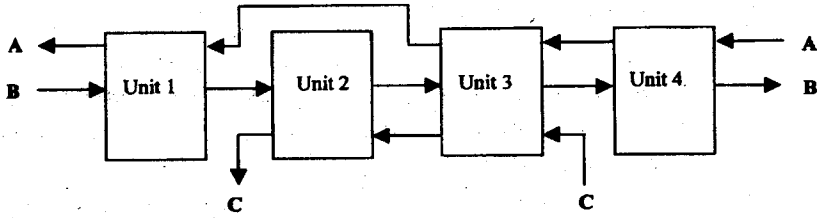


< 그림 2. 다품종 회분식 공정 >

반응물도 제품에 따라 달라지는 다목적 회분식 공정(multi-purpose batch process, jobshop)으로 나눌 수 있다. 다목적 회분식 공정은 순차적(sequential) 다목적 회분식 공정과 비순차적(non-sequential) 다목적 회분식 공정으로 나눌 수 있다. 순차적 공정(그림 3)은 각 제품을 생산하는 단계는 같지 않으나 순서가 일정한 공정을 말하며, 제품의 생산 단계가 서로 뒤바뀌기도 하는 공정을 비순차적 회분식 공정(그림 4)이라 한다.



< 그림 3. 순차적 다목적 회분식 공정 >



< 그림 4. 비순차적 다목적 회분식 공정 >

이들 이외에 무배관 공정(pipeless process)이 최근 연구되고 있다.

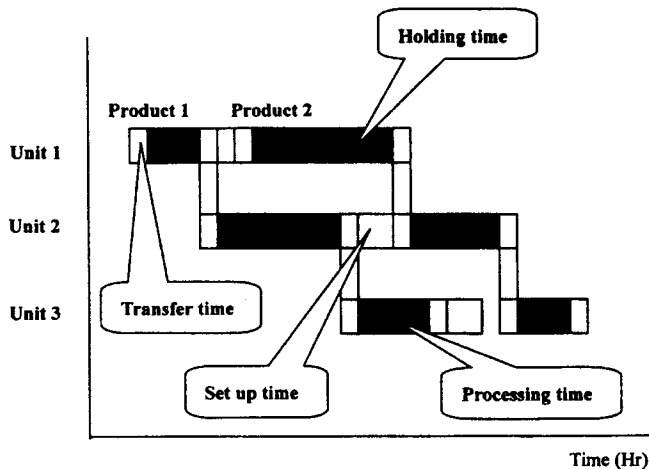
2.3. 중간저장조 운영

회분식 공정은 연속식 공정과는 달리 여러 가지 공정 변수들이 존재한다. 즉 한 단계의 반응이 완료된 경우라도 다음 단계가 준비되어 있지 않으면 지속적인 조업이 불가능하게 된다. 따라서 전체적인 공정의 효율을 향상시키기 위하여 반응 중간물질을 임시로 저장할 수 있는 중간저장조를 설치하게 된다. 중간저장조를 설치할 경우 중간저장조 전후의 공정이 분리됨으로써, 공정의 운전효율을 향상시키게 되며, 공정변수의 변화에 따른 부적절한 영향을 흡수하여주고, 규격 미달 제품의 발생이나, 공정장치의 이상이 발생한 경우에도 공정 전체를 멈추지 않고 적절한 조치를 취할 수 있게 함으로써 공정의 운전 효율을 증대시켜 주는 등의 중요한 역할을 한다. 따라서 중간저장조를 운영하는 방식에 따라 공정조업의 해석이 크게 달라진다. 일반적으로 중간저장조의 운영 방식은 기본적으로 UIS (Unlimited Intermediate Storage), FIS (Finite Intermediate Storage), NIS (No Intermediate Storage), ZW (Zero Wait) 방식으로 나뉘게 된다. UIS 방식은 각 공정 단계마다 무한 용량의 중간저장조가 있는 경우이며, FIS 방식은 중간 저장조가 있는 단계와 없는 단계가 함께 존재하는 경우이다. NIS 방식은 중간저장조가 공정 내에 존재하지 않는 경우를 의미한다. 다만 반응이 완료된 제품이 다음단계가 준비되지 않음으로써 이송되지 못할 경우, 다음단계가 준비될 때 까지 중간물질을 장치에 저장할 수 있는 방식이다. 한편 ZW방식은 NIS와 같이 중간저장조가 없으며 또한 반응이 완료된 물질은 즉시 다음 단계로 이송되어야 하는 제약이 부과되는 방식이다. 실제 공정은 이들 기본 방식들이 적절히 혼합되어 사용되어지며 이를

MIS(Mixed Intermediate Storage) 방식이라 칭한다. 이외에 드물게는 하나의 중간저장조를 여러 장치들이 공유하는 CIS(Common Intermediate Storage) 방식이 있다.

2.4. Gantt chart

회분식 공정에서는 조업의 진행사항을 한번에 보여주는 그림이 필요하다. 이때 사용되는 것이 그림 5에 나타낸 Gantt chart 로써, 특정 장치에서 물질의 유입, 조업의 시작과 완료, 반응 완료물질의 유출, 세척 및 준비, 대기 등의 상황을 알기 쉽게 파악할 수 있다.



< 그림 5. Gantt Chart >

2.5. 회분식 공정 관련 용어

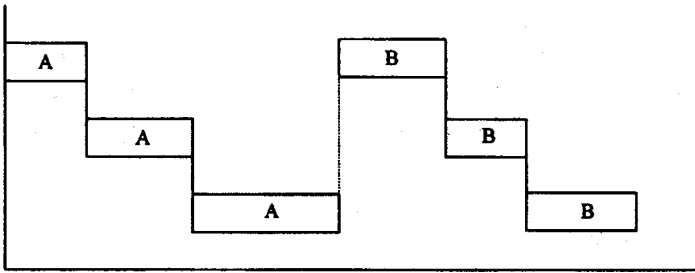
2.5.1. 장치의 운전 방식에 관련된 용어

(1) 병렬장치의 조업

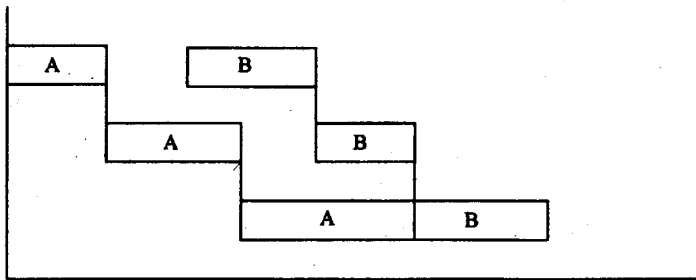
병렬장치의 조업은 동상조업(in-phase operation) 과 이상조업(out-of-phase operation) 으로 나눈다. 동상조업은 병렬장치가 같은 단계의 조업을 동일한 시간에 수행할 경우를 지칭하며, 이상조업은 서로 다른 시차를 가지고 조업하는 방법이다.

(2) 다제품 생산방식

다제품 생산시 제품생산 방식은 한 제품을 연이어 계속 생산하고, 생산이 끝나면 다음 제품을 생산하는 SPC(single product campaign) 과 각 제품을 돌아가며 생산하는 MPC(multi product campaign) 방식으로 나눌 수 있다. 또한 조업방식은 그림 6. 에서와 같이 한 회분조업을 완전히 완료한 후에 다음 회분작업을 수행하는 비중복 조업(Non-overlapping mode)과 그림 7. 에서와 같이 한 작업이 끝나지 않더라도 장치의 가용이 가능할 경우 다음 회분작업을 동시에 수행하는 중복조업방식(Overlapping mode)으로 나눌 수 있다.



< 그림 6. 비중복 조업방식 >



< 그림 7. 중복 조업방식 >

(3) 기타 관련 용어

- Campaign: Operation dedicated to production of sequence of batches of a product
- 처리시간(Processing time(P_{ij})): 제품 i 가 장치 j 에서 처리되는 시간

- 이송시간(Transfer time(a_{ij})): 제품 i 를 장치 j 에서 다음장치로 이송 하는데 소요되는 시간
- 유ힴ시간(또는 쉬는 시간) (Idle time): 장치 j 가 아무 작업도 하지 않고 쉬고 있는 시간
- 여유시간(Slack time(SL_{ijk})): 여유시간은 제품처리 일정에 따라 불가피하게 부여되는 시간. 여기서 SL_{ijk} 는 장치 j 에서의 제품 i 와 제품 k 간의 여유시간이다
- 조업완료시간(Completion time(C_{ij})): 제품 i 의 장치 j 에서 조업이 완료되는 시점

2.5.2. 장치의 설계에 관련된 용어

- Train : Sequence of equipment uninterrupted by decoupling intermediate storage
- Subtrain : Any subset of adjacent equipment in a train
- 회분크기(Batch size) : The amount of material which results upon completion of the last task in the recipe for a given product
- 크기인자(Size factor) : The characteristic size of the equipment needed to execute task j in order to produce a unit amount of product i at the end of the last task of the product recipe
- 공정단계(Task) : Set of specific chemical/physical steps(or subtasks) executed in the same vessel
예) 반응기는 다음의 6 단계의 task 로 이루어 진다.
fill with A / heat / add B / cool / decant / empty

* Grouping of subtasks into tasks is an engineering design decision

* Each subtask has associated size factor

$$\frac{\text{mass(volume) passed in subtask per batch}}{\text{mass(volume) in batch of final product}}$$

* Task size factor = max{subtask factors}

- 제조법(Recipe) = Sequence of tasks performed to make a product

3. 회분식 공정의 최적화

3.1. 생산 일정 계획의 최적화

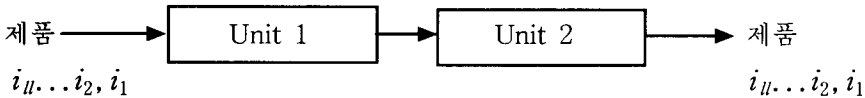
생산계획 혹은 일정계획은 제품을 생산하기 위하여 필요한 공정조업을 주어진 생산단계에 할당하고, 이러한 계획에 입각하여 각 공정에 할당된 작업의 시작시점, 완료시점, 작업처리 순서 등을 결정하는 것이다. 이러한 생산계획의 목적은 공정 중 재고량의 최소화, 생산설비의 가동률의 향상, 작업자의 유휴시간 축소, 납기의 지연 방지, 총 제품 제조시간의 단축 등 여러 가지 목적을 위하여 사용된다. 일반적으로 다품종 소량 생산의 경우 작업일정 계획은 조합의 문제로 너무나 많은 경우의 수가 도출되므로, 경험법칙에 의하거나 수학적 방법에 의한 모델링을 하게된다.

3.1.1. 경험법칙에 의한 다품종 회분 공정의 생산계획

장치의 개수가 2개인 경우는 Johnson's algorithm이 생산 제품의 수에 관계없이 최적 생산계획을 제시하는 것으로 증명되어있다. 그러나 장치의 개수가 3개 이상인 경우에는 제품수가 커질 경우 최적해를 보장하는 경험법칙이 개발되어있지 못하다. 일반적으로는 Johnson's algorithm을 변형한 RAES(Rapid Access Extensive Search) 방법이 알려져 있다. 여기서는 이들 두가지 법칙에 대한 algorithm을 간략히 소개한다.

(1) Johnson's algorithm 경험법칙

그림 8 에 표시한 바와 같이, 2 단계 공정에서 제품을 flow-shop 형식으로 처리하는 경우에, 최종조업시간을 최소화하는 생산계획은 S. M. Johnson 이 제안한 방법에 의해 간단히 결정할 수 있다.



< 그림 8. 단계 공정의 flow shop 생산흐름 >

Johnson's algorithm 경험법칙

Step 1 : 각 제품의 장치 1에서 생산시간과 장치 2에서 생산시간의 표를 작성한다.

- Step 2 : 이들 중 장치 1 에서의 조업시간이 더 긴 제품 그룹을 P 그룹, 장치 2 에서의 조업시간이 더 긴 제품 그룹을 Q 그룹이라 한다.
- Step 3 : Q 그룹은 장치 1 에서의 조업시간이 짧은 순서로 조업순서를 정하고 P 그룹은 장치 2 에서 조업시간이 더 긴 순서로 조업순서를 정한다.
- Step 4 : Q 그룹 순서를 앞쪽에, P 그룹 순서를 뒤쪽에 나열하여 열거한다.

(2) RAES(Rapid Access Extensive Search)

Dannenbring이 제시한 RAES 방안은 위에서 설명한 Johnson's 규칙에 기초하여 3 개 이상의 장치를 가진 다품종 공정의 생산계획에 대한 경험법칙이다. 이 경험법칙은 RA(Rapid Access)과정과 ES(Extensive Search)과정의 두 단계로 구성되어있다.

RA(Rapid Access)과정

이 단계는 3 개 이상의 장치를 가진 다품종 공정을 Johnson's algorithm을 적용하기 위해 가상의 두 장치 공정으로 변환하는 과정으로서 M개의 장치로 구성된 다품종 공정을 가상의 두 장치 공정으로 변환하는 식은 다음과 같다.

$$a_i = \sum_{j=1}^M (M-j+1) \times P_{ij}$$

$$b_i = \sum_{j=1}^M j \times P_{ij}$$

여기서 $(M-j+1)$ 과 j 는 가중치에 해당하고 a_i 는 가상의 앞 장치에서의 처리시간, b_i 는 가상의 뒤 장치에서의 처리시간을 의미한다. 위의 식을 이용하여 두 장치 공정으로 변환한 후에 Johnson's algorithm을 적용하여 초기 순서를 얻는다.

ES(Extensive Search)과정

이 과정은 더 좋은 해를 찾기 위해 이웃한 해들을 탐색하는 과정이다. RA과정에서 얻은 초기순서에서 서로 인접한 제품 2개의 순서를 맞바꾸는 이웃한 해의 개수를 $N-1$ 로 정의하고, 한번에 $N-1$ 개의 이웃한 해들은 탐색하고 비교한다. 그리고 현재의 최적해 보다 더 좋은 해가 없으면 종료한다.

다.

3.1.2. 다품종 회분식 공정에서의 최적 생산순서 결정

생산 계획의 목적을 최종조업완료시간의 최소화로 할 경우, 다양한 최적 생산계획 모델이 1980년대 중반 이후부터 개발 제시되고 있다. 이들 모델들은 공정방식(다품종 회분식 공정, 다목적 회분식 공정), 중간저장조 운영방안(UIS, NIS, FIS, ZW, CIS), 고려되는 task 단계(조업시간, 이송시간, 조업준비시간), 생산라인의 수(단일 생산라인, 복수개의 생산라인) 등에 의하여 다르게 제시된다.

(1) UIS 방안에서 조업시간만을 고려한 최적 생산순서 결정모델

UIS 방식의 경우 제품의 조업시간만을 고려하면 단계 j 에서 i 번째 제품의 조업완료시간은 다음과 같다.

$$C_{ij} = \max [C_{(i-1)j}, C_{i(j-1)}] + t_{ij} \quad i=1, \dots, N \quad j=1, \dots, N$$

(단, $C_{0j} = 0, C_{i0} = 0 \quad \forall i, j$)

(수식 중 사용되는 하첨자 k 와 1은 제품, i 는 생산순서(sequence), j 는 작업 단계를 나타낸다.)

제품 생산순서 결정에 사용되는 이진변수 X_{ki} 를 다음과 같이 정의하면

$$X_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{제품 } k \text{가 } i \text{번째 순서에서 생산될 때} \\ 0 & \text{그렇지 않을 때} \end{cases}$$

목적함수를 최종 조업완료시간의 최소화라고 할 때 UIS 방안에 대한 최적 생산순서 결정 모델은 다음과 같이 주어진다.

목적 함수 Min C_{NM}

$$\text{제약 조건} \quad \sum_{i=1}^N X_{ki} = 1 \quad k=1, \dots, N$$

$$\sum_{k=1}^N X_{ki} = 1 \quad i=1, \dots, N$$

for unit 1 ($j = 1$)

$$C_{i1} = C_{(i-1)1} + \sum_{k=1}^N t_{ki} X_{ki} \quad i=1, \dots, N$$

for unit 2, ..., M (j=2, ..., M)

$$C_{ij} \geq C_{i(j-1)} + \sum_{k=1}^N t_{kj} X_{ki} \quad i=1, \dots, N$$

$$C_{ij} \geq C_{(i-1)j} + \sum_{k=1}^N t_{kj} X_{ki} \quad i=1, \dots, N$$

(단, $C_{0j}=0, C_{i0}=0, \forall i, j$)

(2) 개발된 최적 생산순서 결정 모델

상기의 모델이외에 현재까지 개발된 최적 생산 순서 결정 모델들은 다음의 경우에 관한 것 들이었다.

- UIS, NIS, FIS, ZW 방안에서 조업시간, 제품이송시간, 조업준비시간을 모두 고려한 다품종 회분식 공정에서의 생산계획
- MIS, CIS 방안에서의 생산계획
- 복수개의 생산라인을 가지는 다품종 회분식 공정의 최적 생산계획
- 다목적 회분식 공정의 일정계획

3.2. 회분식 공정 설계의 최적화

회분 공정의 초기 설계시에 장치의 크기를 최적으로 결정하는 것은 초기 장치 투자비를 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 장에서는 M 개의 공정 단계로 구성된 회분식 공정에서 M 개의 제품을 생산하고자 할 경우의 최적 설계를 위한 모델을 살펴본다.

목적함수

$$z = \min_{(V, R, B, T, m)} \left[\sum_{j=1}^M m_j a_j V_j^{\alpha_j} + \sum_{k=1}^M b_k R_k^{\beta_k} \right]$$

제약식

$$V_j \geq B_j S_{ij} \quad i=1, \dots, N \quad j=1, \dots, M,$$

$$T_i \geq \frac{B_i D_{ik}}{R_k} \quad i=1, \dots, N \quad k=1, \dots, M,$$

$$T_i \geq \left[\frac{B_i D_{ij}}{R_j} + (P_{ij}^0 + c_{ij} B_j^{d_{ij}}) + \frac{B_i D_{i,j+1}}{R_{j+1}} \right] / m_j$$

$$i = 1, \dots, N \quad j=1, \dots, M,$$

$$H \geq \sum_{i=1}^N \frac{Q_i T_i}{B_i}$$

$$V_i^l \leq V_i \leq V_i^u$$

$$R_k^l \leq R_k \leq R_k^u \quad i = 1, \dots, N \quad k=1, \dots, M,$$

상기의 모델에서 주어지는 값들은 장치 j , k 에 대한 비용 계수와 지수 (a_j , α_j , b_k , β_k), 공정시간 계수 (c_{ij} , d_{ij}), 총생산시간 (H), 제품 i 의 총 생산량 (Q_i), 회분식 장치 및 반 연속식 장치의 단계 j 에서 제품 i 의 크기인자 (S_{ij} , D_{ik}) 등이다. 이들 값과 상기의 모델을 이용하여 회분식 장치 j 의 크기 및 개수 (V_j , m_j), 반연속식 장치의 크기 (R_k)를 결정하며, 이와 함께 i 제품의 회분크기 (B_i), limiting cycle time (T_i) 등이 정해진다.

이러한 기본적인 설계 후에는 장치를 평행하게 추가하거나, 중간저장조의 추가, 일의 분리 및 합병 등의 방법을 통하여 공정의 제약조건을 완화하고 생산성을 향상시키는 합성기법을 사용하여 최적 설계를 하게된다. 이후 공정의 운용 중 시장 조건의 변화 혹은 판매가 가능한 제품의 양이 변할 경우에는 회분식 공정 개조 기법을 활용하여 공정을 개조하게된다.

3.3. 최적해의 도출

생산계획 및 설계 단계에서 주어지는 algorithm 혹은 모델로부터 해를 구하는 문제는 변수가 하나만 늘어나도 해 공간은 기하급수적으로 증가하므로 최적해가 보장되지 않는다. 이에 따라 다양한 경험법칙 들이 개발되었으나 경험방법은 문제의 유형마다 특성에 맞게 개발하여야 하며, 공정데이터가 다른 경우 제시되는 해가 만족할 만한 수준에 이르지 못하는 수가 많다. 한편 생산계획 및 설계 모델들은 혼합정수비선형 형태로 주어지므로 이에 관한 수학적인 해법을 이용하거나 (GAMS, LINGO, EXCEL 등), 무

작위 확률에 의한 방법(Simulated annealing, Genetic algorithm) 등이 이용되고있다.

4. 회분식 공정 생산기술 연구의 방향

회분식 공정에 관하여 현재까지 연구되고 있는 분야는 순수회분장치와 반 연속식 장치로 구성된 회분식공정의 생산계획, 설계, 중간제품 저장방안 및 공정개조에 관한 내용들이다. 그러나 보다 범용화된 회분식 공정에서는 보편적인 분리장치인 회분식 증류기를 포함하여야 한다. 이 경우 회분식 증류기는 순수회분장치나 반 연속장치의 특징을 모두 포함하는 특성을 가지므로 보다 복잡한 해석이 요구된다.

또한 정밀화학 제품들의 생산은 대부분 엄격한 품질 수준을 요구하는 고부가가치 제품들로서 소량생산을 특징으로 한다. 특히 제품의 순도 및 함유 불순물의 함량에 따라 제품의 부가가치가 현격히 차이가 나는 특징을 가지고 있다. 이를 위 하여는 엄밀한 규격의 원료 확보 및 고도의 제품 품질관리가 요구된다. 따라서 정밀화학제품 생산공정에서 품질관리를 위한 공정운용기법의 확립이 필요하다.

이와 함께 회분식 공정은 조업자의 의존도가 매우 높은 공정이므로 숙련된 조업자의 확보가 대단히 중요하다. 따라서 작업자가 복잡한 회분식 공정의 기본 개념을 이해하고 공정의 불확실 요인이 발생할 경우에 대한 적절한 대비를 할 능력을 함양함으로써 공정의 생산성을 향상시키고 안전한 공정운용에 기여하여야 한다. 즉 조업자 훈련 소프트웨어의 개발은 회분식 공정 운용에서 작업자의 실수를 줄이고 이에 따른 손실을 방지함으로써 공정 운용의 효율을 극대화와 공정안정에 기여하는 효과를 가져올 것으로 기대된다.

4.1. 회분식 공정과 회분식 증류공정을 복합한 범용 다목적공정에서의 공정운용전략 모델개발

회분식 증류 공정은 하나의 장치에서 소량의 다양한 제품을 생산해 내는 것을 목적으로하고 있다. 따라서 공정의 운용과 관련한 다양한 변수가 존재하며, 이들 변수간에도 강한 상관 관계가 존재한다. 우선 고려될 수 있는 문제는 원료로부터 제품의 분리순서(separation sequence)를 결정하는 문제이다. 회분식 증류탑으로부터 제품을 분리할 경우, 일차적으로 고려되는 공

정 운용의 문제는 제품생산 시간을 최소화하거나(minimum time) 규격에 맞는 제품을 최대한 분리하는 문제(maximum distillate)이다. 이들 문제를 달성하기 위하여 주로 환류비 정책(reflux ratio policy) 이 공정운용 변수로 도입되고 있다.

그러나 다성분계로 구성되는 원료로부터 원하는 제품을 얻기 위한 체계적인 운용전략은 마련되어 있지 않고 산업현장에서는 대부분 경험에 의존하고 있다. 이에 따라 생산제품 및 중간증류제품(cut waste)의 생산계획을 결정하기 위한 체계적이 모델의 개발이 필요하다. 구체적으로는 공정한류비, 제품생산 순서 결정, 중간증류제품의 처리 방안, 제품생산 단계의 이동 시점 결정 등을 고려하여야 한다. 이외에도 고려되어야 할 변수로는 증류 중간제품의 저장운용전략이다. 대개의 경우에 있어서 중간제품은 일부를 원료로 재 순환시키며 부산물은 별도의 저장을 하게된다. 이 경우 고려되어야 할 생산품들은 제품 및 중간증류제품들로서 이들 생산품들을 저장하기 위 하여는 많은 중간저장조가 요구되므로 이들의 해석을 통하여 궁극적으로는 회분식 증류공정의 운용전략이 전체 회분식 공정의 생산계획과 연계된 통합 생산계획을 위한 모델이 완성되어야 한다.

4.2. 회분식 공정과 회분식 증류공정을 연계한 종합적인 다목적 플랜트의 최적 설계

회분식 공정 설계와 관련하여서는 회분식 증류탑 및 연계 공정의 처리 능력 및 크기를 결정하는 최적 장치 크기 결정 문제, 회분식 증류탑 및 연계공정의 개조 및 합성의 내용을 포함한 최적 합성 문제, 그리고 어떤 생산 순서로 조업되면 고품질의 제품을 빠른 시간 내에 생산할 수 있는지를 다루는 스케줄링이 고려된 다목적 플랜트 설계 문제 등을 해결하여야 한다. 다목적 회분식 공정의 최적 설계와 관련하여서는 우선 최적 품질 관리를 위한 각 제품의 연간 수요 및 분기별 수요에 따르는 일회 생산량을 결정하고 이에 따라 공장을 구성하는 장치의 초기 투자비 및 운용비를 제품의 수요 및 조업 가능 시간 등을 고려하여 목적함수를 선정하고, 이를 최소화하는 전략을 개발하여야 한다. 공정의 개조 전략은 현재까지 개발된 공정 합성문제를 변형한 형태로 개발되어질 수있다. 최종적으로는 스케줄링이 고려된 다목적 회분식 공정의 설계 및 전체 시스템 통합방안을 개발한다.

4.3. 품질관리를 위한 제품 저장조 운용 전략

산업 사회가 발전함에 따라 품질 고급화에 대한 소비자의 욕구가 증가하게 되고 국제적인 통상에 있어서 이러한 욕구는 선진국의 소비자가 개발도상국의 생산자에게 가하는 압력으로 발전하여 ISO 9000 이라는 인증제도로 구체화 되었다. 품질을 고급화하기 위해서는 생산자는 신기술을 개발하고 양적인 생산이 아닌 질적인 생산시설을 보완해야 하며 무엇보다도 품질을 효율적으로 제어하기 위한 새로운 공정운전 방식을 개발해야 한다.

화학공장의 경우 공정 특성상 여러 가지 물질을 혼합하거나 분리하는 과정이 여러 단계를 걸쳐 복잡하게 일어나기 때문에 품질관리를 위한 특별한 조치를 취하지 않으면 품질 하자의 원인을 규명하는 것이 기술적으로 불가능하게 된다. 대부분의 정밀화학 제품의 품질규격 항목은 측정하는 과정이 복잡하고 전문적이며 시간이 많이 걸린다. 또한 품질하자를 추적할 수 있도록 제조단계에서의 품질을 기록하려면 측정계기의 고급화뿐만 아니라 가능한 큰 저장조를 설치하거나 품질 확인을 위해 대기중인 저장조를 늘려야 한다. 따라서 품질관리를 철저히 시행하기 위하여는 저장조의 추가적인 건설이나 매우 지능적인 저장조 운전 방안의 개발이 요구된다. 정밀화학제품의 경우, 선진국에서는 제품 포장 단위마다 자국이 인정하는 기관에서 인정하는 방법에 의한 품질확인서가 첨부되어야 하고, 제품에 하자가 발생하였을 경우 그 원인을 규명할 수 있도록 전 공정의 처리절차가 표준화되고 작업활동이 문서화되어 있어야 한다.

따라서 제품 저장조 운영방안으로서 QCPS(Quality Controlled Product Storage) 방안에 관한 개발이 요구된다. QCPS 는 저장조가 재고 보관과 출하의 기능뿐만 아니라 품질관리의 기능을 겸하는 경우이다. 즉 회분식 공정과 회분식 증류장치를 거친 다수의 제품에 대하여 장기간 품질 규격을 분석해야 하는 다수의 제품 저장조와 저장조에 저장된 액체 상태의 제품을 여러 가지 포장용기에 충전하여 수요자의 수요량에 맞추어 출하하는 공장의 생산계획 최적화 문제이다.

4.4. 조업자 훈련 시스템의 개발을 통한 조업표준화 및 공정안전 확립

회분식공정은 안전기술면에서 보면 결코 다루기 쉬운 방식은 아니다. 최근 회분식 공정에서 취급하는 물질의 종류가 다양화하고 강한 반응성을 갖는 물질취급이 급증함에 따라 취급방법의 잘못에 따른 폭발, 화재가 빈번하게 일어나고 있다. 숙련기술자의 경험과 기술에 의해 해당 공정에 내재하는 여러 가지 어려움을 극복하고 여러 화학반응을 실행해 왔으나 근본적

으로 다음과 같은 공정특유의 안전상의 문제를 다수 내포하고 있다:

- 주문생산의 형태를 취하기 때문에 플랜트운전이 납기에 맞추어 행해질 때가 많다. 따라서
 - (a) 취급물질 및 반응 등의 위험성에 관한 조사·검토가 불충분하고
 - (b) 화학반응의 특징에 따른 적절한 설비의 선택 또는 설비의 개량 등 필요한 설비상의 조치가 충분히 이루어지지 않고
 - (c) 취급물질, 설비, 작업방법에 대응한 작업표준 작성 및 해당 작업표준에 관한 교육이 불충분한 채로 운전이 행하여질 위험성이 있다.
- 수작업의 빈도가 높으므로 오조작의 가능성 및 취급물질에 노출될 가능성이 높다.
- 반응온도나 생성물의 조성의 변동이 생기기 때문에 통상 작업에서 예상하기 힘든 이상상태가 생기기 쉽다.
- 취급물질의 양이 소량일 경우가 많으므로 예상되는 이상사태를 과소평가하여 대책수립이 불충분하게 될 경우가 있다.

회분식 공정의 운전에서는 운전자들간의 상호협조 업무가 더욱 많아짐에 따라 인적오류—조업자의 오판단 및 조작오류—에 따른 위험분석이 더욱 강조되는데, 회분식공정의 위험성분석(HAZOP)에 대한 여러 연구가 진행되어 왔으나 이를 이용한 조업자 훈련이나 위기상황에서의 대응에 관한 훈련 시스템의 개발이 요구된다.

4.5. 통합패키지 개발

공정에 관한 정보를 집중관리하기 힘들다는 것을 비롯하여 회분식공정의 통합자동화에 있어서의 어려움에 대해서는 여러 문헌에 잘 기술되어 있거니와 현재까지 개발되어온 요소기술들이 통합되어 일관된 정보를 제공해주지는 못하고 있다. 이에 따라 분야별로 각기 개발되는 설계, 모사, scheduling, 운전기술이 결합되어 하나의 통일된 사용자 환경 내에서 synergy 효과를 내도록 통합 패키지화 하는 것이 또 하나의 주된 개발내용이 된다. 즉 모든 구성요소들이 ISA (International Society of Measurement & Control)/ANSI S88.01의 배치제어표준에 따라 설계되고 구현되도록 하고 에이전트 기술에 기반하여 독립적인 프로그램개발이 쉬운 분산형 problem solving framework을 설계, 개발하며 상위의 생산정보시스템과의 연계를 추구하는 것이 필요하다.

5. 결언

정밀화학 산업은 향후 한국의 화학산업이 지양하는 목표이다. 특히 중국, 인도 등과 같은 중진국의 산업발달은 더 이상 우리나라가 장치 의존적인 범용제품의 생산에 안주할 수 없는 환경을 만들고 있다. 따라서 고부가가치의 정밀화학제품을 생산하기 위한 요소기술의 개발이 시급히 요청되고 있다. 이에 따라 범용 다목적 플랜트의 설계 및 운용에 관한 독자적인 기술의 확립과 소프트웨어의 개발은 대단히 중요한 의미를 갖는다.

회분식 공정의 설계, 운용에 관한 연구는 1970년대의 태동기를 시작으로 활발한 연구가 진행되고 있으나, 연속공정 시스템에 관한 연구단계와 비교하여 볼 때 현재까지 극히 초보적인 수준에 머무르고 있는 실정이다. 국내의 경우 일부 대학에서 다품종 혹은 다목적 회분식 공정을 대상으로 한 생산계획 모델링, 회분식 공정 설계기법의 개발 및 공정운용과 연계된 중간제품 저장전략 모델의 개발이 단편적으로 이루어지고 있다. 최근에는 이를 기반으로 하여 에너지를 함께 고려하는 복합적인 공정설계 모델이 연구되고 있다. 해외의 경우에 있어서도 대체적인 개발의 단계는 국내와 유사한 실정이다. 미국의 Purdue 대학, Carnegie Mellon 대학 및 영국의 Imperial College 등에서 회분식 공정을 대상으로 한 단위 연구분야별 과제 즉 공정설계, 합성, 중간저장조 전략, 생산계획, 공정개조 및 자동화 등에 대하여 독립적인 연구가 이루어지고 있다. 다만 Purdue 대학에서 개발한 회분식 공정 모사기(BATCHES)가 상용화되어 일부 정밀화학 제품생산 기업체에서 활용되고 있다. 이외에도 BATCH-AC (Aspen Technology사), BATCHSIM (Simulation Science 사), ChemCadMATCH (Chemstation 사) 등의 제품이 선보이고 있으나, 이들 제품들도 본격적인 상업적 설계도구로 활용되고 있는 실적은 미미할 정도의 기초적 수준의 것으로 알려져 있다.

전체적으로 볼 때 회분식 공정에 관한 연구는 소프트웨어들의 개발을 위한 초기단계의 수준에 머무르고 있다고 판단된다. 회분식 공정의 설계 및 운용 전략 등의 이론이 확립되고, 이 결과들이 산업체에 활발히 적용되기 위하여는 대체로 연속공정의 개발 단계와 유사한 단계를 밟아야 될 것으로 예상된다. 즉 단위 과제별 연구를 통한 모델의 개발과 이를 기초로 공정 전체를 대상으로 한 종합 설계 및 운용모델 완성의 단계를 거쳐서 궁극적으로는 복합공정을 대상으로 하는 통합 모델의 완성 및 software화의 형태를 따를 것으로 예상된다. 따라서 현재 활발히 연구되고 있는 단위 과제별 모델링 및 공정 운용 프로그램의 개발을 전일보된 방향으로 발전시켜, 회분식 공정에 일반적으로 적용될 수 있는 종합적인 모델의 개발을 위한

통합적이고 체계적인 연구의 진행이 요구된다.

인용문헌

- [1] Kim, M. S., Jung, J. H. and Lee, I. B. “ Optimal scheduling of multiproduct batch processes for various intermediate storage policy ”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 35, pp. 4058 (1996).
- [2] Ku, H. M. and Karrimi, I., “ Completion time algorithms for serial multiproduct batch processes with shared storage ”, *Comput. Chem. Engng.*, Vol. 14, No. 1, pp. 49-69 (1990).
- [3] 조익상, 이범석, 이의수, 이인범, “장치비용과 에너지 회수비용을 함께 고려한 다품종 회분식 공정의 최적설계 및 생산계획”, *화학공학*, Vol.36, No.4, pp601-606, (1998)
- [4] Rippin, D. W. T “Design and operation of multiproduct and multipurpose batch chemical plant”, *Comp. Chem. Engng*, Vol. 7, pp861, (1983)
- [5] J. S. Logsdon, U. M. Diwekar and L. T. Biegler, “On the Simultaneous Optimal design and Operation of Batch Distillation Columns”, *Trans IchemE.*, Vol. 68, p434-444, (1990)
- [6] Paul. M. Koppel, “Fast Way to Solve Problems for Batch Distillation”, *Chemical Engineering*, October 16, pp109-112, (1972)
- [7] U. M. Diwekar and K. P. Madhavan, “Multicomponent batch distillation column design”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30, p713-721, (1991)
- [8] Papageorgaki, S. and Reklaitis, G. V. ; Optimal design of multipurpose batch plants, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 29, 2054(1990).
- [9] Vaselenak, J. A. , Grossmann, I. E., and Westerberg, A. W., An embedding formulation for the optimal scheduling and design of multipurpose batch plants, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26, 139(1987).
- [10] H. M. Ku and I. Karimi, “Completion time algorithms for serial multiproduct batch processes with shred storage”, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 14, pp49-69, (1990)
- [11] R. Srinivasan, Phazer: An intelligent multiple models-based process hazards analyzer, PhD thesis, Purdue University (1998).

[12] 이인범, 문일, 정재학, 이호경 : 화학공정 생산 및 일정계획, 아진, 서울, (1999)