회분식 공정에서의 생산 일정 계획

이 규 황, 이 호 경, 이 인 범
포항공과대학교 화학공학과

1. 서론

화학 공정의 발전 과정을 살펴 보면, 초창기에는 제품의 수요가 워낙 적다 보니 소수의 장치를 이용해 필요한 여러 제품들을 조금씩 생산하는 다품종 소량 생산 방식의 회분식 공정이 주종을 이루었다. 그러나, 산업이 발전하고 인구가 증가함에 따라 제품의 수요가 크게 늘어난 반면 조업할 수 있는 시간은 한정되어 있으므로, 증가한 수요를 만족시키기 위해서 점차 생산하는 제품 수를 줄이고, 각 제품을 전용 생산라인을 통해 대량 생산하는 연속식 공정 형태가 오늘날까지 인기를 끌게 되었다. 그러나, 다시 최근에 와서는 소비자의 기호가 점차 다양해지고 세분화되어 요구하는 제품의 종류가 많아진 반면, 각 제품의 수요는 점차 줄어드는 추세가 뚜렷해지면서, 각 제품이 시장에서 유통될 수 있는 라이프 사이클이 점차 짧아져 가고 있다. 따라서, 이러한 시장 변화에 적극적으로 대처하기 위해서는 기존의 연속식 공정에 의한 소품종 대량 생산 방식으로부터, 소량이지만 고부가가치를 갖는 제품들을 생산해서, 재고를 최소로 유지하면서 판매하는 다품종 소량 생산 방식으로의 전환이 필요하며, 이러한 생산 방식에는 역시 회분식 공정이 가장 적합하다고 할 수 있다[1].

회분식 공정은 주로 정밀 화학 관련 제품들인 의약품, 생화학 제품, 농약, 도료, 안료, 기능성 고분자 소재, 촉매 제품 등의 생산에 사용되어 왔지만, 근래에는 기존의 연속식 공정 체제 아래에서 주로 생산되어 왔던 윤활유, 섬유, 석유 화학, 식품 같은 제품의 생산에도 널리 적용되고 있는 실정이다. 이러한 제품들은 대부분 화학 반응, 물리적 분리, 가열, 냉각 혹은 혼합 공정과 같은 유사한 순차적 제조 공정을 거치기 때문에, 각 제품마다 별도의 전용 생산라인을 두고 따로 생산하는 연속식 공정 형태보다는, 한 공장 내에서 최소한의 장치를 가지고 비슷한 제조법으로 생산 가능한 여러 제품들을 함께 생산하는 회분식 공정이 매우 경제적이라고 할 수 있다

회분식 공정과 관련된 전산화와 최적화에 관한 가장 중심적인 역할을 하고 있는 것은 최적 생산 계획 및 일정 계획(Optimal production planning and scheduling)과 관련된 분야이다. 회분식 공정은 불연속 공정이라는 특성을 가지고 있기 때문에, 연속 공정 보다 훨씬 복잡한 물류 흐름 구조를 가지게 되며, 자연히 최적 생산 일정 수립 문제가 연속식 공정보다는 어려워지게 된다.

회분식 공정의 최적 생산 일정 수립 문제는 현재 가지고 있는 장치, 인력, 시간, 유틸리티와 같은 자원(resource)을 가장 효율적으로 운영함으로써 주어진 시간동안 생산량의 증대와 이익을 최대화 시키기 위한 문제를 말한다. 일반적으로 계획을 잡는 목적과 대상 기간의 길이에 따라 생산 계획(Planning)과 일정 계획(Scheduling)으로 구분하게 되며, 생산 계획에서는 장기간의 시장 수요와 제품의 가격 등을 고려하여 주어진 기간 동안의 생산량을 결정하게 되며, 일정 계획에서는 생산 계획 단계로부터 주어진 생산량을 만족시키기 위해 각 제품의 생산 순서와 생산 시간을 결정하는 역할을 하게 된다.

회분식 공정의 최적 생산 계획에 관련된 연구는 지난 10여년간 집중적으로 이루어져 왔다. 초기에는 각 작업 단계별로 하나의 장치만을 가지는 단순 직렬형 다품종 회분식 공정(simple serial multi-product batch process)에서 각 단계 사이에 중간 저장조 운영 방안을 고려한 제품의 조업 완료 시간을 계산하는 알고리즘을 구하는 연구가 활발하게 이루어졌지만, 점차 공정의 형태를 보다 일반적이며 다양한 형태로 확장하여 망형 회분식 공정(network batch process), 병렬 공정(parallel flowshop), 다목적 회분식 공정 등의 최적 생산계획 문제를 다루어왔다. 최초에 제안된 알고리즘의 형태는 많은 가정이 도입되어, 실제 공정과는 거리가 있는 간단한 문제에 적용 가능한 것이었지만, 점차 많은 연구자들에 의해 실제 공정에서 일어나는 생산 시간과 장치 준비시간, 수송시간, 장치 세척 시간과 같은 세부적이고 조업의 실제적인 상황을 반영할 수 있는 방향으로 알고리즘이 개발되어져 왔다[2]-[6].

본 논문에서는 회분식 공정의 스케쥴링에 대한 그동안의 연구에 대한 내용을 정리해보았다. 우선 2장에서는 회분식 공정의 스케쥴링을 위한 기본적인 개념을 소개하였고 3장에서는 다품종 회분식 공정 및

다목적 회분식 공정의 스케쥴링 모델 및 접근 방법을 설명하고, 무배관 공정 및 반도체 생산 공정의 스케쥴링에 대한 내용을 언급하였다.

2. 회분식 공정의 생산 일정 계획

2.1 회분식 공정의 개요

회분식 공정에서는 한 장치에서 조업이 일정시간 이루어지게 되면, 그 시간 동안은 그 장치로의 물질 출입이 전혀 없다는 것이 연속식 공정과의 큰 차이점이다. 따라서, 회분식 공정에서 조업이 진행되는 상황을 보고자 하면, 각 장치 별로 운전 상황을 보여주는 그림이 필요하다. 이 때 사용되는 것이 바로 그림 1과 같은 Gantt chart이며, 이 차트에서는 한 장치에서 물질의 유입, 조업의 시작과 완료, 반응 완료 물질의 유출, 세척 및 준비, 대기 등의 상황을 막대(bar)를 이용해 표시해 준다. 조업자는 이 Gantt chart를 통해 각 장치의 운전 상태는 물론 공정 전반에 대한 운전 현황을 파악하는데 크게 도움이 되며 최종적으로 최적 스케쥴링의 결과를 볼 수 있다.

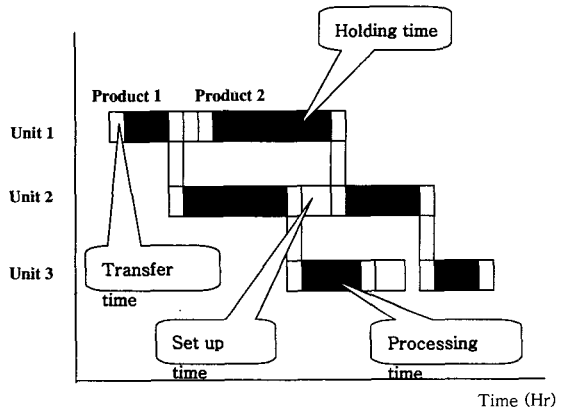

그림 1. 간트 차트(Gantt Chart)의 예.

회분식 공정의 종류를 분류하는 데에는 공정의 구조, 중간 저장조의 운영 방안, 수요가 일정한 경우와 변화하는 경우, 수요가 관심 시간대에서 연속적으로 공급이 되어야 하는 경우와 한 시점에서 한번에 이송이 되는 경우 등 다양한 형태로 분류가 된다.[7]

2.2 공정 구조에 따른 분류

회분식 공정은 공정의 구조에 따라서 크게 다품종 회분식 공정(multi-product batch process), 다목적 회분식 공정(multi-purpose batch process)과 자원을 고려한 망형 공정(state-task network)으로 나눌 수 있다. 다품종 회분식 공정이란 그림 2와 같이 생산하는 제품 종류는 다양하지만, 모든 제품이 같은 경로를 통해 생산되기 때문에 각 장치에서의 제품 처리 순서가 같고, 각 제품마다 거치는 장치의 순서 역시 같은 flowshop 형태의 공정을 가리킨다.

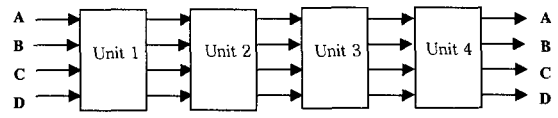

그림 2. 다품종 회분식 공정의 예제.

이에 반해 다목적 회분식 공정이란 그림 3과 같이 각 제품들 간의 제조 경로가 서로 다르기 때문에 각 장치에서 처리하는 반응물도 서로 다르고, 각 제품이 거치는 장치들의 순서도 서로 다른 jobshop 형태의 공정으로서, 다품종 회분식 공정에 비해 훨씬 복잡한 형태를 띄게 된다.

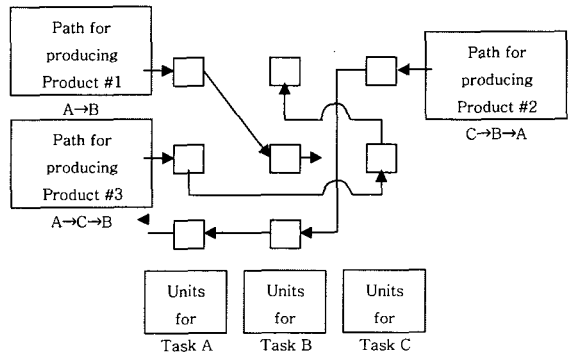

그림 3. 다목적 회분식 공정의 예제.

결국 다품종 회분식 공정과 다목적 회분식 공정을 구분 짓는 것은 생산하는 제품들의 제조법이 얼마나 유사한가(similar) 하는 점이다. 일반적으로 제조법의 유사 정도가 강한 제품들을 생산할 때는 다품종 회분식 공정이 사용되지만, 제조법의 유사 정도가 약한 제품들을 생산할 때는 다목적 회분식 공정을 사용하게 된다.

다목적 회분식 공정은 각 제품의 생산 경로에 따라 다시 순차적(sequential) 다목적 회분식 공정과 비순차적(non-sequential) 다목적 회분식 공정으로 나눌 수 있다[8]. 순차적 다목적 회분식 공정은 그림 4와 같이 각 제품을 생산하기 위해 중간에 거치는 단계가 모두 같지는 않지만 순서가 일정한 공정 (예를 들면 A 제품은 단계 1→단계2→단계 4, B 제품은 단계 1→단계3→단계 4, C 제품은 단계 2→단계3→

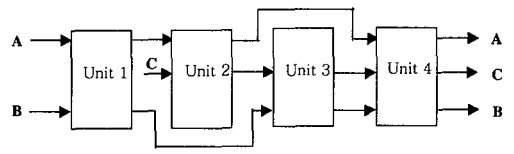

그림 4. 순차적 다목적 회분식 공정.

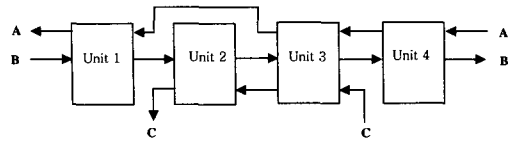

그림 5. 비순차적 다목적 회분식 공정.

단계 4)을 말하며, 비순차적 다목적 회분식 공정은 제품의 생산 단계 순서가 서로 뒤바뀌기도 하는 그림 5와 같은 공정을 말한다.

그리고, 장치 비용이 비싸서 같은 기능을 하는 작업을 동일한 장치에서 반복 생산을 하는 경우에는 그림 6과 같은 형태의 재진입 공정(Reentrant process)도 있다.

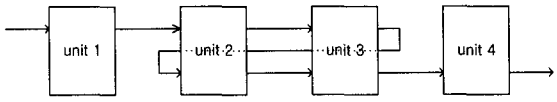

그림 6. 재진입 공정의 예제.

자원을 고려한 망형 구조 공정이라는 것은 그림 7과 같이 각 제품들 간의 제조 경로가 다르다는 면에서는 다목적 회분식 공정과 같지만, 경로가 더욱 복잡하여 하나의 작업을 수행하기 위해서는 이전에 복수의 서로 다른 작업들을 미리 수행하게 되는 형태를 가지게 된다.

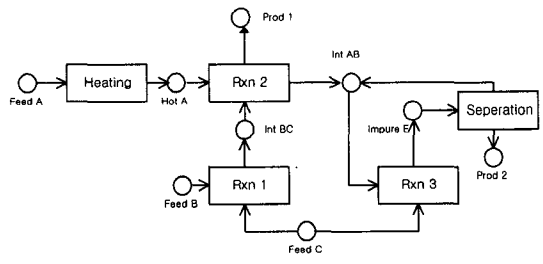

그림 7. STN 형태의 공정 예제.

이러한 대표적인 공정 외에도 최근에 일본에서 개발된 새로운 회분식 공정 형태인 그림 8과 같은 무배관 공정(pipeless process)이 있다. 무배관 공정은 배관을 통해 이루어진 기존 회분식 공정의 물질 수송 방식 대신, 물질을 실은 이동성 반응 용기가 역(station)으로 불리는 공정 단위들 사이를 오가며 제품을 생산하는 방식이다. 무배관 공정은 기존 회분식 공정의 복잡한 배관망을 없앰으로써 원래 회분식 공정의 장점인 유연성(flexibility)을 최대한 살리고, 토지의 효율적인 사용을 극대화시킨 공정이라고 할 수 있다.

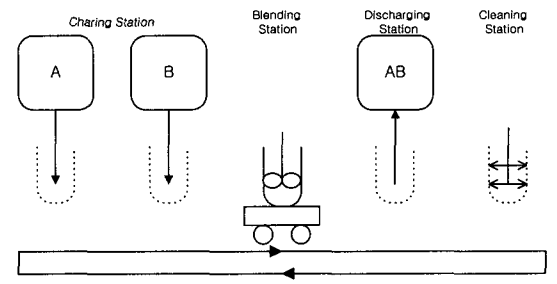

그림 8. 무배관 공정의 예제.

2.3 중간 저장조 운영 방식에 따른 분류

회분식 공정은 불연속적인 공정이기 때문에 한 단계에서 처리되고 난 물질이 연속적으로 다음 장치로 흘러가는 연속식 공정과는 운영 방식에서 큰 차이가 있다. 즉, 한 단계에서 반응이 완료된 상태라고 해도 다음 단계가 준비되지 않으면 반응이 완료된 물질을 비워내고 다음 반응을 수행할 수 없기 때문에, 결과적으로 전체적인 조업 시간이 지연되어 생산성이 떨어지게 된다.

이러한 생산성의 손실을 막기위해 회분식 공정에서는 일반적으로 반응 중간 물질을 임시로 저장하기 위한 저장조(storage tank)를 필요한 반응 단계 사이에 놓게 되며, 이러한 중간 저장조의 운영 방식은 그 특성에 따라 UIS(Unlimited Intermediate Storage), NIS(No Intermediate Storage), FIS (Finite Intermediate Storage), ZW(Zero Wait) 방식으로 나누게 된다[1].

UIS 방식은 저장조의 용량이나 개수에 제한이 없는 이상적인 경우로서, N개의 제품을 생산하는 경우 각 단계마다 (N-1)개 이상의 저장조가 있는 경우를 말한다. 이런 경우에는 한 단계에서 반응이 완료됐을 때 다음 단계가 준비되지 않았다고 하더라도 중간 물질을 저장조에 보내고 바로 다음 반응을 시작할 수 있다. 결과적으로 다음 단계의 준비를 기다리며 대기하는 시간을 줄여줌으로써 조업 시간이 낭비되는 것을 막을 수 있으나 저장조에 대한 장치비가 많이 소요된다.

반면, NIS 방식 같은 경우는 공정 내에 별도의 중간 저장조가 없는 경우로서, 다음 단계가 준비되지 않은 경우에는 현 단계의 반응 완료 물질을 배출하지 못한 채 반응 장치가 하나의 저장조 역할을 하면서 다음 단계가 준비될 때 까지 중간 물질을 장치 내부에 저장하게 되는 경우이다.

FIS 방식의 경우는 UIS 방식과 NIS 방식의 중간 경우로서, 어느 단계에는 중간 저장조가 있는가 하면, 다른 단계에는 없기 때문에 뒤에 저장조가 있는 단계의 경우는 저장조의 개수에 따라 현 단계의 반응완료 물질을 비워낼 수 있는 여유가 있는 반면, 저장조가 없거나 부족한 단계에서는 NIS 방식의 경우와 동일하게 운영되게 된다.

ZW방식의 경우는 중간 저장조가 없는 점에서는 NIS방식과 같지만, 반응이 완료된 물질이 다음 단계로 넘어가지 않고 장치 내에 머무르는 것이 허용되지 않는 점에서 NIS방식과는 차이가 있다. 즉, ZW 방식은 한 단계에서 반응이 완료된 물질이 지체없이 다음 단계로 넘어가 조업을 수행해야만 하는 경우를 가리킨다. 이 방식은 주로 반응성이 높고 불안정한 중간 물질들을 생산하는 경우에 사용되는 공정이며, 이 경우에는 현재 단계에서 장치를 사용할 수 있다고 하더라도, 현 단계 작업 완료 후 다음 단계로 바로 넘어갈 수 없는 경우라면 다음 단계 작업이 가능할 때까지 현 단계에서 작업을 시작할 수 없기 때문에 전체적인 조업 시간이 길어질 수 밖에 없다.

그림 9에서는 2개의 장치를 연속적으로 사용하는 가상의 공정에 대하여 UIS, ZW, NIS에 따른 조업의 변화를 간트 차트로 나타내었다. (a)에서는 무한대의 중간 저장조를 가지고 있기에 장치1이 먼저 끝나고 다음 작업을 할 수 있는 시간을 많이 가지고 있다. (b)의 경우에는 장치 1이 끝나면서 바로 장치 2를 수행하게 되므로 장치 1에서 다음 작업을 시작할 수가 있는 시간이 (a)의 경우보다 늦어지게 된다. (c)의 경우에는 먼저 작업이 가능하지만 중간 저장조가 따로 없기 때문에 장치1에서 대기하는 시간이 필요한 것을 볼 수가 있다.

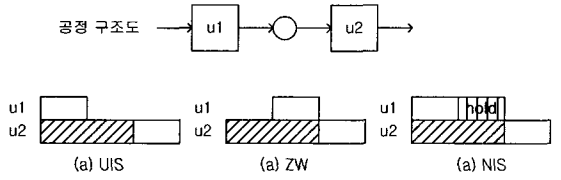

그림 9. 중간 저장조 운영 방안에 따른 조업 예제.

이러한 각 저장조 운영방식의 차이때문에 동일한 제품을 생산하는 공정이라고 해도 어떤 운영 방식을 취하느냐, 어떤 순서로 제품을 생산하느냐에 따라 조업 완료 시간이 크게 달라지게 된다. 이상 언급한 중간 저장조 운영 방식 외에도 단계마다 저장조 운영 방식이 서로 다른 MIS(Mixed Intermediate Storage) 방식과 하나의 저장조를 여러 장치들이 공유하는 CIS(Common Intermediate Storage) 방식 등이 있다[2].

2.4 회분식 공정의 최적화

회분식 공정과 관련된 최적화 문제는 크게 두 가지 유형으로 나누어지게 되는데, 하나는 회분식 공정의 최적 생산 계획 및 스케쥴링(optimal production planning and scheduling)과 관련된 문제이고, 다른 하나는 회분식 공정의 최적 설계 및 합성(optimal design and synthesis)과 관련된 문제이다. 회분식 공정은 불연속 공정이라는 특성을 가지고 있기 때문에, 연속 공정 보다 훨씬 복잡한 물류 흐름 구조를 가지게 되며, 자연히 최적 설계나 최적 생산 일정 수립 문제가 연속식 공정보다는 어려워지게 된다.

회분식 공정의 최적 생산 일정 수립 문제는 현재 가지고 있는 장치, 인력, 시간, 유틸리티와 같은 자원(resource)을 가장 효율적으로 운영함으로써 주어진 시간동안 생산량의 증대와 이익을 최대화 시키기 위한 문제를 말한다. 일반적으로 계획을 잡는 목적과 대상 기간의 길이에 따라 생산 계획(planning)과 일정 계획(scheduling)으로 구분하게 되며, 생산 계획에서는 장기간의 시장 수요와 제품의 가격 등을 고려하여 주어진 기간 동안의 생산량을 결정하게 되며, 일정 계획에서는 생산 계획 단계로부터 주어진 생산량을 만족시키기 위해 각 제품의 생산 순서와 생산 시간을 결정하는 역할을 하게 된다.

앞에서 언급한 회분식 공정의 최적 스케쥴링 문제를 풀어내기 위한 방법은 크게 세 가지 부류로 구분해 볼 수 있다.

첫째는, 수학적 최적화 기법으로서 각 문제를 목적함수와 제약 조건을 가지는 혼합 정수 선형 계획법(Mixed Integer Linear Programming ; MILP)이나 혼합 정수 비선형 계획법(Mixed Integer Non-Linear Programming ; MINLP)형태로 수식화시켜 풀어내는 방법이다. 이러한 MILP나 MINLP 문제들은 목적함수와 제약조건의 형태가 선형이냐 비선형이냐에 따라 구분하며, 연속 변수(continuous variable)와 이산변수(discrete variable)가 함께 섞여있는 형태로서, 이러한 문제의 최적해를 구하기 위해서는 각각의 정수 변수나 이진 변수의 모든 가능한 조합에 대해서 각각 선형계획법(Linear Program-ming ; LP)이나 비선형계획법(Non-Linear Programming ; NLP) 문제를 반복계산 해야만 한다. 따라서, 이러한 수학적 방법은 규모가 작은 문제에 대해서는 적절한 계산시간 내에 최적해를 구할 수 있다는 장점이 있긴 하지만, 문제 규모가 커져서 이진 변수나 정수 변수와 같은 이산변수의 개수가 많아지게 되면 그 문제를 풀기 위해 요구되는 반복 계산의 회수가 기하급수적으로 증가하기 때문에 큰 규모의 문제에는 적용이 곤란하다는 단점이 있다.

둘째는, 각종 경험 법칙으로서 가장 대표적인 것은 Johnson이 개발한 flowshop 생산 형태의 공정에서 장치가 두 개인 경우 생산되는 제품의 최적 생산 순서를 결정하는 알고리즘이다. Johnson의 알고리즘[9]이 개발된 이후 이를 기반으로 해서 장치가 3개 이상인 경우에 대해서도 제품의 최적 생산순서를 결정하기 위한 알고리즘들이 많이 개발되고 평가되었다[3]. 이러한 경험법칙들은 그 특성상 독자적으로 복잡한 문제에 적용되기 보다는 다른 기법들과 함께

사용되는 것이 일반적이다.

세째는, 최근에 많이 연구되어진 SA(Simulated Annea-ling)나 GA(Genetic Algorithm)와 같은 무작위 확률법에 의한 탐색 방법으로서, 이들 역시 최적 생산계획 문제에 있어 큰 규모의 문제에 대해서도 빠른 시간내에 준최적해를 구해주는 효과적인 방법으로 알려져 있다[2][6][10].

이러한 경험법칙이나 무작위 확률법은 수학적 방법과 달리 비교적 큰 규모의 문제도 적절한 계산 시간 내에 풀어낼 수 있다는 장점이 있긴 하지만, 주어진 문제에 대해 언제나 최적 해를 보장할 수는 없다는 단점이 있다. 따라서, 이러한 방법을 사용할 때는 반드시 반복 계산 도중에 지역 최적해 (local optimum)에 빠지지 않고 우리가 찾고자 하는 전역 최적해(global optimum)에 도달할 수 있도록 알고리즘을 진행시켜 줄 수 있는 안전 장치가 반드시 필요하다.

3. 생산일정계획 접근 방법

3.1 다품종 회분식 공정의 스케쥴링

다품종 회분식 공정은 생산되는 모든 제품이 같은 경로와 장치 순서를 통해 생산되기 때문에 각 장치에서 처리되는 제품의 작업 순서 역시 모든 장치에서 똑같다. 그러나, 각 제품마다 장치에서의 조업 시간(processing time), 작업 전환시 다음 작업 준비에 필요한 준비 시간(set-up time), 제품을 각 단계로 이송하는데 걸리는 이송 시간(transfer time) 등이 서로 다르기 때문에 이들 제품을 어떤 순서로 생산하느냐, 저장조 운영은 어떤 방식으로 하느냐에 따라 주어진 시간 내에 생산할 수 있는 제품의 양과 조업 시간이 크게 달라지게 된다.

다품종 회분식 공정에서 각 제품이 각 단계에서 처리 완료되는 시간을 조업 완료 시간(completion time)이라고 하며, 조업 완료 시간 중 마지막 장치에서 마지막 제품이 조업 완료되는 시간을 특별히 최종조업완료시간(makespan)이라고 한다. 이 조업완료시간을 어떻게 표현하느냐 하는 문제는 회분식 공정에서 중간저장조가 개입된 생산계획 문제를 다루는데 있어 가장 기본이 되는 내용이다.

다품종 회분식 공정의 조업완료시간 알고리즘에 관한 연구는 지난 10년간 많은 연구자들에 의해 매우 활발히 이루어져 왔다. Ku와 Karimi[10]는 UIS, NIS, FIS 방식에서 제품의 조업시간만을 고려한 경우에 조업완료시간을 계산할 수 있는 일반적인 회귀식을 제안했으며, 이를 혼합정수선형계획법으로 수식화함으로써 최종조업완료시간을 최소화시키는 제품 생산순서를 결정하였다. Rajagopalan과 Karimi[6]는 제품 조업시간만을 가지고 조업완료시간을 구하는 것에서 나아가 제품의 이송시간과 조업 준비시간 등을 함께 고려한 조업완료시간 알고리즘을 개발함으로써 현실적인 공정 상황에 보다 적합한 일반적인 조업완료시간 알고리즘을 제안하였다. Birewar와 Grossmann[11]은 ZW 방식에서의 최적 생산순서 결정 문제를 ATSP(Asymmetric Traveling Salesman Problem) 방법을 이용해 접근함으로써 매우 효율적인 최적 생산순서 결정법을 제안하였으며, Jung 등[3]은 기존의 ZW 방식에 대한 조업완료시간 수식을 보완하여 새로운 조업완료시간 계산 방법을 제안하였다. 이후에 Kim 등[4]은 UIS, NIS, FIS, ZW, MIS 방식의 경우에 제품의 이송시간과 준비시간을 모두 고려한 일반적인 조업완료시간 알고리즘과 함께 최적 생산순서 결정을 위한 혼합정수 비선형 계획법을 제안하였다. 최근에는 Ryu와 Lee[12]가 한 작업 단계에 하나의 장치만 있는 (single unit in single stage) 공정에 대한 연구에서 나아가 평행한 이상조업(out-of-phase) 장치가 있는 경우에 대한 조업완료시간 계산 알고리즘을 제안한 바 있다. 최근에는 Mendez 등이 다른 납기일을 가지는 다품종 생산 순서를 결정하는 문제[13], 자원 제약을 가지는 다품종 회분식 공정에서의 생산 일정 계획 문제[14]를 푼 바가 있다. Hui와 Gupta[17]는 공정의 특성을 이용하여 다품종 회분식 공정의 수학적 모형에서 문제의 크기를 줄이는 방법에 대하여 연구하였다. Orcum 등[18]은 다양한 수학적 모형과 그에 대한 계산 시간에 대한 연구 결과를 발표하였다. Guinet와 Legrand[15]는 순서 제약 조건을 통하여 특별한 다목적 회분식 공정을 다품종 회분식와 같은 형태로 문제를 접근하여 풀 수가 있는 방법에 대한 연구를 바탕으로 한 경험 법칙을 제시한 바가 있다. Jain와 Meeran[16]은 이와 같은 다목적 회분식 공정에 대한 연구에 대한 포괄적인 연구 결과의 정리를 한 바가 있다.

3.2 STN을 이용한 다목적 회분식 공정의 스케쥴링

다품종 회분식 공정이나 다목적 회분식 공정은 작업의 순서를 결정하는 문제인 것에 반하여, 자원 제약을 고려하는 경우에는 조업 순서와 작업량을 모두 고려해야 한다. 예를 들어 그림 10과 같이 두 단계 조업을 하기 위하여 (a)의 경우와 같이 작업량의 제약이 없는 경우에는 한번에 모든 작업을 끝낼 수가 있기 때문에 조업 완료 시간이 5 단위 시간이 되는 것을 볼 수가 있다. 그러나, 첫번째 장치의 최대 작업량이 5 단위량이라고 할 때, (b)와 같이 두 번에 나누어 하는 것보다 (c)와 같이 첫 작업을 두 번하고 두 번째 작업을 한 번 하는 것이 조업 완료시간이 줄어드는 것을 알 수가 있다. 특히, 그림 7의 Rxn 2를 하기 위하여 Heating과 Rxn1에서 생성된 중간 생성물을 요구하는 경우와 같이, 복수개의 서로 다른 작업이 앞서서 수행이 되어야만 하는 경우에는 중간 생성물의 양에 따라서 조업 형태가 달라지게

된다. 따라서, 다품종/다목적 회분식 공정에서 고려하지 않았던 중간 저장물에 대한 물질 수지식을 고려하는 방법으로 제시된 것이 State-Task Network (STN) 또는 Resource-Task Network (RTN)이다.[19]

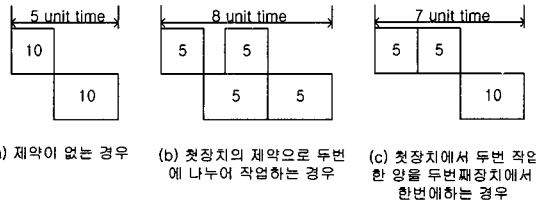

그림 10. 최대 작업량의 제약으로 인한 다양한 간트.

차트. (b)와(c)의 경우에는 첫번째 장치의 최대 작업량을 5라고 가정한다.

그리고, 공정을 STN으로 표현하는 것은 복잡한 화학공정을 정확하게 표현할 수 있는 일반적인 방법이다. STN은 기존의 일반적인 공정표현법인 공정 흐름도를 사용할 때 표현하기 힘든 각 흐름 사이의 혼합(mixing), 분리(splitting), 환류(recycle) 등의 현상을 정확하게 표현할 수 있다는 장점이 있다. STN의 표현 방법은 공정을 표현하기 위해 노드(Node)와 아크(arc)를 사용하며 노드는 다시 원료, 중간물질, 완제품등 어떤 지점에서 물질의 상태(state)를 표현하는 원형 노드와, 각 단위 장치에서의 작업(task)을 표현하는 사각형 노드로 구분할 수 있다. 여기에 각 노드를 아크로 연결하게 되는데 이는 물질 흐름을 통해 작업 순서를 표현하기 위한 것이다. STN은 이렇게 상태 노드와 작업 노드를 서로 구분하여 표현함으로써 기존의 흐름도가 가지는 표현상의 모호성을 극복할 수 있게 되었다.

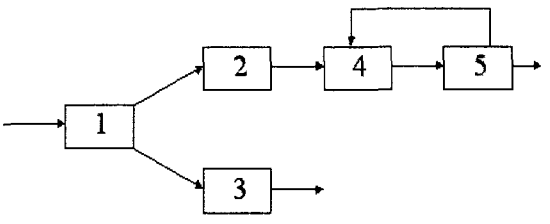

그림 11. 흐름도에 의한 공정 표현.

공정 흐름도는 각 흐름간의 상관관계가 적은 직렬처리 구조(serial processing structure)를 표현하는 데는 적합하지만, 위의 그림 11과 같이 흐름간의 분리나 혼합이 있는 공정에서는 표현상의 모호한 점이 생긴다.

예를 들어 2번과 3번 작업의 경우 1번 작업에서 나오는 한 가지 물질을 동시에 서로 나누어 받아 반응을 하게 되는 것인지 아니면 1번 작업을 거쳐 나오는 서로 다른 물질을 따로 받아 작업을 하는지 위의 표현법으로는 알 수가 없다. 또, 4번 작업 같은 경우에는 2번 작업과 5번 작업으로부터 서로 다른 두 물질을 받아서 반응을 시키는 것인지, 아니면 5번 작업을 거치고 미반응된 물질만을 되돌려 2번 작업에서 나오는 배출 흐름에 합치는 것인지 알 수가 없다.

이러한 공정은 다음과 같은 STN을 사용하면 표현상의 모호함을 피할 수 있다.

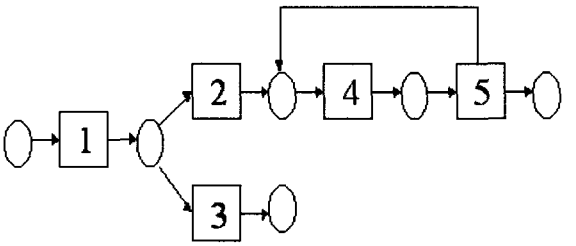

그림 12. STN을 이용한 공정 표현 방법 (a).

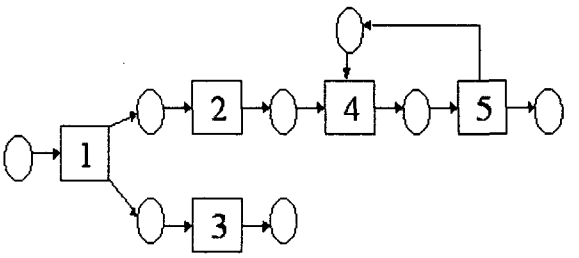

그림 13. STN을 이용한 공정 표현 방법 (b).

예를 들어, 그림 12를 보면 1번 작업을 거쳐서 나오는 한 가지 물질을 2번과 3번 작업이 서로 나누어 받게 되고, 4번 작업은 5번 작업에서 미반응된 물질만을 다시 환류시켜서 2번 작업에서 나오는 배출 흐름에 합치는 것임을 분명히 알 수 있게 된다. 반면 그림 13를 보면 2번과 3번 작업은 각각 1번 작업으로부터 서로 다른 물질을 받게 되며, 4번 작업 역시 2번과 5번 작업으로부터 서로 다른 물질을 받아 작업하게 되는 것임을 쉽게 구분할 수 있다.

처음으로 Kondili 등[19]이 state-task network (STN)을 기반으로 자원 제약을 고려한 단기간 생산 일정 계획을 혼합 정수 선형 계획법 모형 (Mixed Integer Linear Programming Model; MILP Model) 을 제시하였다. 이는 관심 시간대를 그림 14와 같이 동일한 시간으로 나누는 균일 시간 분할 법 (Uniform Time Discretization Method; UDM) 을 기반으로 하고 있으며, 조업 시간이 고정되어 있다는 가정을 기반으로 하여 간결한 모형을 제시하였다. 또한, 실제 공정에서 나타날 수가 있는 다양한 현상을 묘사할 수가 있

는 여러 가지 제약 조건을 제시하였으며, 모형이 간단하여 문제의 해를 손쉽게 구할 수가 있는 장점이 있다.

그림 14. UDM에서 세 작업의 표현을 위한 시간 분할.

그러나, 관심 시간대를 나누는 기준이 되는 조업 시간의 최대 공약수가 관심 시간대에 비하여 상당히 작은 경우에는 관심 시간대를 세밀하게 나누어야 하는 단점으로 인하여 모형의 크기가 상당히 증가할 수가 있기 때문에, 문제를 풀기가 어려워 지는 단점이 있다. 여기서 조업 시간의 차이가 작다고 하여 반올림을 하거나 버림을 하여 조업 시간의 최대 공약수를 크게 바꾸어 문제를 접근하면 문제의 크기는 줄일 수는 있으나, 경우에 따라서는 불가능해 (Infeasible solution) 를 얻게 되거나 준최적해 (sub-optimal solution) 를 찾게 되는 경우도 나타날 수가 있다. 또한 조업 시간이 조업량에 따라서 변하는 경우를 묘사하기가 어려운 단점이 있다.[20][24]

UDM이 가지는 이와 같은 단점을 극복하기 위한 방법이 비균일 시간 분할 법 (Non-Uniform Time Discre-tization Method ; NUDM)이다. 이는 UDM이 미리 균일 시간으로 나누는 것에 반하여, 시간 간격을 최적화 내의 변수로서 문제를 접근하는 방법이다. 이렇게 하여, UDM에서 나타나는 불필요한 시간 간격의 수를 줄임으로서 모형의 크기와 계산 시간을 줄일 수가 있다는 생각에서 출발한다. 예를 들어 그림 15와 같이 3개의 공정을 표현하기 위해서는 UDM을 이용하면 모두 9개의 시간 간격이 필요한 것에 반하여, NUDM을 사용하면 최소 4개의 시간 간격이 요구된다.

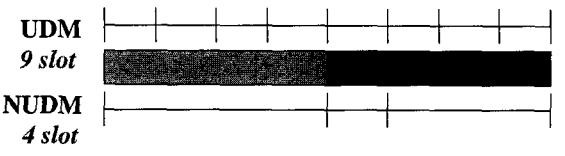

그림 15. NUDM과 UDM의 시간 분할 방법의 차이.

Zhang과 Sargent[20]가 NUDM을 기반으로 제시한 모형에서는 조업 시간이 조업량에 따라서 변할 수가 있다고 보고, 조업 시간을 조업량에 선형식으로 표현하여 문제를 접근하였다. 여기서는 작업의 시작을 이진 변수로 나타내고, 작업이 끝나는 시점을 찾기 위하여 시간 축과의 상관 관계를 알아내기 위한 다른 이진 변수를 도입하였다. 이 모형은 일반적인 경우를 다룰 수가 있도록 만들어져 있으며, 비 볼록 (non-convex) 혼합 정수 비선형 계획법 (Mixed Integer Nonlinear Program-ming; MINLP) 모형으로 인하여 몇 가지 새로운 해법을 제시하고 있다.

Schilling과 Pantelides[21]는 NUDM형태의 새로운 모형을 제시하였으며, 아울러 이러한 해법이 가지는 공통되는 문제인 이완된 값(Relaxed Objective function value)과 실제 목적 함수의 값의 차이가 크다는 점을 해결하기 위하여 새로운 형태의, 이진 변수와 연속 변수 모두에서 분기가 되는, Branch-and-bound방법을 제시하였다. 또한 이를 이용하여 최적의 주기적 생산 일정 계획에 관한 연구와 그에 맞는 해법을 제시하기도 하였다[22]. 그리고, Castro 등[23]은 이들의 방법을 수정하여 문제를 보다 쉽게 풀 수가 있는 방법을 제시하기도 하였다.

Mockus와 Reklaitis[24][25]는 NUDM을 이용하면서, 연속 시간 변수와 작업의 시작과 끝남을 표시하는 이진 변수를 통한 모형을 제시하였다. 이 모형은 MINLP 모형으로 전연 최적화 알고리즘 (Global Optimization Algorithm; GOA) 을 제시하였다. 그러나, 여러 가지 문제의 계산 결과를 통하여 UDM의 결과와 그들의 모형의 결과를 비교하면, 문제에 따라서 모형의 성능이 달라진다고 하였다. 아울러, 문제를 간단하게 하기 위하여 정해진 시간 간격 내에서는 하나의 작업은 한번만 수행이 된다는 가정을 사용하였다.

기존의 연구 결과들은 개념적으로는 UDM과 비교하여 NUDM이 더 적은 모형에서 더 빠른 결과를 낼 수가 있지만, 실제 개발된 모형에서는 오히려 문제의 크기가 상당히 증가하며, 경우에 따라서는 풀기가 어려운 단점을 나타내고 있다. 이와 같은 단점을 극복하여, Ierapetritou와 Floudas[26]-[28]는 간단한 모형을 제시하였다. 여기서는 기존에 장치와 작업을 동시에 고려하는 이진 변수를 사용하였던 것을 서로 분리하여 전체적으로 이진 변수의 수를 줄일 수가 있는 개념을 도입하였으며, 조업 시간이 작업량에 따라서 변할 수가 있다는 가정을 사용하였다. 그리고, 제조법 (recipe) 를 바탕으로 하여 작업의 선행 여부를 제약조건으로 추가하여, 여러 가지 문제에 대하여 효율적인 해를 구하였다. 그러나, NUDM을 이용한 앞서의 두 가지 방법에 비하여 지나치게 간단화가 되어 있으며, 경우에 따라서는 준 최적 해를 찾게 될 수가 있다.

NUDM이 가지는 근본적인 문제는 전체 관심 시간대를 몇 개의 간격으로 나눌 것인가를 결정하는 문제이다. 현재까지 이에 대한 어떠한 체계적인 방법은 없으며, 단지 간격의 수를 하나씩 증가시켜가

면서 목적 함수의 변화를 살피는 것으로 문제를 해결하고 있는 단점이 있다[23].

3.3 기타 공정에 대한 생산 일정 계획

3.3.1 무배관 공정에서의 생산 일정 계획

Niwa[29][30]에 따른면, 무배관 공정은 제품의 수가 다양하며 수요량의 변화가 심하여 자주 세척 및 준비를 통하여 공정을 운전 해야하는 공정의 경우에 유연한 공정의 운전과 아울러 공장내에 연결된 파이프를 없앰으로 인하여 공장의 설계에도 큰 이점을 가질 수가 있다.

처음으로 Pantelides 등[31]이 체계적이면서도 간결한 모형을 처음으로 제시하였으며, 이는 기존의 UDM을 기반으로 한 생산 일정 계획을 가능하게 한다. Realff 등[32]은 앞서의 방법을 기반으로 하여 생산 일정 계획과 공정 설계를 동시에 고려하는 모형을 제시하였으며, 보다 체계적인 생산 일정 계획과 설계 문제의 반복 계산을 통하여 해를 얻어내는 방법을 제시하였다.

그러나, 앞서 말한 바와 같이 UDM이 가지는 근본적인 문제인 시간 간격에 따라 계산 시간이 오래 걸리는 단점으로 인하여Bok과 Park [33]은 연속 시간대에서 표현하는 방법을 제시하였다. 여기서는 Pinto 등[34]이 생산물과 장치에 대한 두개의 시간 축을 활용한 것을 이용하여, 기존에 고려되지 않은 재순환 공정을 표현하는 방법을 제시하였다.

또한 이러한 수학적 접근 방법은 큰 문제에서 해를 얻기가 어렵다는 단점을 극복하기 위하여, Huang과 Chung[35]은 제약 조건 만족 방법(constraint satisfaction techniques; CSP)를 이용한 방법을 제시한 바 있다. 이 경우는 최적의 해를 보장할 수는 없지만, 가능해를 짧은 시간에 얻을 수가 있다는 장점이 있다.

3.3.2 반도체 공정에서의 생산 일정 계획

반도체 산업은 차세대 21세기 과학발전을 주도할 중추분야로서, 경쟁의 승패를 좌우하는 제품의 성능과 가격면에서 우위를 점하기 위해, 신제품과 신공정 개발이 동시다각적으로 이루어지고 있다. 점차 제품의 수명이 짧아지고, 다양한 제품의 소량생산이 많아질 것을 고려한다면, 상대적으로 미흡했던 생산관리와 생산일정계획의 최적화를 통한 경쟁력 향상이 절실히 요구된다.

웨이퍼 제조, 웨이퍼 검사, 조립, 최종 검사로 크게 나누어지는 반도체 공정에서 생산일정계획이 가장 필요한 부분은 웨이퍼 제조 부분인데, 제조기기가 매우 고가이므로 대부분 재진입(reentrant)하여 공정이 이루어진다. 이러한 재진입 흐름은 공정의 성격을 다품종도 다목적도 아닌 기존의 분류기준으로 나뉘지 않는 새로운 성격으로 만든다. 아울러, 이러한 공정은 그림 16과 같이 한번에 하나의 작업을 하는 Single channel facility, 여러 개의 생산 방향이 서로 독립적으로 움직일 수가 있는 Multiple-channel facility, 몇 개를 묶어서 작업하는 Batch facility 등이 섞여서 보다 복잡해지게 된다[36].

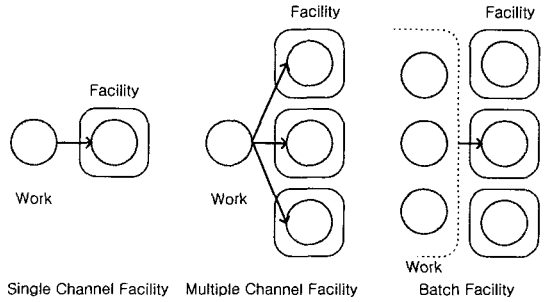

그림 16. 반도체 제조 공정에서 공정 단위[36].

위와 같은 성격을 지닌 반도체 제조공정의 일정계획을 위해 많은 접근방법으로 연구가 되고있다. 웨이퍼 제조 공정에 대한 생산 일정 계획에 대한 연구는 Wein[37]에 의하여, 세가지 실험 공정에 대한 여러 가지 경험 법칙에 대한 그 성능 비교가 행하여진 바가 있다. 무작위 확률함수를 이용한GA(Genetic Algorithm) [38]와 SA(Simulated Annealing)[39]를 이용하거나 경험적 방법인 SBA(Sequence Branch Algorithm)[40]을 이용해 비교적 큰 규모의 일정계획을 시도하고 있다. 수학적 접근방법으로는 주기적 생산계획에 있어 평균과 분산을 줄이려는 노력[41]과 몇가지 재진입을 고려한 모델이 보고되었다[42][43]. 수학적 접근방법의 주된 관심사는, 구현된 모델을 효율적으로 풀기 위해서 이진 변수의 수를 줄이는 것이다. 연속시간 표현법을 이용[34]하여 수를 줄이는 방법이 있고, 모델링에 있어서 다목적 공정보다는 다품종 공정으로 모델링을 하는 것이 이진 변수 생성 억제에 유리함이 밝혀졌다.[44] 기존의 재진입 공정 모델은 이진변수를 줄이기 위해, 생산하는 제품의 종류를 하나로 가정하여 복수개를 생산하는 모델이었다. 그러나 ASIC(Application Specific Inte-grated Circuit)와 같이 다품종 소생산이 점차 늘어나는 추세를 볼 때, 생산제품의 종류가 다양한 경우를 고려하는 것이 필요하다. 또한 최근에는 Lamba 등[45]에 의한 경험법칙을 활용하여 문제를 보다 쉽게 접근하는 방법에 대한 연구도 진행되고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 회분식 공정의 스케쥴링에 대한 일

반적인 개념을 알아보았고 다품종 및 다목적 회분식 공정에 대한 스케쥴링 연구 방향을 정리했다. 더 나아가 미래의 회분식 공정으로 주목받고 있는 무배관 공정의 스케쥴링에 대한 내용도 언급하였고 적용 사례의 한 부분으로써 반도체 공정의 스케쥴링에 대해서도 다루었다. 이런 회분식 공정에 대한 스케쥴링 모델들은 장치의 효율성 향상과 생산성 증가를 위해서 사용되고 있으며 좀 더 확장된 개념에서 얼마전부터 선진국의 앞서가는 기업에서 각광받고 있는 전사적 자원 관리(ERP, Enterprise Resource Planning) 및 공급 사슬 경영(SCM, Supply Chain Management)의 중요한 요소 기술로 사용되고 있다.

참고문헌

[1] H. M.Ku, D. Rajagopalan, and I. A. Karimi, "Scheduling in batch processes", *Chem. Eng. Prog.*, vol. 35 Aug, 1987.

[2] J. H. Jung, Ph. D. Dissertation, POSTECH, Pohang, Korea, 1994.

[3] J. H. Jung, H. Lee, D. R. Yang, and I. B. Lee, "Completion times and optimal scheduling for serial multiproduct processes with transfer and setup times in zero wait policy", *Computers and Chem. Eng.*, vol. 18, no. 6, pp 537, 1994.

[4] M. S. Kim, J. H. Jung, and I. B. Lee, "Optimal scheduling of multiproduct batch processes for various intermediate storage policies", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 35, pp 4058, 1996.

[5] H. M. Ku, and I. A. Karimi, "Scheduling in serial multiproduct batch processes with finite interstage storage : A mixed integer linear program formulation", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 27, pp 1840, 1988.

[6] D. Rajagopalan, and I.A. Karimi, "Completion times in serial mixed storage multi-product processes with transfer and setup times", *Computers and Chem. Eng.*, vol. 13, no.1/2, pp175, 1989.

[7] I. E. Grossmann, "공정 설계와 운전을 위한 최적화 기법", 연세대학교, 1996.

[8] V. T. Voudouris, and I. E. Grossmann, "MILP Model for Scheduling and Design of a Special Class of Multipurpose Batch Plants", *Computers and Chem. Eng.*,vol. 20, no. 11, pp 1335, 1996.

[9] S. M. Johnson, "Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included", *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 1, no. 1, 1954.

[10] H. M. Ku, and I. A. Karimi, "An evaluation of simulated annealing for batch process scheduling", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 30, pp. 163, 1991.

[11] D. B. Birewar and I. E. Grossmann, "Efficient optimization algorithms for zero-wait scheduling of multiproduct batch plants", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 28, pp. 1333, 1989.

[12] J. H. Ryu and I. B. Lee, "A new completion time algorithm considering an out-of-phase policy in batch processes", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 36, pp. 5321, 1997.

[13] C. A. Mendez, G. P. Henning, and J. Cerda, "Optimal Scheduling of batch plants satisfying multiple product orders with different due-dates," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 24, pp. 2223-2245, 2000.

[14] C. A. Mendez, G. P. Henning, and J. Cerda, "An MILP continuous-time approach to short-term scheduling of resource-constrained multistage flowshop batch facilities," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 25, pp. 701-711, 2001.

[15] A. Guinet and M. Legrand, "Reduction of jop-shop problems to flow-shop problems with precedence constraints" *European Journal of Operational Research*, vol. 109, pp. 96-110, 1998.

[16] A. S. Jain and S. Meeran, "Deterministic job-shop scheduling : Past, present and future" *European Journal of Operational Research*, vol. 113, pp. 390-434, 1999.

[17] C. W. Hui and A. Gupta, " A novel MILP formulation for short-term scheduling of multistage multi-product batch plants" *Computers and Chem. Engng.*, vol. 24, pp. 1611-1617, 2000.

[18] S. Orcun, I.K. Altinel, and O. Hortacsu, "General continuous time models for production planning and scheduling of batch processing plants: mixed integer linear program formulations and computational issues", *Computers and Chem Engng*, vol. 25, pp. 371-389, 2001.

[19] E. Kondili, C. C. Pantelides and R. W. H. Sargent, "A General Algorithm for Short-term Scheduling of Batch Operations-I. MILP Formulation" *Computers Chem. Engng.* Vol. 17, pp. 211, 1993.

[20] X. Zhang, R. W. H. Sargent, "The Optimal Operation of Mixed Production Facilities-A General Formulation and Some Approaches for the Solution" *Computers Chem. Engng.* Vol. 20, pp. 897, 1995.

[21] G. Schilling, C.C. Pantelides, "A Simple Continuous-time Process Scheduling Formulation and a Novel Solution Algorithm" *Computers Chem. Eng.* Vol. 20, S1221, 1996.

[22] G. Schilling, C. C. Pantelides, "Optimal Periodic Scheduling of Multipurpose Plants" *Computers Chem. Engng.* Vol. 23, pp. 635, 1999.

[23] P. Castro, A. P. F. D. Barbosa-Póvoa and H. Matos, "An Improved RTN Continuous-Time Formulation for the Short-term Scheduling of Multipurpose batch Plants" *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 40, pp. 2059, 2001.

[24] L. Mockus and G. V. Reklaitis, "Mathematical Programming Formulation for Scheduling of Batch Operations Based on Nonuniform Time Discretization" *Computers Chem. Engng.* vol. 21, pp. 1147, 1997.

[25] L. Mockus and G. V. Reklaitis, "Continuous Time Representation Approach to Batch and Continuous Process Scheduling. 1. MINLP Formulation" *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 38, pp. 197, 1999.

[26] M. G. Ierapetritou, C. A. Floudas, "Effective Continuous-time Formulation for Short-term Scheduling. 1. Multipurpose Batch Processes" *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 37, pp. 4341 1998.

[27] M. G. Ierapetritou and C. A Floudas, "Effective Continuous-time Formulation for Short-term Scheduling. 2. Continuous and Semi-continuous Processes." *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 37, pp. 4360, 1998.

[28] M. G. Ierapetritou, C. A. Floudas, "Effective Continuous-time Formulation for Short-term Scheduling. 3.Multiple Intermediate Due Dates" *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 38, pp. 3446, 1999.

[29] T. Niwa, "Pipeless plants boost batch processing," *Chem. Eng.*, pp. 103, June, 1993.

[30] T. Niwa, "Evaluation of pipeless process and recipe-based operation," Proc. 5th PSE, pp. 497-502, 1994.

[31] C. C. Pantelides, M. J. Realff and N. Shah, "Short-term Scheduling of Pipeless Batch Plants," *Trans IChemE.* Vol. 73, pp. 431-444, 1995.

[32] M. J. Realff, N. Shah and C. C. Pantelides, "Simultaneous Design, Layout and Scheduling of Pipeless Batch Plants," *Computers chem. Engineering*, vol. 20, pp. 869-883, 1996.

[33] J. K. Bok and S. Park; "Continuous-Time Modeling for Short-Term Scheduling of Multipurpose Pipeless Plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, pp. 3652, 1998.

[34] J. M. Pinto, Ignacio E. Grossmann, "Continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plants" Ind. Eng. Chem. Res.,Vol. 34, No.9, pp. 3037-3051, 1995.

[35] Huang, W. and P. W. H. Chung; "Scheduling of Pipeless Batch Plants using Constraint Satisfaction Techniques," *Computers Chem. Engineering*, 24, 377-383 (2000).

[36] K. Yura, "Cyclic scheduling for re-entrant manufacturing systems" International Journal of Production Economics, vol. 60-61, pp. 523, 1999.

[37] L. M. Wein, "Scheduling Semiconductor Wafer Fabrication", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol 1. No. 3, August 1988.

[38] Catherine Azzaro-Pantel, Leonardo Bernal_Haro, Philippe Baudet, Serge Domenech; Luc Pibouleau, "A two-stage methodology for short-term batch plant scheduling discrete-event simulation and genetic algorithm" Computers chem. Engng, Vol. 22, No. 10, pp. 1461-1481, 1998

[39] E. Peyrol, P. Floquet, , L. Pibouleau, S. Pomenech, "Scheduling and Simulated Annealing Application to a Semiconductor Circuit Fabrication Platn" European Symposium of Computer Aided Engineeing, 1992.

[40] S. Lee, J. Bok and S. Park, "Short-term scheduling of batch process using SBM(Sequence Branch Method)", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 37, pp. 4049-4058, 1998.

[41] S. C. Lu, D. Ramaswamy and P. R. Kumar, " Efficient Scheduling Policies to Reduce Mean and Variance of Cycle-Time in Semiconductor Manufacturing Plants", IEEE Trans. Semicond. Manuf. Vol. 7, No. 3, pp 374-388, 1994.

[42] S.C. Graves, H.C. Meal, D. Stefek and A.H. Zeghmi, "Scheduling of re-entrant flowshops" Journal of Operations Management, Vol. 3, No. 4, pp. 197-207, 1983.

[43] E. Balas, "Disjunctive Programming and A Hieracrchy of Relaxations for Discrete Optimization Problems" SIAM J. Alg. Disc. Meth., Vol. 6, pp. 466, 1985.

[44] S. Moon and S. Park, "Scheduling Models in Semiconductor Industries" KACC conference, Fall, POSTECH, 1996.

[45] Lamba, N., Karimi, I. A. and Bhalla, A. "Scheduling a Single-Product Reentrant Process with Uniform Processing Times", Ind. Eng. Chem. Res. 2000, 39, 4203-4214.

이 규 황
1996년 포항공과대학교 화학공학과 졸업(학사). 1998년 포항공과대학교 대학원 화학공학과 석사과정 졸업(석사). 1998년 ~ 현재 포항공과대학교 대학원 화학공학과 박사 과정 재학중. 관심 분야는 생산 일정 계획과 공급 사슬망 경영 등.

이 인 범
1977 년 연세대학교 화학공학과 졸업(학사). 1979년 한국과학기술원 화학공학과 졸업(석사). 1987년 미국 Purdue 대학교 화학공학과 졸업(박사). 현재 포항공과대학교 화학공학과 교수. 관심 분야는 생산 일정 계획, 합성 및 개조, 공급 사슬망 경영과 자동 제어 등.

이 호 경
1990년 연세대학교 화학공학과 졸업(학사), 1992년 포항공과대학교 화학공학과 졸업(석사), 1995년 포항공과대학교 화학공학과(졸업) 박사, 현재 포항공과대학교 화학공학과 연구조교수. 관심분야는 회분식 화학 공정에서의 생산 일정 계획, 합성, 개조, 화학 공정에서의 공급 사슬망 경영 등.
TEL : 054) 279-5969/ FAX : 054) 279-3499
(Email : hklee@postech.ac.kr)