

Q. 미래의 회분식 공정

포항공과대학교 화학공학과
이 인 범

미래의 회분식 공정

1. 회분식 공정의 조업 상황을 전산화 하는 기술

1.1 기술의 목적과 중요성

회분식 공정은 정밀 화학 제품인 의약품, 생화학 제품, 농약, 도료, 안료, 기능성 고분자 소재, 촉매 제품, 식품 등의 생산 공정 뿐만 아니라 석유 정제 및 윤활유, 섬유 제품, 석유 화학 등의 연속식 생산 공정의 일부에서도 광범위하게 적용되고 있다. 화학공정은 화학 반응이나 물리적 분리, 가열, 냉각 혹은 혼합 공정의 다 성분계가 주로 다루어지므로 일정한 순차적 제조 공정을 거치는 것이 대부분이어서 한 공정에서 같은 제조법으로 생산되는 여러 제품들은 회분식 공정이 유리하다고 할 수 있다. 그러나 지금까지 국내 회분식 공정의 생산은 이러한 다양한 공정에 많은 종류의 제품을 생산하는 만큼 효율적인 원자재의 사용, 장치의 이용도 그리고 순이익과의 연관성을 고려하지는 않았다. 제품의 품질은 유지하면서도 공정 전체에 대한 시야를 가지지 않고 가격 경쟁력의 확보와 고객 주문의 소화와 같은 순익 증대는 소홀히 하였다. 전체 공정의 고가의 장치의 효과적 이용이나 고객 주문에 대한 현 공정에서의 달성 상황에 대한 판단, 재고 상태를 고려한 생산 계획 수립과 같은 능동적 경제 활동을 경험에만 의존해 왔다. 이는 공정 전체를 반영할 수 없는 복잡성과 이를 활발히 다루기에 필요한 투자비용이 너무 크며 효과적 구현에 대한 위험성 때문이었다. 이러한 문제점을 극복하지 못한 생산 형태는 보이지 않는 생산 낭비를 가져와 경쟁력을 상실하게 된다. 해결책은 저렴한 가격을 가지면서도 공정 특성을 반영할 수 있는 생산 관리용 시스템을 사용하는 것이다. 즉 각 제품을 생산하는 경우에 제품 특성상 요구되는 생산 시간과 원자재의 관리 및 재고 관리를 전체적으로 고려할 수 있어야 한다. 이는 공정을 효율적으로 관리하여 고가의 공정 설비를 능률적으로 사용하면서 최대 수익을 얻을 수 있도록 하여야 한다는 것이다. 능률적인 생산 방식의 결정은 한정된 자원과 재고에 대한 정보를 바탕으로 조업 생산 순서와 장치의 조업 시간을 산출 할 수 있게 된다.

이러한 목적, 즉 회분식 공정의 조업 상황을 전산화하는 것을 목적으로 다수의 프로그램들이 개발 중이며 일부는 현재 사용이 되고 있다. 실제 상황에서 생산 일정 계획을 하는 방법을 그대로 유지하면서 그 형태를 전산화하는 것이 하나의 목표가 되겠으며, 전산화가 이루어진 후에

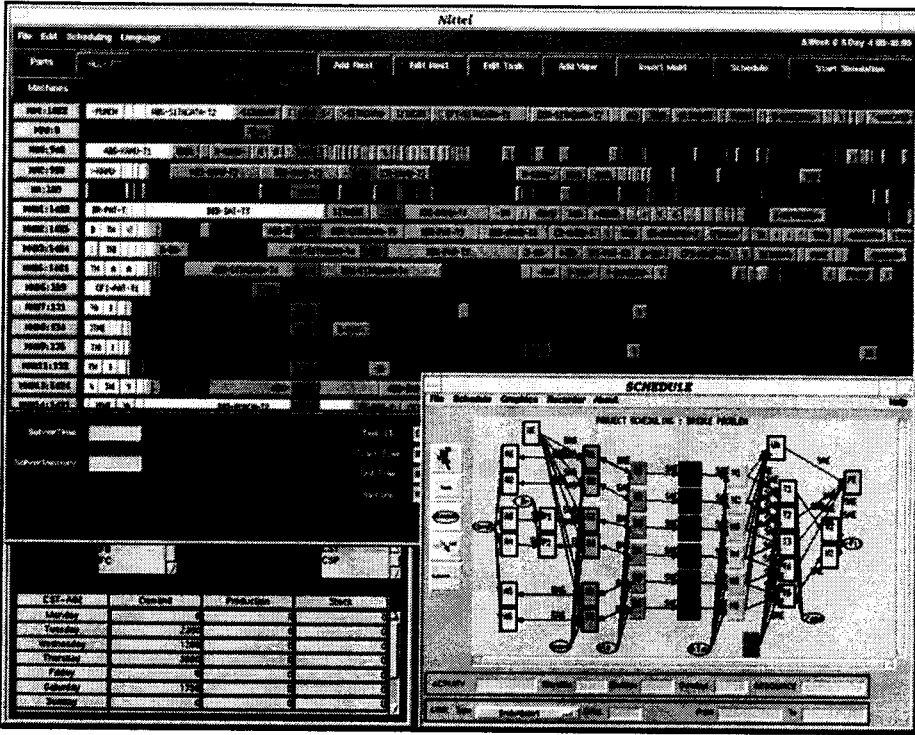
생산 일정 계획을 최적화를 하는 것이 따라와야 할 것이다. 최적이라는 의미는 목적에 따라 다를 것이기에, 먼저 수립된 생산 일정 계획이 제대로 운용이 될 수가 있는 것인가를 판단하는 것과 그 때의 재고가 적절하게 유지가 되고 있는 지를 판단할 수가 있어야 한다. 따라서 이를 위하여 생산 일정 계획에서 기본적으로 가장 많이 사용이 되고 있는 간트 차트와 재고 수준을 보여 줄 수가 있는 생산 일정 계획 부문이 필요하게 된다. 또 이를 수행하기 위하여 공정의 제조법을 입력하는 공정도 부문과 공정도를 받아서 이에 대한 최적 해를 구하고 이를 바탕으로 생산 일정 계획을 눈으로 확인할 수가 있도록 해를 찾아주는 최적화 부문 등 모두 3 부문으로 구현되고 있다. 또한 각각의 구성 요소별로 독립적으로 구현되어서 개별적으로도 유지 및 보수가 가능하게 구현이 되어 있는 것이 일반적이다.

1.2. 최적 생산 일정 계획을 위한 전산화

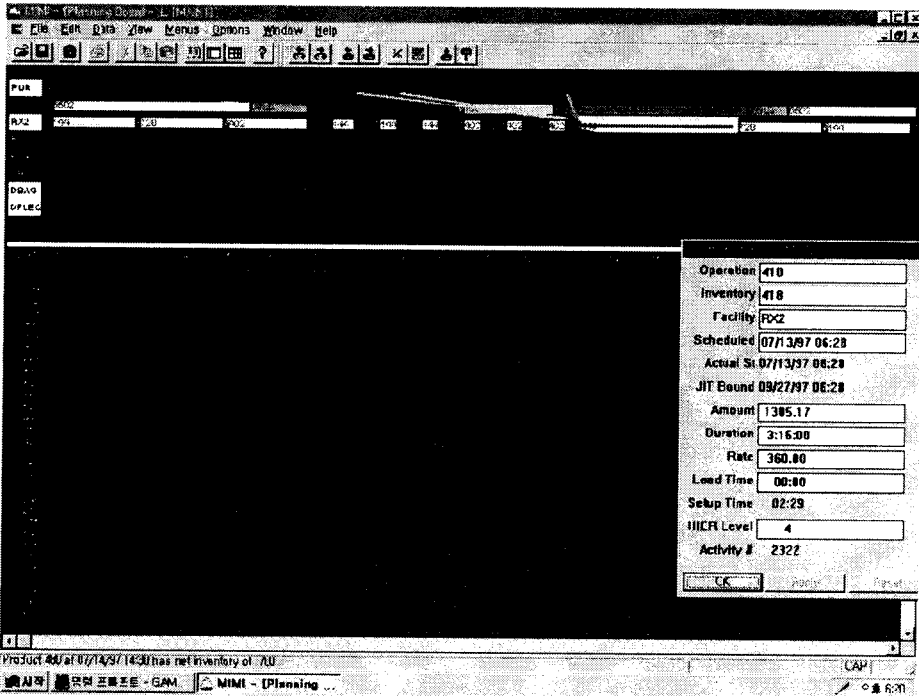
1.2.1 프로그램의 개관

회분식 공정에서 주어진 기간동안 제품의 생산순서를 결정하는 것을 스케줄링이라고 한다. 이러한 스케줄링 문제는 공정도가 주어지고 어느 기간동안 생산 일정 계획을 세울 것인가가 주어지면 적당한 판단 기준에 따라 "언제, 어떤 장치를 이용해, 어떤 제품을 얼마만큼 생산할 것인지" 결정하게 되는 것이다. 따라서 프로그램은 이와 같은 목적에 부합하도록 구성하였다. 일반적으로 공정도를 입력하고, 그에 대한 작업 일정을 프로그램상에 내장되어 있는 최적화 기법을 활용하여 최적의 해를 찾고, 그 결과를 화면에 표시하여 주는 것이 일반적이다. 아울러 표시된 결과에 대하여 여러 가지 가정 상황에 대하여 그 영향을 미리 파악해 볼 수가 있는 기능이 내재되어 있다.

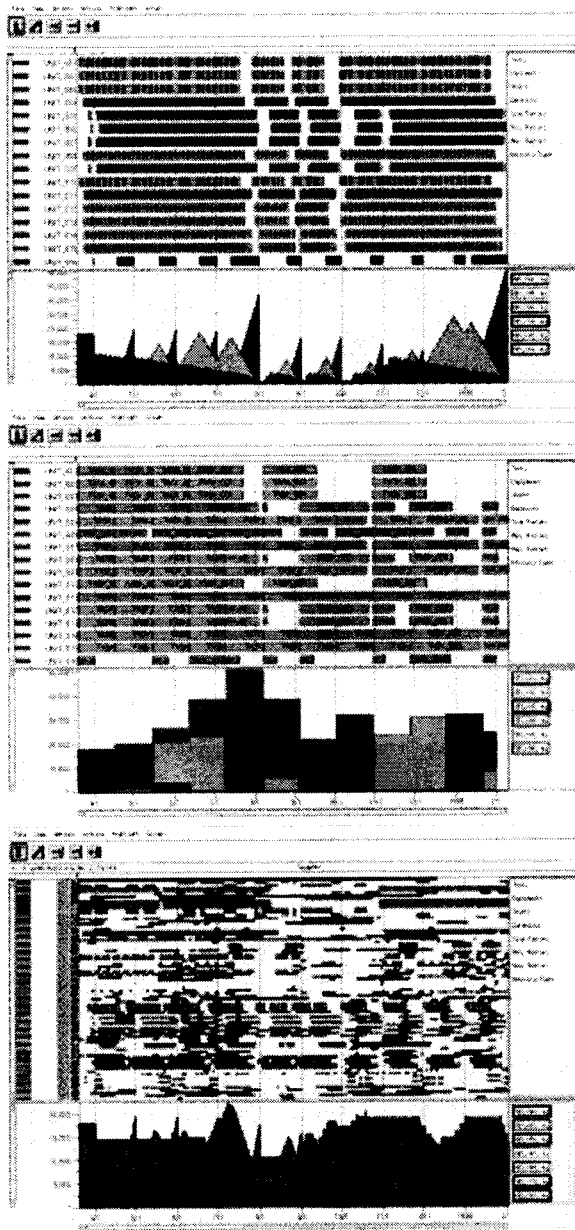
현재 많은 수의 프로그램들이 꾸준히 개발 중이며 상용 프로그램으로서 다수의 프로그램 들이 활용이 되고 있다. 대표적인 예로서는 Aspen Plus 사의 MIMI, ILOG 사의 Scheduler 등의 여러 가지 프로그램들, Combinatorics 의 VirtECS 등이 있다. 이들의 기본적인 기능은 비슷하게 구성이 되어 있다. 일반적인 생산 일정 계획 프로그램은 실제 생산 일정 계획을 작성하고 수정하고 확인하고 하는 프로그램이 되겠다. 여기서는 미리 공정도를 바탕으로 하여 작성된 제조법을 읽어서 제조법을 확인하고, 주어진 생산 일정 계획을 간트 차트와 재고 수준을 통하여 시각적으로 파악하게 된다. <그림 1.1> 의 경우에는 화면상에서 간트 차트와 제조법을 표시하고 있다. 그리고, <그림 1.2>, <그림 1.3>, <그림 1.4>과 같이 상단의 간트 차트와 하단의 그래프를 통하여 재고 수준을 표시하는 것이 일반적이다.



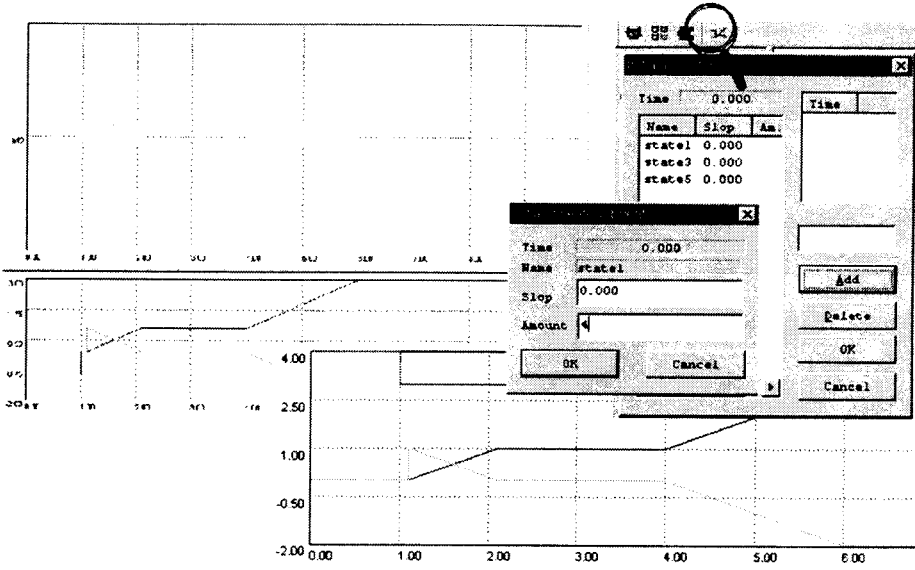
<그림 1.1> ILOG SCHEDULER 의 모습



<그림 1.2> Aspen Plus 의 MIMI 의 예시 화면

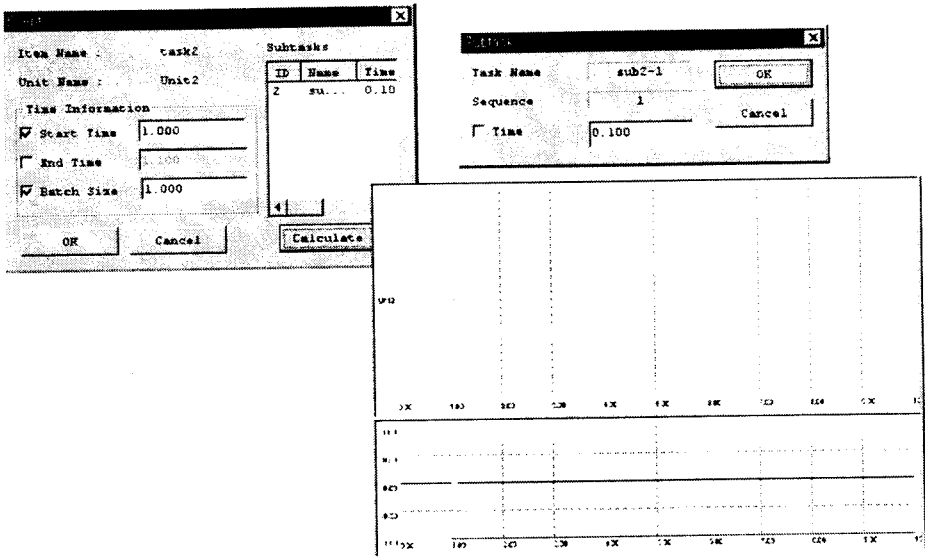


<그림 1.3> VirtECS 의 다양한 예시 화면



<그림 1.4> BatchMan 의 예시 화면

그리고, 각각의 작업들은 고유의 정보를 화면상에서 따로 표시하여 그 정보의 수정에 따른 전체 작업에서의 영향을 판단하기 위한 사용자 작업 기능이 추가로 이루어지게 된다. 여기서는 자체 개발중인 BatchMan 을 통하여 그 기능을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 원하는 장치와 조업 단위를 선정하고 간트 차트 그림 상에서 마우스 누름을 통하여 시간을 선택하면 해당되는 작업이 간트 차트에 선택이 되어 표시가 되고, 그에 상응하는 작업 정보가 표시가 된다. 이러한 정보들은 그림과 같이 몇 개의 대화창으로 구현이 되고 있는 데, 시작 시간이 결정되고, 끝나는 시간을 결정하거나, 시작 시간과 조업량을 결정하면 그 나머지 정보는 계산이 되도록 되어 있다.



<그림 1.5> 회분식 조업의 간트 차트 화면과 재고 수준 화면

1.2.2 최적화 기능

전산화가 되지 못한 기존의 생산 일정 계획에서는 수작업을 통하여 작업량, 작업 장치, 작업 시간 등을 일괄 배치하여 작업 현장에 제시하였다. 그러나 이 경우에는 복잡하고 다양한 실시간 현상 변화에 빠르게 대처하기가 어려울 뿐만 아니라, 그 결과의 최적성 여부를 판단하기가 어려웠다. 그래서 현재까지 제시된 다양한 최적해 탐색 알고리즘을 통하여 최적 생산 일정계획을 모형을 통하여 얻게 되는 기능이 최적화 기능이다. 현재 생산 일정 계획에 대한 완벽한 알고리즘이 개발되지 못한 시점이지만, 생산 일정 계획을 위한 준 최적화 기법에는 다양한 방법이 연구 되고 있다. 그 중에서도 대표적인 방법으로 수학적 접근 방법을 들 수가 있는데, 이는 비교적 짧은 시간에 구하여진 해가 최적임을 입증할 수가 있기 때문이다. 그러나 수학적 모델의 크기의 제약으로 인하여 자체 경험 법칙, 인공 지능을 이용한 가능 해의 탐색 등 여러 가지 다른 방법들을 통하여 해를 구하는 다양한 알고리즘들은 많은 수의 상용 프로그램들이 병행하여 사용하고 있다.

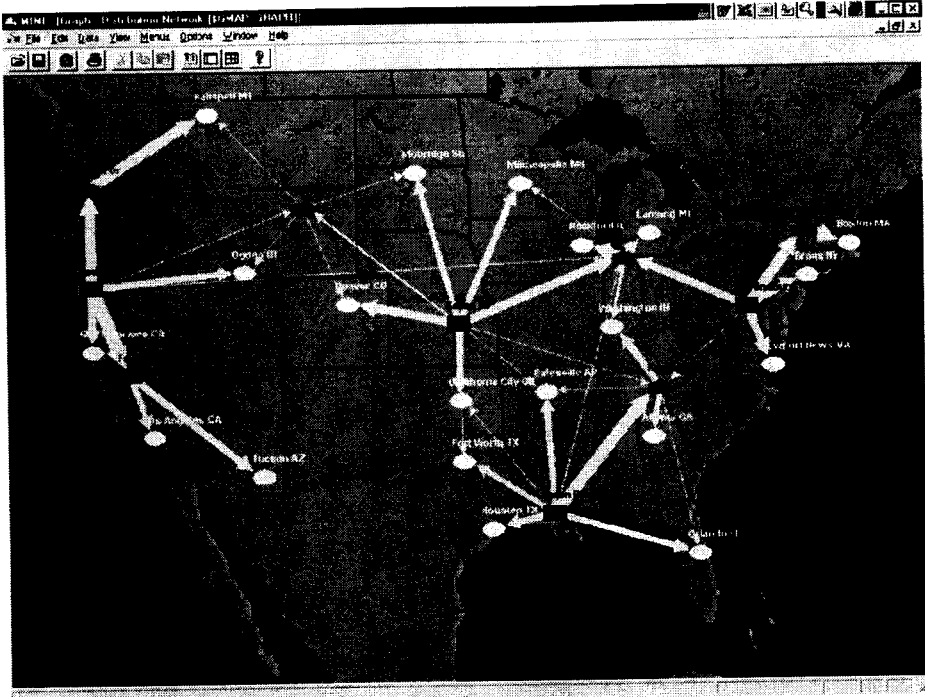
여기서는 대표적인 선형 생산 일정 계획 모형에 대하여 간략히 살펴보면 다음과 같다.

- 목적 : 최소 생산 비용 혹은 최대 이윤
- 제약 조건 : 수요의 충족
- 최대, 최소 작업 기준의 충족
- 원료 물질과 생산 물질의 수지 유지

이와 같은 형태의 모형을 만들어 사용자가 데이터를 입력하여 그 결과만을 화면에서 관찰하여 생산 일정 계획을 수립하게 된다. 이렇게 하여서 기존의 수작업 등을 통하여 결과를 얻는 데에서 생길 수가 있는 단점을 없애고자 하는 것으로 최적화 기능이 필수라고 하겠다.

1.2.3 프로그램의 기타 기능들

현재 개발된 프로그램들은 자원 할당 문제의 모델링 및 해결을 위한 라이브러리 및 각종 기능을 구현하고 있고, 모든 일반적인 운영 체제에서 활용이 가능하도록 하고 있으며, 객체 지향적 디자인으로 인하여 소프트웨어의 개발이 용이하기 때문에 특수한 요구 조건을 만족시킬 수 있도록 하고 있다. 그리고, 출력되는 정보는 ASCII 파일, 데이터베이스, 혹은 다른 C++ 모듈로 정보를 출력이 가능하며, 자체의 다른 프로그램들을 활용하여 데이터 및 결과의 표현과 편집 위해 요구되는 그래픽 에디터를 제공하고 있다. 그리고, 보다 확장된 경우에는 다른 프로그램 언어와도 연계 가능하도록 하고, 특히 Microsoft Windows 를 위한 실행 가능한 DLL 내에서 사용 가능하도록 하고 있다. 이를 바탕으로 하여 ASCII 파일에서 데이터 인식, 데이터 베이스와의 연결을 통하여 관련된 데이터베이스에 접속, 어떤 모듈에서도 데이터 인식을 할 수 있도록 하고 있다. 또한 프로그램에서도 기존에 개발된 선형 계획법 알고리즘을 기반으로 하여 몇가지 경험 법칙을 통하여 최적해를 구할 수가 있도록 되어 있다. 또한 보다 발전된 경우에 있어서는 자바(JAVA)와 같은 인터넷 언어를 적극 활용하여 인터넷 상에서 사용이 가능하도록 하고 있으며, 이를 기반으로 하여 네트워크와 연결하여 데이터 베이스에 데이터를 저장하도록 되어 있다.



<그림 1.6> MIMI 에서의 공급 체인 모형의 예제

1.3 향후 발전 방향

다품종 회분식 공정의 최적 생산 순서 결정을 위한 생산 관리용 소프트웨어를 통하여 단기적 생산 계획 수립 결정에 있어서 공정 운영에 대한 최적 운영 방안을 제시할 수 있다. 그러나 이러한 전산화가 이루어지게 되면 증장기 전략에 대한 운전 정책에 대한 정보 제공과 같은 경영 방침과의 연관성을 부여할 수 있다. 본 기술은 단순 생산 순서 결정에서 출발하여 실제 공정의 다양한 공정 상황을 고려할 수 있는 포괄적인 생산 관리로의 확장을 의미한다. 즉, 현재 여기서 제시된 전산화 기술들은 배정된 생산량을 어떻게 배정하느냐에 관심이 집중되어 있는 것을 생산자와 소비자의 관계로 확대할 수가 있게 된다. 즉, <그림 1.6>에서와 같이 전체 상황을 고려하여 생산자는 공급망(supply-chain)의 최적 설계를 통하여 전체 물류비를 줄이고, 생산량을 바르게 분배하여 각 공장에서 최적의 효율을 유지할 수가 있도록 하여 전사적 최적화를 이룩할 수가 있다. 즉, 생산성을 향상하며 효율적인 자원 및 최대 이익을 기대할 수 있는 전사적 관리 시스템으로의 구축을 위한 기반을 조성할 수 있을 것으로 기대되는데 정보시스템의 컨설팅에서부터 개발과 운영관리에 이르는 CIM(Computer Integrated Manufacturing) 수립에까지 그 연관성을 생각할 수 있을 것이다. 이는 SI(System Integration)을 통한 NETWORKING 에 연관되어 교육사업까지 전개해 나감으로써 진정한

의미로의 공장 자동화의 출발이 되는 파급 효과를 가지고 있다고 판단된다.

2. 다품종 회분식 공장의 최적 개조 합성

2.1 단일 다품종 회분식 공정에 대한 최적 개조 모델

회분식 공정에 대한 많은 연구가 새로운 공장을 설계하는 최적 설계 뿐만 아니라 기존에 있는 회분식 공장에서 새로운 생산 목표와 판매 가격의 변화로 인해 발생하는 개조 문제에 대해 이루어지고 있다. 기존의 공장에 새로운 장치를 추가 도입하는 개조 문제에서는 제품을 팔아서 얻는 판매 수익에서 도입한 장치의 비용을 뺀 이윤을 최대화하는 최적 개조 문제를 생각할 수 있다. 여기서는 최적 개조 문제를 다루기 위한 기본적인 개념 및 지금까지 나온 논문들의 차이점에 대해서 설명한다.

회분식 조업에 대한 최적 개조 문제는 1987년 Vaselenak 등[8]이 처음으로 다루었으며 이들은 혼합 정수 비선형 계획법을 이용하여 최적해를 구하는 접근 방식을 이용했다. 그리고 1991년 Fletcher 등[2]은 Vaselenak 등[8]의 제약조건 중 추가되는 장치가 각 제품의 생산에서 다른 조업 방식으로 사용될 수 있음을 고려하여 제안식의 일부를 수정함으로써 더 좋은 결과를 얻었다. 1993년 Lee 등[4]은 기존의 접근 방법과 다른 경험적인 법칙과 비선형 계획법을 이용한 간단한 방법을 이용하여 Fletcher 등이 낸 것과 같은 결과를 내었다. 1999년 Yoo 등[7]은 기존에 있는 장치의 조업 방식 또한 추가되는 장치의 조합으로 바뀔 수 있다는 것을 고려하여 보다 일반적인 최적 개조 모델을 제안하였다.

일반적으로 최적 개조 문제는 기존 공장의 최대 생산 가능량과 총 조업시간이 주어진 상태에서 판매 가능량이 증가하였을 경우 새로운 장치를 공정 중 어느 위치에 얼마 크기로 놓으면 최대 이윤을 얻을 수 있는 가를 결정하는 것이다. 즉 최적 개조 문제는 추가 장치를 어디에 놓을 것인가의 위치 설정 문제와 추가 장치의 크기 결정 문제로 나누어 생각할 수 있다.

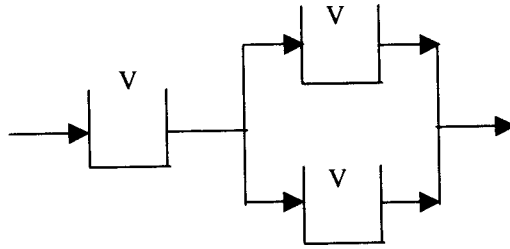
새롭게 추가되는 장치의 최적 위치를 결정하는 문제는 크게 이진 변수를 이용하는 수학적 방법[2, 7, 8]과 경험적인 법칙들을 이용한 방법[3, 4]이 있다. 여기서는 새로운 장치의 추가 위치를 결정하는 간단한 경험적인 법칙을 소개한다. 기존 공정에 대해서 다음의 경험적인 법칙에 의해서 장치를 이상으로 혹은 동상으로 추가할 수 있다.

- 기존의 공정을 분석하여 시간 제약이 걸리는(limiting cycle time :

LCT) 단계에 장치를 평행하게 추가하여 이상으로 조업한다.

- 기존의 공정을 분석하여 생산량 제약이 걸리는 단계에 (limiting batch size : LBS) 장치를 평행하게 추가하여 동상 조업한다.

위의 경험적인 법칙을 이용하여 기존의 공정에 장치를 추가하면 어떤 영향을 미칠 것인지 다음의 간단한 예제를 통해서 살펴본다.



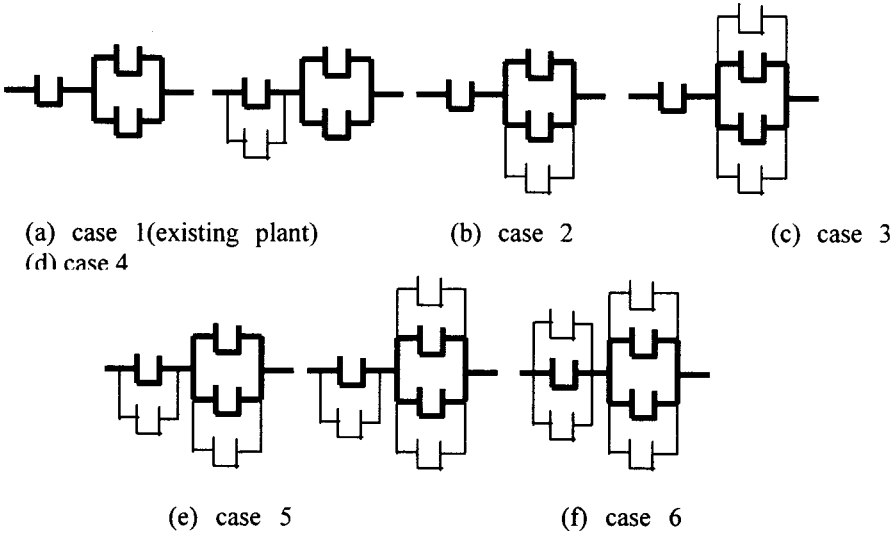
Stage 1 Stage 2(in-sequence mode)

<그림 2.1 두개의 생산 단계를 가진 회분식 공장>

<표 2.1 개조 예제에 대한 데이터>

제품	Stage 1	Stage 2
	처리 시간	
A	0.5	1
B	1	0.5
제품	크기 인자	
A	V	V/2
B	V/2	V
V_j^{old}	V	V

기존의 공장을 표 2.1에 나타난 데이터로 분석해보면 제품 A를 만들 때 첫번째 단계에서는 LBS가 두번째 생산 단계에서는 LCT가 걸림을 알 수 있다. 제품 B 생산시에는 반대로 첫번째에 LCT가 두번째에 LBS가 있음을 알 수 있다. 각 단계마다 두개까지의 장치를 추가할 수 있다고 제한할 때 이 예제에 대한 개조 전략은 아래 그림과 같이 여섯 개의 개조 전략을 제안할 수 있다.



<그림 2.2 예제를 위한 개조 대안들>

기존의 공정과 여섯개의 새로운 개조 대안들에 대해서 분석해보면 다음 표 2.2 와 같이 정리할 수 있다.

<표 2.2 예제에 대한 개조 전략>

Case	P	Operation		Cycle times			Batch sizes			Rates(kg/hr) (=LBS/LC T)
		Stage		Stage		Limit (LCT)	Stage		Limit (LBS)	
		1	2	1	2		1	2		
1	A	-	-	0.5	1	1	1	2	1	1
	B	-	-	1	0.5	1	2	1	1	1
2	A	P	-	0.5	1	1	2	2	2	2
	B	S	-	0.5	0.5	0.5	2	1	1	2
3	A	-	S	0.5	2/3	2/3	1	2	1	3/2
	B	-	P	1	0.5	1	2	3/2	3/2	3/2
4	A	-	S	0.5	0.5	0.5	1	2	1	2
	B	-	P	1	0.5	1	2	2	2	2
5	A	P	S	0.5	2/3	2/3	2	2	2	3
	B	S	P	0.5	0.5	0.5	2	3/2	3/2	3
6	A	P	S	0.5	0.5	0.5	2	2	2	4
	B	S	P	0.5	0.5	0.5	2	2	2	4
7	A	P	S	0.5	1/3	0.5	3	2	2	4
	B	S	P	1/3	0.5	0.5	2	2	2	4

▶ P는 동상으로 조업되고 있음을 S는 이상으로 조업되고 있음을 의미함

Case 1 은 기존의 공정으로 생산 속도가 1 인 반면 Case 6 은 장치 3 개를 도입함으로써 생산 속도가 4 배까지 증가시킬 수 있다. 이 경우 j 단계에서 같은 크기의 평행한 장치를 추가할 때, 이상 조업때의 장치 회전 시간(unit cycle time)과 동상 조업 때의 장치 생산량(unit batch size)의 변화는 다음 식과 같다.

$$(\text{unit cycle time})_{j\text{th stage}} = \left(\frac{\text{unit cycle time of existing units}}{\text{number of existing units} + \text{number of adding units}} \right)_{j\text{th stage}} \quad (2.1)$$

$$(\text{unit batch size})_{j\text{th stage}} = \left(\frac{\text{volume of existing units} + \text{volume of adding units}}{\text{size factor of existing units}} \right)_{j\text{th stage}} \quad (2.2)$$

새롭게 추가되는 장치의 최적 위치와 위의 두식을 이용하면 변화된 장치 회전 시간과 장치 생산량을 알 수 있다. 일반적으로 회분식 공장에서는 생산량을 무한대로 늘려 모두 판매할 수 없으므로 생산량이 판매 가능한 양 이하로 계산된다. 따라서 다음의 제약 조건이 생긴다.

$$n_i B_i \leq Q_i \quad i = 1, \dots, N \quad (2.3)$$

여기서 i 제품의 생산량인 좌변은 이 제품의 최대 판매 가능량인 우변보다 작거나 같은 값을 가진다.

전체 제품을 생산하는데 걸리는 시간은 작업 가능한 시간 H 보다 작거나 같아야 한다는 제약 조건은 다음과 같이 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^N n_i T_{Li} \leq H \quad (2.4)$$

한편 추가되는 장치 j 의 연간 비용은 문제의 단순화를 위해 선형식인 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_j + c_j V_j^{\text{new}} \quad j = 1, \dots, M \quad (2.5)$$

위식에서 첫 항은 고정 비용이고 c_j 는 비용 계수이다. 그리고 제품을 팔아서 얻는 판매 수익은 다음과 같이 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^N p_i n_i B_i \quad (2.6)$$

여기서 p_i 는 제품 i 의 판매가이다. 그러므로, 목적함수는 (2.6) 식에서 (2.5) 식을 뺀 순수 이윤을 최대로 하는 것이다. 이를 정리하면 다음과 같은 비선형 계획법이 된다.

$$\text{목적함수 Max } \sum_{i=1}^N p_i n_i B_i - \sum_{j=1}^M (K_j + c_j V_j^{\text{new}}) \quad (2.7)$$

$$\text{제약조건} \quad n_i B_i \leq Q_i \quad i = 1, \dots, N$$

$$\sum_{i=1}^N n_i T_{Li} \leq H$$

$$V_j^{\min} \leq V_j^{\text{new}} \leq V_j^{\max} \quad j=1, \dots, M$$

$$B_i, n_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, N$$

여기서 B_i, T_{Li} 에 대한 식은 경험적인 법칙에 의한 새로운 개조 방안을 바탕으로 앞에서 제시된 (2.1)와 (2.2)식을 이용하여 계산된다. 간단한 예제를 통해서 앞에서 설명한 경험적인 법칙을 바탕으로 한 비선형 계획법에 대해서 설명한다. 표 2.3 은 실제 개조 예제를 위한 데이터이다.

<표 2.3 실제 개조 예제를 위한 데이터>

(a) 크기 인자

제품 \ 공장구성	Mixer	Reactor
A	2	1
B	1.5	2.25

(b) 공정 시간

제품 \ 공장구성	Mixer	Reactor
A	4	6
B	5	3

(c) 예상되는 시장 수요

제품	단위 판매 수익	시장 수요
A	1.0	1,200,000
B	2.0	1,000,000

(d) 장치에 대한 데이터

데이터 \ 공장구성	Mixer	Reactor
비용 계수	32.54	32.24
비용 지수	1	1
고정 장치비	30,560	30,560
N_j^{old}	1	1
V_j^{old}	4,000	3,000
N_j^{max}	2	2
$V_j^{\min}, V_{jk}^{\min}$	0	0
$V_j^{\max}, V_{jk}^{\max}$	4,000	3,000

예상되는 시장 수요가 1,200,000 과 1,000,000 으로 증가할 경우 기존

공장의 최대 생산 능력으로만 제품을 생산해서 팔 것인지 아니면 새롭게 공장을 개조할 것인지를 결정하는 문제에 직면하게 된다. 앞에서 제시한 경험적인 법칙으로 위의 공정 데이터를 분석하면 장치가 어디에 놓이고 어떻게 조업되는 지를 결정할 수 있다. 장치가 추가된 생산 단계의 수정된 주기 시간과 생산량을 계산하고 앞에서 설명하는 비선형 계획법을 통해서 추가되는 장치의 최적 크기를 결정할 수 있다. 표 2.3 의 기존 공장을 분석해보면 표 2.4 과 같이 첫번째 생산 단계에서는 제품 A 를 생산할 때는 생산량 제약이 걸리고 제품 B 를 생산할 때는 조업 시간에 대한 제약이 걸리고 있다.

<표 2.4 기존 공정 분석 결과>

생산단계 제품		Mixer	Reactor
		A	4
	회분 크기	LBS, 2000(= 4000/2)	3000(= 3000/1)
B	조업 시간	LCT, 5	3
	회분 크기	2667(= 4000/1.5)	LBS, 1333(= 3000/2.25)

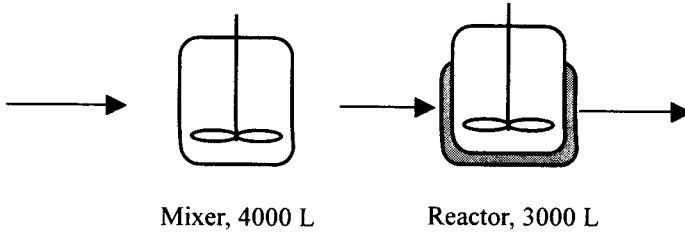
반대로 두번째 생산 단계에서는 제품 A 를 생산할 때는 조업 시간 제약이 걸리고 제품 B 를 생산할 때는 생산량에 대한 제약이 걸리고 있다. 그러므로 최적 개조 방안은 첫번째 생산 단계의 제약을 없애도록 장치를 새롭게 추가하는 방법, 두번째 생산 단계에 장치를 새롭게 추가해서 제약을 없애는 방법, 그리고 마지막으로 첫번째, 두번째 생산 단계에 모두 새롭게 장치를 추가하는 방법이 있을 수 있다. 그러므로, 이러한 개조 방안을 토대로 추가되는 장치의 최적 크기와 최대 이윤을 알기 위해서 기존의 공장에 대한 비선형 계획법 1 과 세개의 비선형 계획법 2, 3, 4 를 풀어보면 표 2.5 와 같은 결과를 얻는다. 두번째 비선형 계획법의 결과와 같이 첫번째 생산 단계에 “1358 L”의 새로운 장치를 A 를 생산할 때는 생산량을 증가시키는 동상으로 B 를 생산할 때는 조업 시간을 단축시키는 이상으로 조업하면 “3,125,200”의 연간 최대 이윤을 가지는 공장으로 변하게 된다.

<표 2.5 실제 개조 예제에 대한 결과>

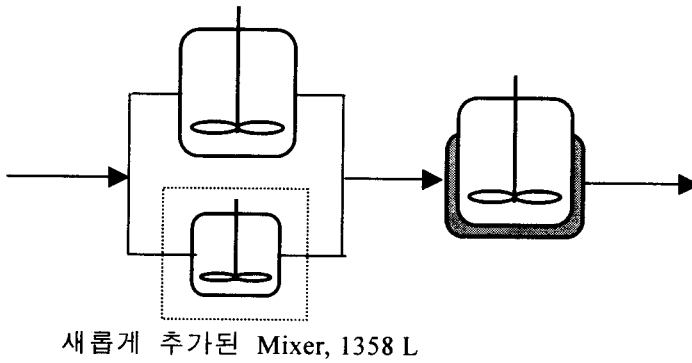
NL P	New units		Operation		Profit
	Stage	Size	A	B	
1	(existing)	-	-	-	2,750,000
2	1	1358	P	S	3,125,200
3	2	1395	S	P	3,124,500
4	1	1545	P	S	3,041,600
	2	1554	S	P	

▶ P 는 동상으로 조업되고 있음을 S 는 이상으로 조업되고 있음을 의미함

기존 공장으로부터 생산할 경우는 “2,750,000”의 이윤만 얻기 때문에 새롭게 장치를 추가해서 조업하는 것이 훨씬 이익임을 알 수 있다. 그림 2.3 은 개조전의 공정도와 개조후의 최적 개조 공정도를 나타내고 있다.



(a) 개조전의 공정도



(b) 개조후의 공정도

<그림 2.3 최적 개조 공정도>

2.2 다지역 회분식 공장의 최적 개조 설계

여기서는 여러 가지 화학 제품을 두 지역 이상의 다제품 회분식 공장에서 생산하고 있는 기업에서 앞으로 추가로 공급해야 할 대형 수요처가 생겼거나 기존 수요처의 소비가 증가할 경우 다지역 회분식 공장의 최적 개조 설계를 위한 모델을 제시한다. 이러한 다지역 회분식 공장을 가진 기업의 최적 개조 문제에서는 목적함수로 전체 기대 판매 이익에 각 공장에서 새롭게 추가되는 장치의 비용과 수송비를 뺀 것으로 놓고 새롭게 개조된 공장 배치, 새로운 장치의 크기 및 조업 형태, 각 공장에서도 매창고까지의 새로운 수송량, 그리고 세부적인 회분식 공정 변수들을 결정한다. 문제를 해결하기 위해서 혼합 정수 비선형 계획법이 제안되었고 최적해는 GAMS/DICOPT+++로 구해진다. 제안된 접근 방법의 효율성은

적용 예제를 통해서 설명된다.

여기서는 새롭게 공급해야 할 도매창고가 생길 경우 그리고 기존 도매창고의 수요가 증가할 경우 생기는 개조 문제에 대해서 유 등[8]이 제안한 혼합 정수 비선형 모델을 이용하여 다지역 회분식 공장의 최적 개조 문제에 적용하였다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어져 있다. 먼저, 다지역 회분식 공장의 최적 개조에 대한 문제 정의 및 다지역 회분식 공장의 최적 개조를 위한 은구조(superstructure)를 설명하고 이러한 문제의 최적해를 구하기 위한 혼합 정수 비선형 계획법에 대해 자세히 언급한다. 이러한 접근 방법의 효율성을 증명하기 위해서 예제 문제들에 적용하고 그 결과에 대해서 논의한다.

2.2.1. 다지역 회분식 공장의 개조

다지역 회분식 공장의 개조 문제는 새롭게 공급해야 할 도매 창고가 발생했거나 기존 도매 창고에서의 수요가 증가한 경우, 그리고 판매 가격 변동 등의 원인이 발생했을 때 기존의 생산 능력으로만 생산할 것인지 아니면 새로운 장치를 추가해서 늘어난 수요를 생산하는지 그리고 어느 공장에서 얼마만한 양을 생산해서 어느 도매 창고로 수송할 것인지 결정하는 문제이다. 다지역 회분식 공장의 최적 개조 문제를 풀기 위해서 주어지는 값과 최적 개조 모델을 통해서 결정할 수 있는 공정 변수를 정리하면 다음과 같다.

주어지는 데이터

- 생산해야 하는 제품의 수
- 크기 인자(최종 제품 단위 생산을 위해 필요한 장치 크기)
- 각 장치에서의 각 제품의 처리 시간
- 단위 제품 판매 가격 및 수송비용
- 각 도매창고에서의 제품 수요
- 기존 공장의 배치, 장치 크기
- 새롭게 추가할 수 있는 장치의 최대 수 및 크기의 최대, 최소 범위

결정되는 변수

- 새로운 공장 배치, 즉 새로운 장치의 위치 및 크기
- 새로운 제약 일회 생산량(limiting batch size), 회분의 수(number of batches) 및 제약 일회 회전 시간(limiting cycle time)
- 각 공장의 제품 생산량 할당, 즉 어떤 제품이 어느 공장에서 얼마만큼 생산되는냐에 대한 결정
- 각 공장에서 각 도매 창고로의 수송량 결정

2.2.2. 온구조(superstructure)

여기서는 다지역 회분식 공장의 최적 개조 모델을 위한 유등이 제안한 온구조를 이용하고 있다[7]. 이 온구조에서는 지금까지의 연구에서 제한하였던 기존 장치간의 조업 방법에도 유동성을 두어 보다 좋은 개조 결과를 얻을 수 있었다. 동상(in-phase)조업은 장치가 추가되어서 제약 일회 생산량을 증가시키는 것이고 이상(in-sequence) 조업으로 추가되는 장치는 제약 회전 시간을 줄여서 생산성을 향상시키는 조업 형태이다. 동상으로 조업되는 장치들을 “그룹(group)”으로 정의하고 이상으로 조업되는 장치들은 각각 다른 그룹에 속해서 조업되어진다. 이러한 온구조에 대한 자세한 설명은 유 등[7]에 있다.

2.2.3. MINLP 모델

문제의 목적함수는 연간 순이익을 최대화하는 것이다. 연간 순이익은 최종 제품을 팔아서 나오는 이익에 새롭게 추가되는 장치의 투자비와 제품의 수송비를 뺀 것으로 정의한다. 제약 일회 생산량에 대한 제약 조건은 연속 변수와 이진 변수의 곱을 포함하고 있다. 효율적인 계산을 위해 다음과 같은 새로운 연속 변수와 제약 조건들을 도입함으로써 선형화한다. 여기에서 소개된 혼합 정수 비선형 모델은 Duran과 Grossmann[1]이 제안한 Outer-approximation(OA) 알고리즘으로 답을 구한다. OA 알고리즘을 적용하기 전에 전역(global) 최적해를 구하기 위해서 convex 형태로 문제를 바꾸어야 한다. 여기서는 Vaselenak 등[8]이 제안한 아래의 새로운 변수들을 이용한 지수 치환법으로 nonconvex 형태를 convex 형태로 변환한다.

결과적으로, 다음과 같은 혼합 정수 비선형 모델로 정리된다. 목적함수의 첫번째 항에서의 음수 부호를 가진 지수 함수로 인한 nonconvexity는 Vaselenak 등[8]이 제안한 piecewise linear approximation 방법에 의해서 해결된다.

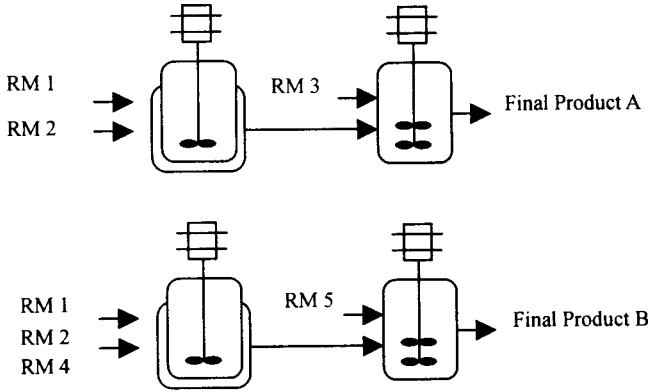
2.2.4. 적용 예제

본 절에서는 앞에서 제안한 혼합 정수 비선형 모델의 효용성을 증명하기 위해서 두개의 예제를 다룰 것이다. 첫번째 예제는 기존의 도매 창고들의 수요가 증가한 경우이고 두번째 예제는 공급해야할 새로운 도매 창고 발생했을 때 발생하는 개조 문제를 다룬다.

적용 예제 1

이 예제는 두개의 최종 제품을 생산하고 있는 두개의 공장을 가진 기업에서 전국에 산재해 있는 여섯 군데의 도매 창고에 제품을 공급하는 기존의 생산 체제에서 각 도매 창고에서의 최대 가능 판매 수요가 증가할 경우에 대한 개조 문제이다. 두개의 공장은 두개의 생산 단계로 이루어져

있으며 각각 설립된 시기가 다르기 때문에 장치의 종류 및 공정 조건은 조금씩 틀리나 같은 제품들을 생산하고 있다. 표 2.6은 예제 1에 대한 데이터이며 그림 2.4는 예제 1에 대한 공장 구성도 및 각 제품의 제조 방법을 나타내고 있다.



<그림 2.4 Plant configuration and production recipe of plant I and II in example 1>

<표 2.6 Data for example 1>

(a) size factor

	Plant I		Plant II	
	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2
A	2.0	1.0	2.2	1.1
B	1.5	2.25	1.6	2.4

(b) processing times

	Plant I		Plant II	
	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2
A	4.0	6.0	4.2	6.5
B	5.0	3.0	5.4	4.0

(c) existing equipment sizes

	Plant I	Plant II
Stage 1	2000	2500
Stage 2	1500	2000

(d) new product demand at each warehouse

	A	B
1	237,000	108,000
2	304,000	117,000
3	164,000	112,000
4	342,000	132,000
5	196,000	109,000
6	165,000	124,000

(e) shipping cost

	1	2	3	4	5	6
I	0.05	0.03	0.04	0.06	0.08	0.1
II	0.09	0.08	0.06	0.05	0.03	0.04

(f) cost data

Cost coefficient, α_{ji}		
	Plant I	Plant II
1	35.24	34.90
2	30.50	29.80
Fixed cost, γ_{ji}		
	Plant I	Plant II
1	45,050	46,000
2	42,500	43,200
Net profit, \$/kg		
A	0.7	
B	0.8	

이 공장에서 생산되고 있는 두개의 제품은 전국에 산재한 여섯 개의 대형 도매 창고로 이송되는데 향후 소비 동향을 분석한 결과 각 도매창고에서의 최대 가능 판매 수요가 6.9 %에서 12.5 %까지 증가한다고 한다. 여기서 최적 개조 문제가 발생한다. 기존의 최대 생산 가능량으로 제품을 각 도매 창고에 공급할 것인지 아니면 새로운 장치를 추가하여서 증가된 수요만큼을 생산해서 공급하는 것이 이익인지를 판단해야 한다. 앞에서 제시한 혼합 정수 비선형 모델을 IBM RS/6000 워크스테이션에서 GAMS DICOPT+++를 이용하여 문제를 풀었다. 이 문제는 초기 수식화에서 불필요한 논리적인 제약조건 등을 제거함으로써 제약 조건이 101개 연속 변수가 81개 그리고 이산 변수가 20개인 문제로 단순화시켰으며 해답을 구하는데 16 sec가 걸렸다. 최적 개조는 표 2.7과 같이 공장 I의 두번째 생산 단계에 1000 l의 새로운 장치가 추가되고 제품 A 생산시에는 이상으로 제품 B 생산시에는 동상으로 조업되며 이때 기업이 얻는 연간 순이익은 $\$2.2223 \times 10^6$ 이다.

<표 2.7 Optimal retrofit design for example 1>

	Plant I		Plant II	
	Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2
A	-	1000 L(out-of-phase)	-	-
B	-	1000 L(in-phase)	-	-

적용 예제 2

예제 2는 세계의 최종 제품을 생산하고 있는 두개의 공장을 가진 기업에서 새롭게 공급해야 할 도매 창고가 생겼을 때 생기는 개조 문제를

다룬다. A, B, C 세개의 최종 제품을 네개의 생산 단계를 거쳐서 생산하고 있는 공장 I, II는 기존 여덟 곳의 도매 창고에 제품을 공급하기 위해서 생산 가동 중에 있다. 앞으로 공장 I, II에서 같은 거리에 있는 두 군데의 새로운 도매 창고에 제품을 공급할 계획을 세우고 있다. 여기서, 기존 생산 능력으로 가능한 최대량을 공급할 것인지, 새롭게 장치를 추가하여서 두 곳의 새로운 도매 창고의 최대 가능 수요에 맞게 제품을 공급할 것인지, 새롭게 장치를 추가할 경우 어느 공장의 어느 생산 단계에 새롭게 장치를 추가할 것인지, 그리고 새로운 최적 생산 및 분배량을 결정해야 하는 최적 개조 문제와 만나게 된다.

<표 2.8 Data for example 2>

(a) size factor

	Plant I				Plant II			
	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
A	2.3	3.2	4.3	3.1	2.1	3.1	4.2	3.1
B	2.4	3.7	3.9	3.0	2.3	3.6	3.7	3.0
C	3.3	4.1	2.8	3.0	3.2	4.1	2.6	3.0

(b) processing times

	Plant I				Plant II			
	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
A	8	3	4	2	7	3	4	3
B	8	3	4	3	7	3	4	3
C	3	4	2	4	3	4	2	4

(c) existing equipment sizes

	Plant I	Plant II
Stage 1	2500	2000
Stage 2	3000	2500
Stage 3	3000	2500
Stage 4	2500	2000

(d) new product demand at each warehouse

	A	B	C
1	88964	87436	48964
2	85964	85436	48787
3	88964	77436	47123
4	78964	87436	49102
5	79964	75436	48220
6	76964	82436	45660
7	78964	81436	47320
8	77964	76554	48235
9	58450	64440	37880
10	59550	62220	37770

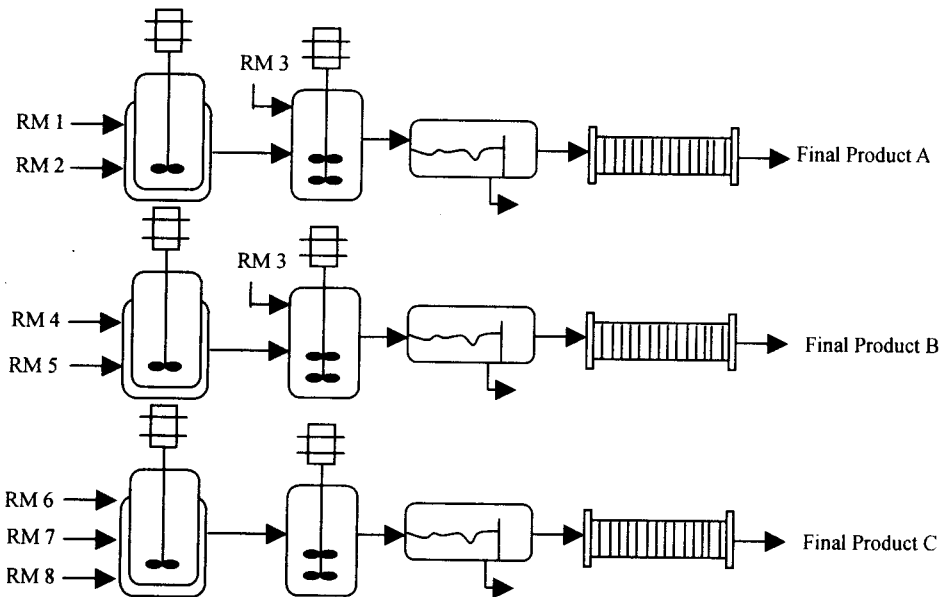
(e) shipping cost

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	0.010	0.011	0.012	0.012	0.014	0.016	0.019	0.020	0.016	0.017
II	0.020	0.019	0.010	0.015	0.012	0.011	0.010	0.010	0.016	0.017

(f) cost data

Cost coefficient, α_{ji}		
	Plant I	Plant II
Stage 1	32.54	32.24
Stage 2	34.20	34.00
Stage 3	35.24	35.14
Stage 4	30.20	30.00
Fixed cost, γ_{ji}		
	Plant I	Plant II
Stage 1	30560	30260
Stage 2	32750	32350
Stage 3	35250	35050
Stage 4	30200	30100
Net profit, \$/kg		
A		0.34
B		0.36
C		0.34

표 2.8은 예제 2에 대한 데이터를 나타내고 있으며 그림 2.5는 예제 2의 공장 구성 및 각 제품에 대한 제조 방법을 나타내고 있다.



<그림 2.5 Plant configuration and production recipe of plant I and II in example 2>

예제 2 또한 초기 수식화를 할 때 불필요한 논리 제약 조건 및 이진 변수

등을 제거함으로써 제약 조건이 260개, 연속 변수가 197개 그리고 이산 변수가 56개인 문제로 만들었으며 IBM RS6000 워크 스테이션에서 해답을 구하는 시간이 92 sec가 걸렸다. 최적해는 공장 I과 II의 첫번째 생산 단계에 1846, 1951 l의 장치를 새롭게 추가하는 것이고 기업이 얻는 연간 순이익은 \$ 492,670 이다. 표 2.9와 같이 공장 I의 첫번째 생산 단계에 추가된 새로운 장치는 제품 A, C의 생산시는 이상 조업으로 제품 B의 생산시는 동상으로 조업된다.

<표 2.9 Optimal retrofit design for example 2>

	Plant I				Plant II			
	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
A	S*, 1846 L	-	-	-	S, 1951 L	-	-	-
B	S, 1846 L	-	-	-	S, 1951 L	-	-	-
C	P**, 1846 L	-	-	-	S, 1951 L	-	-	-

*S means out-of-phase operation and **P

공장 II의 경우에는 첫번째 생산 단계에 추가된 새로운 장치는 모든 제품 A, B, C의 생산에 동상으로 조업된다.

참 고 문 헌

1. Duran, M. A. and Grossmann, I. E.: *Math. Prog.* **36**, 307(1986).
2. Fletcher, R., Hall, J. A. J. and Johns, W. R. Johns : *Comp. Chem. Engng.* **15**, 843(1991).
3. Grossmann, I. E. and Sargent, R. W. H. ; *Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.* **18**, 343(1979).
4. Lee, H., Lee, I., Yang, D. R. and Chang, K. S.; *HWAHAK KONGHAK*, **31**, 69(1993).
5. Lee, H., Lee, I., Yang, D. R. and Chang, K. S. ; *Ind. Engng Chem. Res.* **32**, 1087(1993).
6. Lee, H. and Lee, I., ; *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 476(1998).
7. Yoo, D. J. , Lee, H., Ryu, J, and Lee, I. ; *Comp. Chem. Engng.* **23**, 683(1999).
8. Vaselenak, J. A., Grossmann, I. E. and Westerberg, A. W. , ; *Ind. Engng Chem. Res.* **26**, 718(1987).

3. 회분식 조업에서의 무배관(Pipeless) 공정 기술

3.1 서론

원래 회분식 공정의 장점은 다양한 시장 수요를 유연 하게 대처할 수

있는 다품종 소량 생산 체계에 적합하다는 것이었으나, 수요가 점점 다양해지고 제품의 생산 수명이 단축되고 있기 때문에 보다 빠르게 다른 제품으로의 생산 전환이 가능한 공정이 필요로 하게 되었다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서 회분식 공장은 점점 복잡한 배관망을 가지게 되었고 이러한 배관망은 회분식 공정의 원래의 장점인 유연성을 감소시켰고 노동력 감소와 생산성 증대를 위해 회분식 공정에 적용된 컴퓨터 제어 기술을 보다 어렵게 만들고 있다. 이런 문제들의 해결책으로 90 년대에 들어와서 무배관 공정에 대한 관심은 여러 문헌에서 꾸준히 나타나고 있다. 이러한 관심은 설계와 스케줄링 분야[1,4,6,8]와 제어와 장치 기술[2,3,7,9] 에 대한 분야로 나눌 수 있는데 이러한 연구들의 효시는 일본이었고 뒤이어 미국과 영국이 무배관 공정에 관심을 가지고 연구에 참여하고 있다.

무배관 공정의 가장 큰 특징은 물질이 배관을 통해서 한 장치에서 다른 장치로 이동하는 것이 아니라 일회 생산량(batch)을 담은 용기(vessel)를 자동조정 이동 시스템을 이용하여 다음 생산 단계로 이동시킨다는 것이다. 이러한 개념은 일회 생산량을 담은 용기를 기차로 생각하고 각각의 생산 단계의 처리가 가능한 곳을 역(station)이라고 생각하면 훨씬 쉽게 이해된다. 이러한 공정에서 연구되는 분야는 예비 설계의 단계로서 이러한 공정의 설계와 스케줄링 문제가 있겠고 이동 가능한 용기를 다음 생산 단계로 정확하게 움직이는 위치제어 기술과 다음 단계의 생산이 가능한 역(station)과 이동되어온 용기를 배관이나 밸브 등으로 연결하여 다음 작업을 받게 하는 요소(element)기술에 관한 것이 있다.

정밀 약품이나 페인트, 안료와 같이 색이 다른 제품의 생산 그리고 식품 공업 등에서는 반응이 끝난 장치와 장치간의 배관의 세척은 생산품의 질을 좌우하는 중요한 인자이다. 무배관 공정은 기존의 일반적인 회분식 공정에서 세척에 사용하는 시간을 아낄 수 있어 생산성을 높일 수 있고 배관이 완전하게 씻기지 않음으로 생기는 반응 물질의 오염 등을 막아 제품의 질을 높인다. 그리고 똑같은 생산량을 생산할 때 기존의 회분식 공장에 비해 장치의 수를 줄일 수 있고 이에 수반하여 장치에 부착되는 각종 제어기나 세척에 쓰이는 설비에서 투자 비를 줄일 수 있다.

또한 무배관 공정은 회분식 공정의 단점이라고 지적 받는 노동 집약을 극복할 수 있는 자동화의 토대를 제시한다. 회분식 공정의 세가지 부류와 연속식 공정을 제품, 생산 그리고 장치와 설비간의 특징을 요약해 보면 표 3.1 과 같다. 표 3.1 에서 무배관 공정에 대한 분석을 보면 무배관 공정은 회분식 공정과 연속식 공정의 장점을 모두 갖춘 공정이라는 결론을 내릴 수 있다. 앞으로 가까운 미래에 회분식 공장이 CIM(Computer Integrated Manufacturing)이나 FA(Factory Automation)로 나아간다고 볼 때 회분식 공정의 무배관화는 그 전제 조건이 될 것이다. 이와 같이 회분식 공정의

무배관화는 생산성의 향상과 더불어 노동력 감소를 도모할 수 있다.

<표 3.1 화학공정의 비교>

	Batch Process			Continuous
	Manual	Computerized	Pipeless	
Product				
Number	Middle	Large	As required	Small
Composition	As required	As required	As required	Same Type
Life Cycle	Can be short	Can be short	Can be short	Must be long
Contamination	Less	Less	Less	Large
Order in unit operation	Somewhat fixed	Somewhat fixed	As required	Fixed
Production				
Labor production efficiency	Not so good	Somewhat good	Somewhat good	Good
Productivity	Not so good	Good	Good	Good
Equipment-Facility				
Equipment capability	Can respond to varied operation	Can respond to varied operation	Can respond to varied operation	Constant
Connection between units	Somewhat fixed	Somewhat fixed	As required	Fixed

그 대표적인 예로 일본의 어느 공업용 접착제 생산 공장에서는 무배관 공정으로의 전환을 통해 50%의 노동력 감소와 200%의 생산량 증대를 이룰 수 있었다⁷⁾.

3.2. 무배관 공정

무배관 공정의 개략적인 설명은 서론을 통해 살펴 보았다. 따라서 본 절에서는 구체적으로 그 공정의 구조와 기존의 공정에 대한 장단점을 살펴 보고자 한다. 우선 무배관 공정이란 화학 공정 중에서도 회분식 공정에 국한되어 적용되어지고 있는 새로운 생산 공정의 형태이다. 회분식 화학 공정은 각 회분에서의 조업시작 및 조업완료 시간대 개념으로 조업을 조작 및 조절하고 있기 때문에 연속적 흐름이 아닌 회분량 단속 흐름의 조업 특성을 가지며 그렇기 때문에 연속 흐름의 특성을 갖는 배관 및 펌프를 제거하여도 조업 특성을 구현할 수 있다. 여기에 무배관 공정이 도입된 가장 큰 이유는 이들 배관 및 펌프가 회분식 단속 조업에 적용되어 조업되기에 많은 불합리한 점을 갖고 있기 때문이라 보여진다. 즉 회분 및 회분간의 물질 수송의 효율성, 안정성, 수송시간의 균일성 등과 수송후 세척의 용이성, 세척으로 발생하는 폐기 물질 등의 측면에서 배관 및 펌프는 재고되어지기 시작하였다.

무배관 공정은 이와같이 회분 및 회분간의 물질 수송을 기존의 회분식 공정에서 배관 및 펌프로 조업하던 것을 AGV(Automated Guided vehicles) 혹은 MV(Mobile vessel) 장치에 의해 조업되는 것이 서로 다른 점이다. 즉 무배관 공정이라고 하여 화학공장에서 배관이 완전히 제거되는

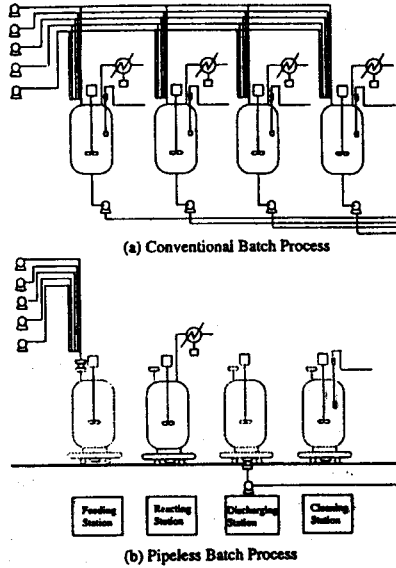
것이 아니라 회분과 회분 사이의 물질 수송이외 각 역에서의 원료, 부원료, 세척제 등의 장치 내 투입은 역시 배관이 존재하며 이들 배관들은 각 역의 특성에 맞게 특수한 설계로 이루어지며 주로 흐름량의 제어 설비에 의해 흐름량을 제어하게 된다. 지금까지의 일반적인 회분식 공정에서는 다품종 소량생산을 달성하기 위해서 반응기에 여러 가지 제품의 원료가 들어가는 배관, 첨가제(additives)가 들어가는 배관, 그리고 세척에 필요한 배관 등 각각의 반응기에 중복적으로 설비되어 여러 가지 배관이 복잡하게 얽혀 있었다. 이러한 복잡성으로 말미암아 제어신호의 입출력이나 관리가 힘들어 조작상의 에러의 원인이 되기도 했다. 그러나 무배관 공정은 각 처리 역의 특성화로 최소한의 배관 설계가 가능하여 이런 복잡한 배관망을 피할 수 있고 장치간의 간격을 짧게 하여 이동 속도를 빠르게 할 수 있어 토지 이용율을 높일 수 있다.

기존의 회분식 공정은 물질의 흐름이 배관 라인에 의해 정해진다. 제품의 생산 순서가 설비에 의해 주어지기 때문에 보다 다양한 제품의 생산에 많은 제약이 따르게 된다. 비록 다품종 생산을 표방하고 있지만 이는 첨가제가 다소 다르거나, 제품의 포장 단위가 다른 동형 다품종 생산에 국한될 수밖에 없다. 그러나 무배관 공정은 물질의 이송 순서가 공장 설비에 의해 정해져 있지 않고 그 흐름 순서가 매우 유동적(flexible)일 수 있으므로 비슷한 설비에서 생산되는 제품이지만 생산 순서가 달라, 그 원료, 첨가제가 달라 성상이 전혀 다른 이형 다품종 생산이 가능하게 되었고, 그러므로 보다 다양한 종류의 진정한 의미의 다품종 소량 생산이 가능하게 되었다.

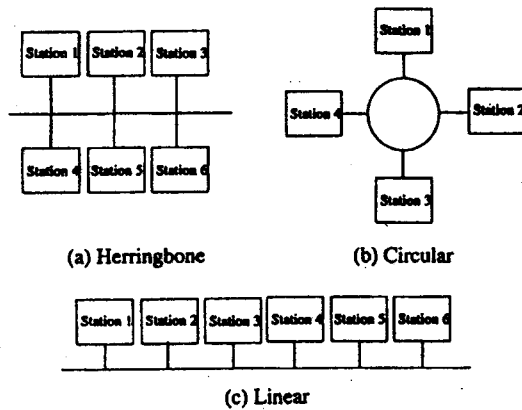
향후 회분식 화학 공정도 자동화 공정으로의 전환을 목전에 두고 있는 실정이다. 그러나 기존의 회분식 화학 공정도 각 단위 회분에서의 원료 도입 및 조업 시간, 그리고 물질 수송의 시간의 변이가 매우 가변적이고, 그 조업 시간의 변화폭이 크므로 생산 계획 및 조업자동화에 커다란 난점을 던져주고 있다. 이러한 문제점 역시 무배관 공정은 상당히 완화 내지 극복할 수 있기 때문에, 회분식 조업의 자동화를 잘 이루기 위해서는 반드시 무배관 공정이 도입되어야 할 것이다.

기존의 회분식 공정과 이런 공정을 무배관 공정으로 만들었을 때의 차이를 그림 3.1 을 통해 살펴보면 그림상으로도 공정이 훨씬 단순함을 눈으로 알 수 있다. 무배관 공정은 자동화된 안내 차량 (AGV, Automated Guided vehicle)이 레일 위를 움직이며 그 위에 일회 생산량을 담은 용기를 실어서 다음 생산단계가 가능한 역으로 이동한다. AGV 는 제품의 생산에 필요한 설비가 되어 있는 역(station)으로 가서 일정시간 동안 반응물을 거치고 배출역(discharging station)에서 최종제품이 배출되고 빈 용기는 세척되어 다시 원료공급역(feeding station)으로 가게 된다. 그러므로 장치와 장치사이의 배관이나 원료 저장 탱크가 필요없게 된다. 레일과 역을

배치하는 방법은 크게 그림 3.2 의 세 가지가 일반적이다. 레일의 배치와 역의 위치는 스케줄링 문제와 맞물려서 공정의 예비설계에 중요한 결정 사항이다. 그림 3.2 의 (c)와 같은 선형 배치는 스케줄링은 쉽지만 (a)와 (b)에 비해 생산 시간이 조금 길어진다. (a)와 (b)는 생산 스케줄링은 복잡하지만 생산성의 측면에서 바람직한 구조이다.



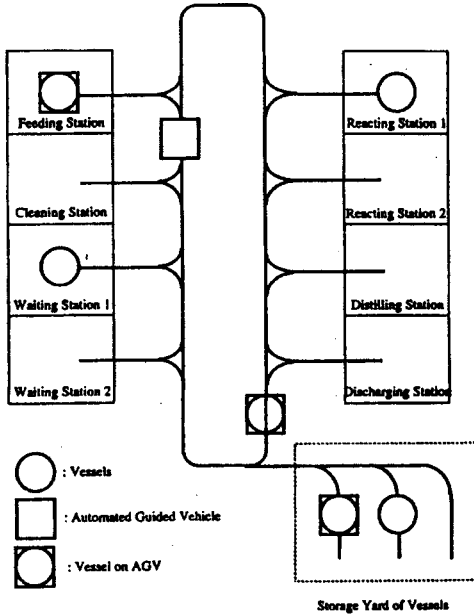
<그림 3.1 Comparison conventional batch process with pipeless batch process>



<그림 3.2 Examples of pipeless batch process layouts>

그림 3.3 은 한 개의 공급역과 두 개의 반응역(reacting station), 한 개의 증류역(distilling station), 배출역, 그리고 두 개의 대기역(waiting station)과 용기의 저장소(storage yard)를 가진 일반적인 원형 배치의 무배관 공장이다.

이 공장은 여덟 개의 역과 여섯 개의 용기 그리고 세개의 AGV 를 가지고 있다. 용기를 이동시키는 방법으로는 용기에는 동력이 없어 AG 로 이동시키는 방법과 용기 자체에 이동 가능한 동력이 있는 것이 있다.



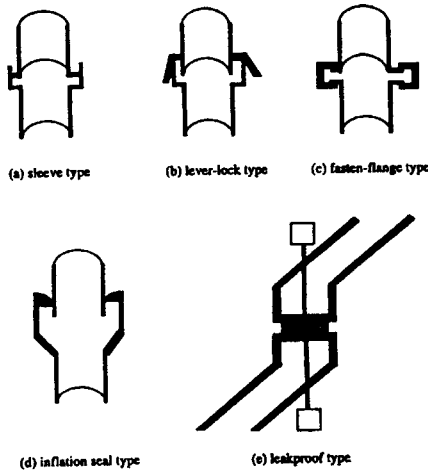
<그림 3.3 Typical layout of circular pipeless batch process>

3.3 요소(element)기술

공정의 개요가 확정되고 공장의 건설에 있어 가장 중요한 공정 기술은 요소(element) 기술이다. 용기가 AGV 에 의해 원하는 역으로 왔을 때 용기와 역의 고정된 기계 설비를 연결시켜 주는 것은 제품의 질에 영향을 줄 정도로 중요하다. 이와 같이 용기를 각 역에서 고정된 장치에 연결시키기 위해서는 자동 배관 연결자 (automatic pipe connector)가 필요하다.

그림 3.4 는 여러 종류의 배관 연결 방법을 보여주고 있다. 가연성의 화학 제품을 다루는 공정에서는 그림 3.4 의 (e)와 같은 연결이 필요하다. 반응기 자켓에 대한 스팀 연결은 (b)와 같은 종류가 좋으며 (d)와 같은 연결은 분말을 다루는 공정에 적합하고 (c)는 고압의 가스에 적합하며 (a)는 조그마한 양이 새어도 관계없는 물이나 공기를 다루는 공정의 연결에 적합하다. 각각의 요소를 연결해 주는 요소 기술의 발전 여부는 무배관 공정의 전망을 좌지 우지할 수 있다. 이러한 요소 기술은 무배관 공정에서 제어와 장치 기술에 있어 밑바탕이 된다. 제어와 장치 기술 측면에서 볼

때 다음 여섯 가지 내용의 실현은 공정의 안전 운전에 있어 필수적이다.



<그림 3.4 Various types of pipe connectors>

- 용기의 수송

바라는 역에 용기를 수송하는 방법은 on-track 과 off-track 의 두가지가 있다. Off-track 은 전체적으로 시스템의 유동성 관점에서 더 유리하며 on-track 용기는 선형(linear) 혹은 원형(circular) 트랙 위를 움직인다. 선형 트랙은 각 역에서 위치 제어가 용이하지만 자유로운 배치나 시스템 확장에 제한이 있다. 그러므로, 수송 방법은 공장에서 생산하려는 제품의 특성이나 생산량에 따라 결정되어진다.

- 용기의 위치제어(positioning control)

용기가 역으로 이동될 때 용기가 고정되기 전에 정확하게 위치에 놓여져야 한다. 위치제어는 배관과 동력 연결에 있어 필수 불가결한 요소 기술이다.

- 배관 연결

각 역은 원료 물질과 유틸리티의 투입 그리고 완제품의 반출을 위해서 이동하는 용기와 고정된 설비 사이에 배관 연결을 위한 장치를 가져야 한다. 배관 안에 흐르는 유체의 압력, 온도, 그리고 부식성 여부등에 의해 다양한 재질과 내부 구조를 가진 배관이 필요하다.

- 전력 연결

교반기(agitator)와 여러 계측 장치 등의 동력을 위해서 전력을 공급하는 방법은 이동하는 용기에 배터리를 설치하는 것과 동력 연결 장치를 통해 외부에서 전원을 공급하는 방법의 두 가지가 있다.

- 제어 신호 전송

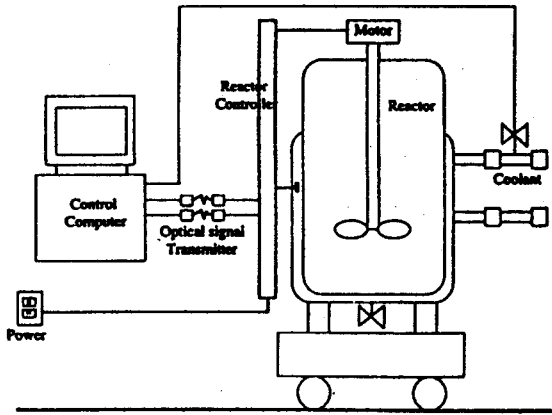
레벨, 압력 그리고 온도를 측정하기 위한 센서가 각각의 용기나 역에 있는데 이러한 센서의 출력은 외부 컴퓨터 시스템과 고도의 안전성을

가지고 연결되어져야 한다. 이러한 제어 신호의 전송을 위해서 optical serial transmission 이나 wireless transmission 등이 쓰인다.

- 공정 관리 (management) 시스템

전체 공정의 관리를 위한 시스템은 미래에 적용될 공장 CIM 계획과 일치가 되어야 한다. 제어가 전체 공정에 걸쳐 분산되어져 있기 때문에 DCS(distributed control system)가 적용되어져야 한다.

그림 3.5 는 무배관 공정에서 반응기를 제어하는 시스템의 개략도를 보여 주고 있다. 전체 공정을 관리하는 컴퓨터는 워크스테이션이고 이것과 연결된 제어 시스템에서 반응기의 냉각수 양이나 모터의 회전 동력을 제어하게 된다. 여기서 제어 신호를 제어 시스템과 반응기와 연결하는 것과 전원의 연결 등이 중요한 기술이 된다.



<그림 3.5 Example of pipeless batch process control system>

3.4 적용사례

무배관 공정의 실제 산업 적용 사례는 일본에 국한 되어 있다. 아마도 값비싸고 좁은 땅에서 생산 활동을 영위해야 하는 일본이기에 보다 토지의 효율적 사용의 측면에서 본 연구의 발상이나 연구 진척도가 가장 빠를 수 있었다고 보여진다. 일본에는 현재 약 10 여개의 무배관 공장이 실제 조업에서 운용되고 있고 그 적용된 산업은 Mitsui Toatsu 화학 회사의 접착제 제조 공정 (1991 년 설립)을 비롯하여 윤활유 공정, 식품 공정, 페인트 및 잉크 공정이 있고 현재 고분자 필름 공정을 위한 연구가 매우 적극적으로 진행되고 있다. 그들 중 몇 가지를 소개하고자 한다.

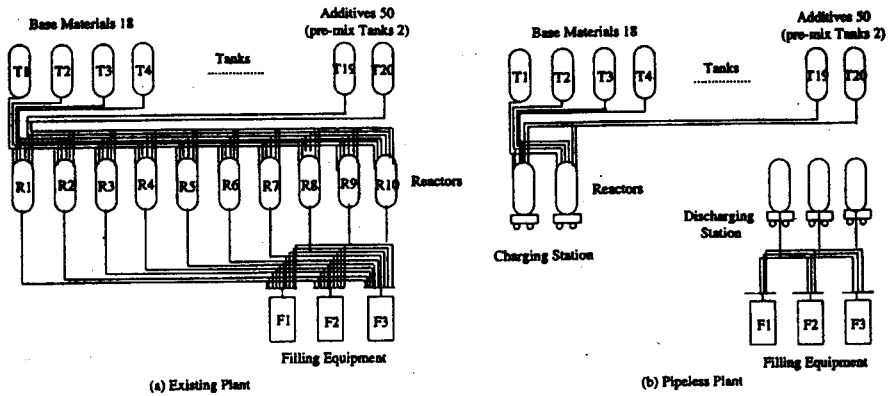
3.4.1 접착제 제조 공정[7]

일본 Chiba 현에 위치한 Mitsui Toatsu Chemical Inc. 는 최초의 무배관

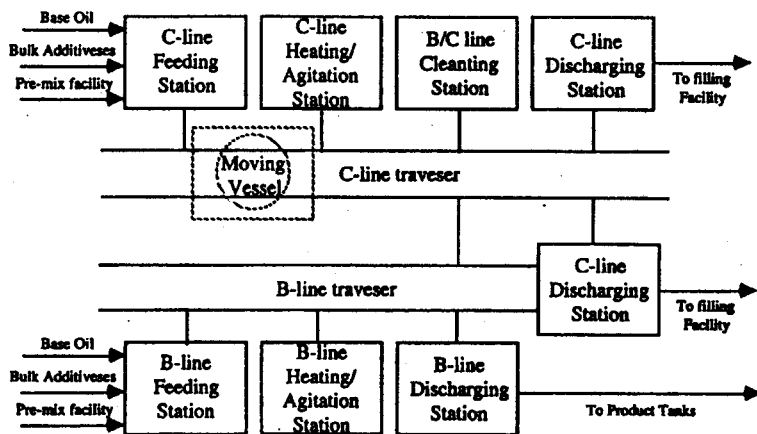
공장을 1991년 6월에 설립되어 약 100여종의 각종 접착제를 연간 5000톤의 규모로 생산하고 있다. 이들이 운영하는 최초의 무배관 공정의 하드웨어 및 소프트웨어를 Milox라고 명명하고 있으며 이것이 무배관 공정의 표본으로 사용되고 있다. 이 회사는 기존의 회분식 공정의 공장도 보유하고 있는데, 약 50%의 노동 절감과 약 200%의 생산성 증가를 기록하고 있다. 공정은 길이 25m, 넓이 15m의 3개의 역을 갖는 생산 라인을 나란히 2개 갖고 있는 공장으로 전 공정이 컴퓨터 중앙 제어 방식에 의해 운전되어 지고 있다. 하루 1회 아침에 1일 조업생산계획에 대해 안전성 검토를 한 후 생산계획 수정 혹은 수용 명령을 컴퓨터에 내린 후 조업을 개시하고, 모든 역(station)에서의 각 제품이 조업되는 시간을 컴퓨터가 조절 및 제어한다.

3.4.2 윤활유 공정[2]

자동차나 기계 장치 등에 쓰이는 윤활유의 종류와 등급은 엄청나게 많다. 이런 많은 종류의 윤활유를 생산할 때 생산 현장에서는 고도의 품질 제어(quality control)를 필요로 한다. 윤활유 공정은 수십 가지의 원료 물질과 첨가물을 반응기에 넣고 가열과 혼합을 통해서 최종 제품을 만들어 낸다. 공정 그 자체는 간단하지만 원료 물질이나 제품의 수가 많으므로 배관의 연결이 아주 복잡하고 제어 신호의 전달이나 입출력이 어렵다.



<그림 3.6 기존 윤활유 제조 공정과 무배관 윤활유 제조 공정의 차이>



<그림 3.7 Pipeless lubricant oil manufacturing process>

그림 3.6 의 (a)는 20 개의 원료 물질과 첨가제를 가지고 이백 종류의 윤활유를 생산하는 공정이다. 그림으로 봐도 배관의 연결은 아주 복잡함을 알 수 있다. 그림 3.6 의 (b)는 기존의 공정을 무배관화 시킨 대략적인 공정도이다. 이 공정도를 역과 철도의 개념으로 설명한 것이 그림 3.7 이다. B 와 C 의 두 개의 생산라인을 가지고 있고 전체적으로 두개의 유입(feeding)역, 두개의 가열/교반 역, 한 개의 세척역 그리고 세군데의 배출(discharging)역으로 구성되어 있다. 세척역은 B 와 C, 두 생산 라인에서 공통으로 사용하고 있다.

여기서 기존의 공정과 무배관 공정과의 차이점을 좀더 자세히 살펴보면 표 3.2 에 기존의 공정과 무배관화된 공정을 반응기의 수, 필요한 장치이 수, 자동밸브의 수 그리고 각 경우에서의 투자비 증가 요인을 보여 주고 있다.

<표 3.2 투자비 비교>

	Existing process	Pipeless process
No. of reactors	10	6
	Charging equipment:10	Charging station:2
	Heat & Cool equipment:10	Heat & Cool station:2
	Discharging equipment:10	Discharging station:3
	Spray nozzles:10	Cleaning station:1
No. of automatic valves	Charging:230	Charging:61
	Discharging:50	Discharging:16
	Total:280	Total:77
Increased factors	4 Reactors	AGV cost
	203 Automatic valves	Station cost
	203 Signal software cost	Equipment of optical
	Piping cost	Signal cost

기존의 공정은 네 개의 반응기와 이백 세 개의 자동 밸브, 똑 같은 수의

제어 신호 비용과 배관 비용이 무배관 공정보다 더 많이 든다. 이에 반해서 무배관 공정은 여러 장치와 배관 비용은 줄일 수 있지만, AGV 와 역의 설치 비용, 역과 제어기간의 광학 신호(optical signal)장치 비용이 더 추가된다.

3.4.3 식품 제조 공정[2]

식품 제조 공정의 대부분은 회분식 공정이다. 소비자의 취향이나 제품의 다양성에 대한 요구를 만족시키기 위해서 생산하는 제품의 수명이 다른 어느 분야보다 짧다. 이러한 식품 공업은 다른 어느 공정보다 각 장치에서의 세척이 중요하고 중간 제품의 오염 방지가 필수적이다. 그러므로 각 장치사이의 배관 세척이 필요없고 반응기 세척이 용이한 무배관 공정이 적용되고 있다.

3.5 앞으로의 전망

현대 사회와 같이 수요의 폭이 다양한 제품의 수명이 짧은 시대에서는 다품종 소량 생산이 적합하다. 그러나 기존의 회분식 공정은 제품의 전환(transition) 시간이 길고 제품의 생산방법(recipe)이 변화하였을 때 적응력이 높지 못하다. 점점 CIM, FA 그리고 FMS(Flexible Manufacturing System)를 요구하는 회분식 공정의 요구는 무배관 공정을 낳게 되었다. 그러나 이러한 무배관 공정도 생산성이 높고 노동력을 절감시킬 수 있는 반면에 그 제반 기술이 아직 일반화되지 않아 투자비가 비싸다는 단점이 있다. 이러한 문제는 다양한 공장의 설계와 요소기술의 발전으로 해결될 수 있다고 본다. 무배관 공장은 수 개의 실제 공정이 일본에서 조업되고 있으나 아직 그 기술이 전반적으로 시작 단계에 있어 많은 문제점을 안고 있다. 현재까지 각종 화학 공학의 단위 조작 (unit operation) 기술이 모두 무배관 공정에 응용되어 지는 것은 아니고, 또한 무배관 공정에서 안전하게 조업되는 온도와 압력의 범위도 약 150°C, 5kg/cm² 의 수준에 놓여 있다. 현재까지 무배관 공정에 응용되어 지고 있는 단위 조작 즉 moving vessel 에서 이루어지는 단위 조작은 측정 및 투입, 반응, 열전달, 증류 및 stripping, extraction 및 분리, 샘플링 및 분석, 세척 정도에 지나지 않으며, 여과, 건조, packing 등은 이루어지지 못하고 있다. 표 3.3 에 무배관 공정에서 규격화되어진 단위 조작 및 그렇지 못한 단위 조작에 대한 내용을 나타내고 있다.

<표 3.3 Units of batch operation>

Unit operation	Necessary equipment	Process standardization
Material feed	Reactor vessel, feed vessel and material vessel	0
Temperature control	Reactor vessel, coolant and heating media	0
Reaction	Reactor vessel	0
Distillation	Reactor vessel, heat exchanger	0
Steam stripping	Reactor vessel, heat exchanger, vessel	0
Stationary separating	Reactor vessel, storage vessel	0
Extracting	Reactor vessel, storage vessel	0
Sampling	Reactor vessel, sampling facility	0
Discharging	Vessel	0
Washing	Washing facility	0
Filtration	Reactor vessel, filter	×
Drying	Dryer	×
Pelletizing	Vessel, pelletizer	×
Packing	Packing facility	×

그러므로 아직 많은 부분이 연구되어야 할 것이고, 모든 회분식 화학 공정을 무배관화하기에는 아직 그 기술이 초보적이다. 뿐만 아니라 무배관 형태의 공정 설비에서의 설계나 자동화를 위한 조업 최적화의 연구도 시작 단계에 놓여 있어 회분식 공정의 무배관화에 대한 연구와 기술 개발이 필요하다.

참고 문헌

1. 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).
2. Niwa, T.: "Transferable Vessel-type Multi-purpose Batch Processes", *Proc. Fourth Intl. Symp. on Proc. Systems Engng.*, Montebello, Canada (1991).
3. Niwa, T.: "Evaluation of pipeless process and recipe-based operation" , *Proc. 5th Intl. Symp. on Proc. Systems Engng.*, Kyungju, Korea, 497-502(1994).
4. Pantelides, C. C., Realff, M. J. and Shah, N. : Paper presented at AIChE Annual Meeting, Miami Beach, USA(1992).
5. Lee, H., Jung, J. H. and Lee, I.: "Pipeless process technology of batch operations", *Chemical Industry and Technology*, 13, No.3, 272-282(1995).
6. Realff, 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).
7. Shimatami K. and Okuda, K.: "Pipeless batch chemical plants offer a new approach" , *Chem. Engng.*, 99, 181(1992).
8. Yoo, D. J., Lee, H., Jung, J. H., and Lee, I. : "Optimal design of pipeless

- processes with scheduling", *HWAHAK KONGHAK*, 34, 742(1996).
9. Zanetti, R.: "The 'Pipeless' Batch Plant", *Chem. Engng.*, June(1992).