

다품종 회분식 공정에 대한 경험 법칙을 이용한 제품 생산 계획의 최적화

김경숙[†] · 조영상* · 이현구

서울대학교 화학공학과

*한국과학기술연구원, 화공연구부

(1993년 3월 24일 접수, 1994년 3월 2일 채택)

Near Optimal Production Sequencing for Multiproduct Batch Processes with Heuristics

Kyeong-Sook Kim[†], Young-Sang Cho* and Hyun-Ku Rhee

Department of Chemical Engineering, Seoul National University

**Division of Chemical Process, Korea Institute of Science & Technology*

(Received 24 March 1993; accepted 2 March 1994)

요 약

다품종 회분식 공정의 생산성과 효율에 매우 중요한 포괄적인 최적 생산 계획 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 다단위 공정으로 이루어진 다품종 공정의 최적 생산 계획을 구하는 방법으로 새로운 Johnson 알고리즘과 종래의 RA(Rapid Access) 알고리즘의 원리를 병용하여 제안되었다. 또한 다목적 공정의 특징을 가진 특수한 다품종 공정의 생산 계획 방법을 제시하였다. 제안한 알고리즘들을 다양한 예제에 적용한 결과 최적 생산 계획에 근접한 생산 계획을 효율적으로 찾아낼 수 있음이 확인되었다.

Abstract—The determination of a production sequence is an important problem in a batch process operation. In this paper, newly modified algorithms for a near optimal production sequence of N products in a M unit serial batch process are proposed. The basic principles are taken from the extended Johnson's algorithm and the RA algorithm. Test results on a number of selected examples exhibit the superiority of the newly modified algorithm.

1. 서 론

종래의 화학 공업 산업이 고부가 가치의 정밀 화학 제품을 생산하는 체계로의 전환을 시도하고 있는 추세와 더불어 회분식 공정에 대한 관심도 점차로 고조되고 있다. 회분식 공정은 공정 및 운전상의 유연성을 고루 갖추고 있어 다양한 원료와 수요를 충족시킬 수 있으며 시장 동향에도 신속히 대응할 수 있다. 본 연구에서는

다목적 공정의 특성을 가진 특수한 다품종 회분식 공정의 최적 생산 계획 방법 및 기존의 경험 법칙을 토대로 개발된 생산 계획의 최적성을 증진할 수 있는 다양한 생산 계획 알고리즘을 제안하고자 한다.

생산할 제품들을 이들이 거쳐야 할 장치들과 적절히 조합하여 제품의 생산 순서를 계획함으로써 정해진 제품을 최단 시간에 생산하는 것이 회분식 공정의 최적화이다. 따라서 회분식 공정 최적화의 목적 함수로 일

반적으로 “makespan”이라 정의된 모든 제품을 생산하는데 소요되는 총 시간을 채택하였다. 제품의 생산 순서가 결정되면 공정 조업상의 상세한 일정 계획을 결정하여야 하는데 Ku와 Karimi[1], Rajagopalan 등[2]이 다양한 중간 탱크 저장 방침을 고려하여 총 공정 처리 시간을 계산하는 식을 유도한 바 있다.

경험 법칙을 이용한 제품의 생산 계획 방법에는 두 단위 공정계의 최적해를 찾는 고전적인 Johnson 알고리즘과 이를 다단위 공정에 적용할 수 있도록 개선하여 Dannenbring[3]이 제안한 RAES(Rapid Access Extensive Search) 알고리즘이 있으며 김과 조[4]가 Johnson 알고리즘의 원리를 개선하여 제안한 다단위 공정의 최적해를 찾는 알고리즘 등이 있다. Kuriyan 등[5]은 기존의 경험 법칙을 이용한 다품종 공정의 생산 계획 방법을 고찰하여 비교하였다. 최근에는 제품의 생산 순서와 상세 일정의 최적해를 컴퓨터의 계산 능력을 이용한 수학적 방법으로 구하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Ku 등[6]과 Yeh 등[7]이 MILP(Mixed Integer Linear Programming) 기법을 이용한 방법을 제안하였으며 Malone[8]과 Das 등[9]이 시뮬레이티드 아닐링(simulated annealing) 기법을 이용하여 다품종 공정의 최적해를 구하는 방법을 제안하였다.

회분식 공정의 생산 계획 문제는 첫째, 전체 공정완료 시간에 상당한 영향을 미치는 생산하고자 하는 제품의 생산순서를 결정하는 전체 생산 계획(sequencing)과 둘째, 주어진 제품들의 생산순서가 결정된 후 각 단위 공정간의 저장 방침을 고려하여 총 공정 처리 시간을 최소화하는 상세 일정계획(scheduling)으로 구성된다.

경험 법칙을 이용한 회분식 공정의 생산 계획 문제의 해법은 제품과 단위 공정의 수에 제한을 받지 않고 일정 범위내의 최적해를 찾을 수 있어 최근에도 널리 이용되고 있다. 일반적인 전체 생산 계획 문제에 사용되는 경험적 알고리즘들은 다음의 네 범주로 나눌 수 있다.

- (1) dispatching rule
- (2) bottleneck sequencing
- (3) local search sequencing
- (4) best-fit sequencing

위의 방법들중 RAES와 같이 dispatching rule과 local search 방식을 병용한 방법이 가장 효율이 높은 것으로 보고된 바 있다[5]. 널리 사용되는 경험적 알고리즘들의 공통된 특징은 두 개의 단위공정에 대한 최적 생산 계획을 찾아내는 Johnson 알고리즘을 이용한다는 것이다. 따라서 RA나 확장된 Johnson 알고리즘과 같은 가상의 두 단위 공정계를 구성하는 방법이 해의 최적성에 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 본 연구는 최초의 최적해를 찾기 위한 방법으로 RA 방법과 확장된 John-

son 알고리즘의 원리를 응용하여 보다 제품 생산 계획의 최적성을 증진할 수 있는 가상의 두 단위 공정계를 구성하는 다양한 경험적 방법을 제안하고자 한다.

2. 개선된 알고리즘

본 방법은 김과 조[4]에서 제안한 확장된 Johnson의 알고리즘과 RA(Rapid Access) 알고리즘의 특성을 병용함으로써 최적해 접근 정도를 더욱 향상시키기 위하여 제안된 방법이다. 확장된 Johnson 알고리즘과 RA 알고리즘의 가장 큰 특징은 가상의 두 단위 공정계를 정의할 때 가중치 값의 사용 여부와 첫번째 단위 공정과 마지막 단위 공정의 고려 여부에 있으며 이를 토대로 각 방법의 특징을 병용하여 다음과 같은 다양한 알고리즘을 제안할 수 있다. 다음의 제안된 알고리즘들을 이용하여 구성된 가상의 두 단위 공정 문제들은 Johnson 알고리즘을 이용하여 최초의 생산 계획을 구할 수 있다.

2-1. New heuristic 1(NH 1)

본 방법은 모든 공정 관련 시간에 새로운 Johnson 알고리즘과 RA 알고리즘의 원리를 적용한 것이다. 즉 제품이 N개, 단위 공정이 M개인 생산 계획 문제에 대하여 다음의 인공적인 처리 시간 계산식을 이용하여 가상의 2단위 공정계로 변환하여 준다. 이 때 확장된 Johnson 알고리즘의 원리에 의하여 가상의 첫 단위 공정 시간에서는 마지막 공정에서 머무는 시간을 고려하지 않으며 또한 가상의 둘째 공정 시간에서는 첫 공정에 머무는 시간을 고려하지 않는다.

$$a_j = \sum_{i=1}^{m-1} [(t_{ij} + tr_{ij} + tr_{(i+1)j} + ts_{ij}) * (m-i)] \quad (1)$$

$$b_j = \sum_{i=2}^m [(t_{ij} + tr_{ij} + tr_{(i+1)j} + ts_{ij}) * (i-1)] \quad (2)$$

여기서 t_{ij} , tr_{ij} , ts_{ij} 는 각각 제품 j가 단위 공정 i에서 처리되는 시간, i로 전달되는 시간 및 단위 공정 i가 제품 j를 맞기 위한 준비 시간을 나타낸다.

2-2. New heuristic 2(NH 2)

본 방법은 실제 공정 시간에만 가중치를 주고 전달 시간을 별도로 고려하여 가상의 두 단위 공정 시간계를 구성하는 방법으로 식은 다음과 같다.

$$a_j = \sum_{i=1}^{m-1} [(t_{ij} * (m-i) + tr_{ij})] \quad (3)$$

$$b_j = \sum_{i=2}^m [(t_{ij} * (i-1) + tr_{(i+1)j})] \quad (4)$$

2-3. New heuristic 3(NH 3)

본 방법은 제품 처리 시간에만 가중치를 주어 확장된 Johnson 알고리즘의 원리를 적용한 방법으로 식은 다음과 같다.

$$a_j = \sum_{i=1}^{m-1} [(t_{ij} * (m-i) + tr_{ij} + tr_{(i+1)j} + ts_{ij})] \quad (5)$$

$$b_j = \sum_{i=2}^m [(t_{ij} * (i-1) + tr_{ij} + tr_{(i+1)j} + ts_{ij})] \quad (6)$$

2-4. New heuristic 4(NH 4)

기존의 RA 방법을 전달 시간 및 준비 시간이 고려된 제에 적용할 때 해의 최적성이 개선될 수 있도록 확장한 것이다. 제품이 해당 단위 공정에 머무는 시간 즉, 제품의 처리 시간, 전달 시간 및 준비 시간을 더한 값에 가중치를 곱하여 가상의 두 단위 공정계를 만든 방법이다.

$$a_j = \sum_{i=1}^m [(t_{ij} + tr_{ij} + tr_{(i+1)j} + ts_{ij}) * (m-i+1)] \quad (7)$$

$$b_j = \sum_{i=1}^m [(t_{ij} + tr_{ij} + tr_{(i+1)j} + ts_{ij}) * i] \quad (8)$$

2-5. New heuristic 5(NH 5)

제품이 해당 단위 공정에 머무는 시간중 제품의 처리 시간을 주로 고려하여 제품 처리 시간에만 가중치를 곱하여 가상의 두 단위 공정계를 만드는 방법으로 가상의 두 단위 공정은 다음과 같은 식을 이용하여 구한다.

$$a_j = \sum_{i=1}^m [(t_{ij} * (m-i+1) + tr_{ij} + tr_{(i+1)j} + ts_{ij})] \quad (9)$$

$$b_j = \sum_{i=1}^m [(t_{ij} * i + tr_{ij} + tr_{(i+1)j} + ts_{ij})] \quad (10)$$

Fig. 1은 새로이 제안된 방법들을 그림으로 표현한

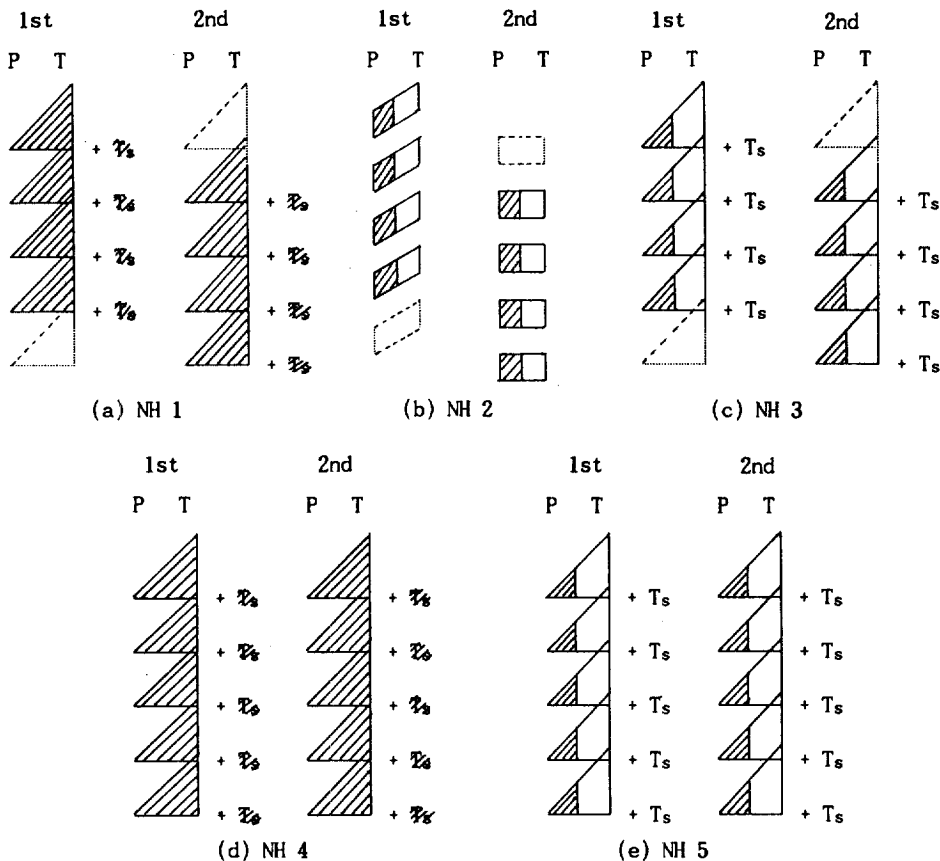


Fig. 1. Newly modified algorithms.

P: processing time T: transfer time.

Table 1. Example 1 for sequencing

Prod.	1		2		3		4		5		6	
Unit	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T
		3.		4.		5.		4.		4.		3.
1	14.	5.	26.	3.	8.	4.	15.	2.	27.	3.	13.	5.
2	22.	3.	15.	2.	13.	3.	16.	4.	18.	5.	24.	6.
3	0.	0.	13.	4.	15.	5.	26.	5.	17.	3.	13.	6.
4	19.	5.	22.	3.	0.	0.	23.	5.	16.	3.	14.	3.
5	21.	4.	12.	3.	13.	2.	0.	0.	0.	0.	17.	3.
6	22.	5.	25.	4.	17.	3.	14.	6.	26.	5.	13.	4.

Table 2. Sequence oriented setup times for example 1

	1	2	3	4	5	6
1	0.	2.	4.	2.	5.	6.
2	4.	0.	2.	4.	5.	3.
3	4.	2.	0.	5.	2.	5.
4	2.	3.	5.	0.	4.	4.
5	3.	4.	2.	5.	0.	3.
6	6.	2.	5.	3.	5.	0.

것이며, 빗금친 부분은 가중치를 곱한 값을 의미한다.

3. 특수한 다품종 공정의 최적 생산 계획

다품종 공정에서 일어날 수 있는 특수한 경우 즉 제품이 중간 단위 공정을 거치지 않는 경우 및 사용할 수 있는 단위 장치가 여러 개 존재하는 경우에 대하여 경험법칙을 토대로 생산 계획 및 상세 일정 계획을 결정하는 방법을 제안하고자 한다.

3-1. 중간 단위 공정을 거치지 않는 경우

중간 단위 공정을 거치지 않을 경우, 해당 단위 공정에서의 처리 시간 및 전달 시간이 0인 것으로 가정하였으며 제안한 생산 계획 방법의 효율을 알아보기 위하여 Table 1, 2의 예제에 각 방법을 적용하여 보았다. Table 2의 준비 시간은 생산 계획이 결정되면 준비 시간이 정해 지는 생산 계획에 의한 준비 시간이므로 가상의 두 단위 공정을 구성할 때 고려할 수 없다. 따라서 생산 계획에 의한 준비 시간의 경우 식 (1)-(10)의 ts_{ij} 를 "0"으로 가정한다. 각각 단위 공정에 의한 준비 시간 및 생산 계획에 의한 준비 시간을 다양한 예제에 적용한 결과 두 경우 모두에 대하여 본 연구에서 제안한 방법이 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

예제에 각 방법을 적용하여 가상의 두 예제로 만들면 Table 3과 같다. 본 예제에 새로운 Johnson 알고리즘을 적용하면 Table 4와 같은 생산 계획을 구할 수 있다.

Table 3. Pseudo. 2-unit systems for various algorithms

	1	2	3	4	5	6
RA	335.0	417.0	235.0	377.0	412.0	365.0
	393.0	412.0	263.0	323.0	353.0	346.0
EJ*	92.0	104.0	66.0	100.0	96.0	104.0
	101.0	103.0	71.0	99.0	93.0	103.0
NH1	233.0	301.0	167.0	283.0	308.0	268.0
	290.0	296.0	193.0	227.0	246.0	247.0
NH2	317.0	378.0	259.0	369.0	396.0	389.0
	383.0	377.0	251.0	311.0	309.0	346.0
NH3	335.0	417.0	235.0	377.0	412.0	365.0
	393.0	412.0	263.0	323.0	353.0	346.0
NH4	457.0	529.0	361.0	505.0	537.0	536.0
	523.0	528.0	353.0	447.0	450.0	493.0
NH5	357.0	436.0	252.0	399.0	431.0	392.0
	413.0	431.0	282.0	343.0	371.0	372.0

*EJ: Extended Johnson's Algorithm

Table 4. Production sequence for various algorithms

	Production sequence						Makespan
RA	3	1	2	5	6	4	276.
EJ	3	1	2	6	4	5	272.
NH1	3	1	2	6	5	4	276.
NH2	1	2	6	4	5	3	272.
NH3	3	1	2	6	5	4	285.
NH4	1	2	6	5	4	3	271.
NH5	3	1	2	6	5	4	272.
Best	1	4	5	3	2	6	266.

이들 생산 계획중에 [1-2-6-5-4-3]이 가장 최적으로 접근하였으며 이는 종래의 RA나 확장된 Johnson의 결과보다 우수한 것이다. 따라서 본 연구에서 제안된 생산 계획 방법들을 이용하여 매우 효율적으로 최적으로 근접할 수 있음을 확인할 수 있다.

3-2. 사용할 수 있는 단위 장치가 여러 개 존재하는 경우

각각의 생산 단계에서 사용이 가능한 크기가 다양한 단위 공정 장치가 여러 개 존재하는 경우, 단위 공정 장치의 상세 일정 계획을 효율적으로 세움으로써 공정 처리 시간을 최소화하는 방법을 제안하고자 한다. 우선적으로 총 공정 처리 시간(makespan)을 최소화하고 더불어 조업, 세척 등의 부수 비용을 최소화할 수 있다. 이 때 제품의 생산 순서는 이미 결정되어 있다. 본 방법도 경험 법칙을 기초로 제안된 방법으로써 여러 개의 단위 공정장치를 사용할 경우 발생할 수 있는 상황을 단계별로 세분하여 우선 순위별로 적용해 가는 방법이다. 본 방법의 적용 방법은 다음과 같다.

〈경우 1〉

$$td_{ik,j}=0 \quad \text{for } k=1, 2, \dots, l \quad (11)$$

주어진 생산량을 지연 시간없이 생산할 수 있는 경우로 이 때 $td_{ik,j}$ 는 단위 공정 i_k 에서 제품 j 를 처리하기 위하여 요구되는 지연 시간을 나타내며 i_k 는 i 번째 단위 공정을 처리할 수 있는 l 개의 공정 장치중 k 번째 공정 장치를 나타낸다. 이들을 처리 용량 순으로 나열하면 다음과 같다.

$$S_{i1} < \dots < S_{i(k-1)} < S_{ik} < S_{i(k+1)} < \dots < S_{il} \quad (12)$$

여기서 S_{ik} 는 공정 단계 i 의 k 번째 공정 장치의 처리 용량을 나타낸다. 가장 좋은 단위 공정 장치를 구하기 위하여 다음 단계 순으로 제품을 처리할 공정 장치를 결정한다.

〈경우 1-1〉

$$S_{i1} < \dots < S_{i(k-1)} < P_j < S_{ik} < S_{i(k+1)} < \dots < S_{il} \quad (13)$$

하나의 단위 공정 장치만을 사용하여 주어진 생산량을 별도의 지연 시간이 걸리지 않도록 하면서 생산할 수 있는 가장 이상적인 경우로 P_j 는 제품의 생산 요구량을 나타낸다. 이와 같이 조건을 만족하는 단위 공정 장치가 여러 개 존재하는 경우, 조업 및 세척 등의 비용이 가장 적게 들도록, 만족하는 단위 공정 장치중 가장 크기가 적은 것을 사용하도록 한다. 즉 i_k 가 가장 효율적인 단위 공정이다.

〈경우 1-2〉

$$(S_{ia} + S_{ib}) < P_j < (S_{ip} + S_{ir}) < (S_{ia} + S_{ip} + S_{ir}) \dots \quad (14)$$

주어진 생산량을 하나의 단위 공정 장치만으로는 생산할 수 없어서 주어진 생산량을 한번에 생산할 수 있도록 단위 공정 장치를 둘 또는 셋 이상 짝을 지어 함께 조업을 하도록 한다. 이 때 단위 공정의 짝짓기는 지연 시간을 일으키지 않는 단위 공정 장치들로 하며 짝짓은 쌍의 조업 용량은 요구량을 최소한으로 만족하는 쌍으로

선택하는 것이 조업 및 세척 등의 비용을 최소로 할 수 있다.

〈경우 2〉

$$td_{ik,j} \geq 0 \quad \text{for } k=1, 2, \dots, l \quad (15)$$

주어진 생산량을 생산하려면 지연 시간이 발생하는 경우로 총 공정 처리 시간을 최소화하는 것이 우선의 목적이므로 다음과 같이 지연 시간을 크기 순으로 배열한다.

$$td_{i1} < \dots < td_{i(k-1)} < td_{ik} < td_{i(k+1)} < \dots < td_{il} \quad (16)$$

여기서 td_{ik} 는 공정 단계 i 의 k 번째 공정 장치의 지연 시간을 나타낸다. 이 때 다음 식을 이용하여 제품 생산에 이용될 공정 장치를 구할 수 있다.

$$S(td_{i1}) < \dots < S(td_{i1}, \dots, td_{i(k-1)}) < P_j < S(td_{i1}, \dots, td_{ik}) < \dots \quad (17)$$

여기서 $S(td_{i1}, \dots, td_{ik})$ 는 지연 시간이 td_{i1} 인 공정 장치에서 td_{ik} 인 공정 장치까지의 처리 용량을 합한 총 처리 용량을 나타내며 지연 시간은 합한 단위 공정 장치중 최대 지연 시간인 td_{ik} 가 된다. (17)식에서 지연 시간이 가장 짧으면서 제품의 생산 요구량을 최소한으로 만족하는 $S(td_{i1}, \dots, td_{ik})$ 가 최적 공정 장치가 된다.

다단위 공정 사용 방법의 실제 적용을 위하여 Table 5와 같은 특수한 다품종 다단위 공정 예제 문제를 생각해 보자. Table 5의 예제에 위에서 소개한 새로운 알고리즘을 적용하여 구한 최초의 최적 생산 계획은 [4-2-3-1]이며 이 때 총 공정 처리 시간은 74이다. 각각의 제품 1, 2, 3, 4의 요구되는 생산량은 (30), (80), (80), (40)이며 이 때 사용할 수 있는 다단위 공정 장치는 Fig. 2와 같다.

예제에 제안한 경험 법칙을 적용하면 각 공정 단계에서의 최적 단위 공정 장치의 사용 방침을 Table 6과 같이 결정할 수 있다. Table 6에서 괄호안의 숫자는 각 단계에서 사용될 단위 공정 장치 및 장치쌍의 용량을 나타낸다.

예외적으로 제품의 생산 요구량이 주어진 공정 장치의 최대 처리 용량을 초과할 경우 제품량을 나누어 두 개 이상의 제품으로 가정하여 제품 생산 계획을 세우고 공정 장치의 최적 사용 방침을 결정한다. 이 때의 적용 과정은 1과 2의 예제에의 적용과정과 동일하다.

4. 예제 및 결과

본 연구에서 제안하고 있는 최적 생산 계획 알고리

Table 5. Special multiproduct process example 2

Production sequence									(Unit oriented setup)
1		2		3		4			
unit	P	T	P	T	P	T	P	T	
	3		2		4		4		
1	6	2	7	4	8	3	7	3	(1)
2	5	3	5	3	4	0	6	2	(2)
3	7	0	6	2	0	2	5	4	(3)
4	0	3	5	4	7	5	8	3	(4)

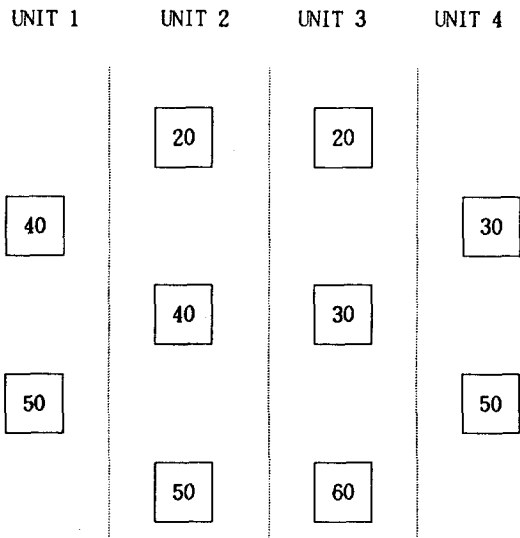


Fig. 2. Special multi-unit example 2.

듬들의 효율성을 알아보기 위하여 제품의 수와 단위 공정의 수 그리고 준비 시간 등이 다양하게 주어진 가상의 공정들을 대상으로 최적 생산 계획을 찾는 방법을 적용하였다.

Table 7에서 EJ와 RA는 각각 김과 조[4]에 소개한 새로운 Johnson 알고리즘과 종래의 RA 알고리즘을 나

타낸 것으로 L ratio란 각 예제에 대한 가능한 모든 생산 계획 수에 대한 최초의 근접 생산 계획보다 더 작은 총 공정 처리 시간을 갖는 생산 계획의 수의 비이다.

본 연구에서 계산을 수행하는데 이용한 기종은 CRAY IIS이며 계산 시간이 가장 오래 걸린 예제 ts9-2의 경우 최적해를 구하기 위하여 사용된 CPU는 58.741초이고 제안된 일곱가지 방법을 이용하여 최적 근접해를 찾는데 사용된 CPU는 0.036초이다. 이러한 CPU 사용 시간의 차이는 제품의 수가 많아질수록 더욱 현격해 질 것으로 예상된다.

개선된 다양한 알고리즘들을 적용하여 이 중 총 공정 처리 시간이 가장 짧은 생산 계획을 취하는 방법을 적용한 결과 본 연구에서 제안된 NH1-NH5를 이용하여 찾아낸 최초의 생산 계획이 최적 생산 계획에 매우 근접함을 확인할 수 있었으며 이러한 경향은 제품의 수가 증가하여도 유사하게 나타났다. 또한 최초로 찾아낸 생산 계획보다 더 적은 총 공정 처리 시간을 나타내는 생산 계획의 비율을 검토한 결과 생산해야 될 제품의 수가 하나씩 증가함에도 불구하고 제품의 수에 무관하게 그 비율이 매우 적은 값을 나타내어 새로이 제안된 알고리즘들이 매우 효율적이며 안정된 방법임이 입증되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 김과 조[4]에서 제안한 생산 계획 방법을 다양하게 개선하여 경험 법칙을 이용한 최분식 공정의 생산 계획의 최적성을 더욱 증진하고자 하였다. 그 결과 종래의 RA 알고리즘과 새로운 Johnson 알고리즘의 특성을 고려하여 다양하게 개선한 알고리즘들을 제안하였다. 제안된 알고리즘들을 이용하여 일반 다품종 공정 및 다목적 공정의 특성을 갖는 특수한 다품종 공정의 최적 근접 생산 계획을 찾는 방법을 제시하였으며 특수한 다품종 공정 문제의 다단위 공정 장치의 최적 사용 방침도 제안하였다.

Table 6. Makespan table for example 2

1	2	3	4
4 11 14 (15) (40)	17 24 28 (29) (40, 50)	33 41 44 (45) (40, 50)	48 54 56 (40)
	14 20 22 (24) (40)	28 33 36 (38) (40, 50)	44 48 50 (52) (40, 50)
		22 27 31 (34) (60)	37 43 45 (47) (20, 60)
			31 39 42 (45) (50)
			56 61 64 (40)
			64 71 74 (50)
			47 52 56 (59) (30, 50)
			61 68 73 (30, 50)

Table 7. Makespans for various algorithms

	RA	NJ	NH1	NH2	NH3	NH4	NH5	Best	L ratio
ts4-1	90	88	87	88	89	88	90	87	0. %
ts4-2	74	77	71	78	77	78	74	71	0. %
ts4-3	105	107	105	107	107	105	105	103	8.33%
ts4-4	95	97	97	97	97	102	97	90	8.33%
ts4-5	137	141	137	138	137	135	137	135	0. %
ts5-1	118	119	118	116	115	116	118	115	0. %
ts5-2	118	118	118	118	118	118	118	118	0. %
ts5-3	163	162	162	162	163	162	168	160	3.33%
ts5-4	166	166	166	166	166	166	166	166	0. %
ts5-5	133	127	133	133	133	133	133	127	0. %
ts6-1	145	146	145	142	146	142	145	138	7.64%
ts6-2	263	263	263	283	273	283	273	260	0.97%
ts6-3	227	221	227	227	227	227	227	220	0.56%
ts6-4	281	280	281	282	281	282	281	276	0.83%
ts6-5	218	213	218	212	213	212	213	203	4.17%
ts6-6	208	220	208	208	208	208	208	201	5.83%
ts6-7	205	206	205	202	205	202	205	202	0. %
ts7-1	160	160	160	160	160	160	163	159	1.57%
ts7-2	152	153	151	156	148	156	152	141	1.87%
ts7-3	451	448	451	443	451	441	451	437	0.5 %
ts7-4	373	370	373	370	373	370	374	368	1.43%
ts7-5	832	837	832	832	832	832	832	794	12.64%
ts8-1	195	192	195	192	195	192	195	187	0.71%
ts8-2	222	211	222	222	222	222	222	207	0.12%
ts8-3	413	399	398	388	398	388	398	379	0.18%
ts8-4	516	493	517	503	504	519	517	468	4.77%
ts9-1	271	269	271	269	271	269	271	269	0. %
ts9-2	261	255	261	256	261	256	261	239	3.65%

새로운 생산 계획 알고리즘의 우수성을 확인하기 위하여 여러 예제들에 적용하여 그 결과들을 비교 검토한 결과 본 연구에서 제안하는 새로운 알고리즘들이 최적 생산 계획에 매우 근접한 생산 계획을 효율적으로 찾아낼 수 있음을 확인하였다.

사용기호

- a_j : artificial processing time of product j on pseudo units 1
 b_j : artificial processing time of product j on pseudo units 2
 i_k : k th unit among multi units on i th processing stage
 P_j : required amount of product j
 S_{ik} : processing capacity of k th unit on i th processing stage

- t_{ij} : processing time of product j on unit i
 $td_{ik,j}$: delay time of product j on unit i_k
 tr_{ij} : transfer time of product j on unit i
 ts_{ij} : set-up time of product j on unit i
 $ts_{i(i-1)}$: set-up time of product i after product $(i-1)$ for sequence oriented set-up time

참고문헌

1. Ku, H., Rajagopalan, D. and Karimi, I.: *Chem. Engng. Prog.*, **35**(1987).
2. Rajagopalan, D. and Karimi, I.: *Comput. Chem. Engng.*, **13**(1/2), 175(1989).
3. Dannenbring, D. G.: *Manag. Sci.*, **23**, 1174(1977).
4. 김경숙, 조영상: *화학공학*, **30**(2), 221(1992).
5. Kuriyan, K. and Reklaitis, G. V.: *Comput. Chem. Engng.*, **13**(1/2), 187(1989).
6. Ku, H. and Karimi, I.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**,

- 1840(1988).
7. Yeh, N. C. and Reklaitis, G. V.: *Comput. Chem. Engng*, **11**(6), 639(1987).
8. Malone, M. F.: Annual Meeting, San Francisco, CA, paper 23f, 1989.
9. Das, H., Cummings, P. T. and LeVan, M. D.: *Comput. Chem. Engng*, **14**(12), 1351(1990).