

재순환 제품을 가진 다목적 회분식공정의 조업완료시간 결정 알고리즘 및 최적생산계획

박상대 · 김양진 · 정재학[†]

영남대학교 응용화학공학부
(2000년 6월 1일 접수, 2000년 9월 14일 채택)

Completion Times Algorithm and Optimal Production Scheduling for Multi-purpose Batch Process Including Recirculation Products

Sangdae Park, Yangjin Kim and Jae Hak Jung[†]

School of Chemical Engineering and Technology, Yeungnam University
(Received 1 June 2000; accepted 14 September 2000)

요 약

생산성에 있어서 연속식공정보다 낮은 효율을 갖는 회분식공정이 최근 몇 년간 많은 연구자들의 관심의 초점이 되었던 것은 빠른 시간 내에 변화하는 소비자의 기호와 유통되는 제품의 수명이 많이 짧아짐에 따라 시장 변화에 유연하게 대응할 수 있는 공정에 대한 필요성의 증가 때문이다. 즉, 회분식공정에 의해 생산된 제품들은 연속공정의 제품들에 비해 고부가가치의 제품일 뿐만 아니라 급변하는 시장 변화에 더 적합하다는 것을 의미한다. 회분식공정은 다품종 공정과 다목적 공정으로 나누어 연구되어졌으나, 현재까지 다품종공정에 비해 다목적 회분식공정에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 그 이유는 다목적 회분식공정이 가지는 몇 가지 특징들-제품의 불규칙한 경로와 불가능한 조업순서의 존재 등-때문이다. 박과 정[13-14]에서는 이들 다품종공정 중 재순환이 없는 경우의 조업완료시간 연구를 수행하였고, 또한 그들을 기초로 최적 생산계획에 대한 연구의 결과를 얻어내었다. 그러나 많은 다목적공정의 실제 산업에서의 예들(주로 전자산업에서)은 다수의 제품이 재순환을 갖고 있음이 알려지게 되어 재순환 흐름제품을 표현하지 않고서는 다목적 공정의 실제 산업 예를 적절히 다루고 있다 할 수 없게 되었다. 본 연구에서는 준비시간 및 수송시간을 고려하지 않은 경우와 또 준비시간 및 수송시간을 고려한 재순환 제품을 가진 비순차 다목적 회분식공정의 조업완료시간을 수식으로 표현하였다. 그리고 몇 가지의 예를 통해 유도 과정 및 알고리즘의 성능 검사를 하였고, 계산 결과와 Gantt chart를 나타내었다. 또한 이 문제를 풀기 위해 개발된 Genetic Algorithm을 이용한 최적 생산계획의 결과를 나타내었다.

Abstract – Even though the efficiency of batch process is lower than that of continuous process, the batch process has been increased in the chemical process industry over past decade. The batch process is more suitable process to meet with the frequent changes of demands as the taste of consumers is changed within short period and life cycle of products is shortened. The researches have been classified the chemical batch process into two types, multi-product batch process and multi-purpose batch process. Until now, the multi-purpose batch process had received little attention than multi-product batch process by researchers because of several characteristics which is hard to deal with such as irregularity of production path, existence of infeasible operation sequence and complexity of operation. Park and Jung[13-14] have studied the completion times algorithm and the optimal scheduling for multi-purpose batch process which have no recirculation products through the processing units. But in the case of real industry, for example the electronic semi-conductor industry, they usually have the products with recirculation path through the processing flow. So it can't be argued without appropriate considering of recirculation of products flow. In this paper we have developed the completion times algorithms of single line multi-purpose batch process including recirculation products under consideration of the non-zero set-up times and transfer times. We also developed the optimization method, genetic algorithm, for optimal scheduling of multi-purpose batch process including recirculation products. Finally the performance of the proposed algorithms was tested by several randomly generated examples and the Gantt chart results are presented. We used Genetic Algorithm for solving the scheduling problems and optimal solutions are also presented.

Key words: Recirculation Product, Completion Time Algorithm, Multi-purpose Batch Process

[†]E-mail: jhjung@yu.ac.kr

1. 서 론

일반적으로 순서계획(sequencing)과 생산계획(scheduling)은 화학공정 등의 제조업, 서비스 산업뿐만 아니라 전자산업에서도 중요한 역할을 하는 의사결정(decision-making)의 형태이다. 즉, 생산공정을 가진 산업에서 효율적인 순서계획(sequencing)과 생산계획(scheduling)은 판매 시장에서의 우위를 차지하기 위한 필수요건이라 할 수 있다. 화학산업에서 이러한 생산계획에 대해 관심을 가지기 시작한 것은 비교적 근래의 일이다. 최근 들어 화학공정 중 반연속식 및 회분식공정의 생산계획에 대해 많은 연구자들이 관심을 보이기 시작하였고, 그 동안 많은 연구 결과들이 발표되었다.

이러한 반연속식 및 회분식공정의 제품들은 연속공정의 제품들에 비해 대부분이 고부가가치의 제품들로서 급변하는 시장의 수요 변화에 신속히 대처할 수 있다는 장점이 있다. 반연속식 공정 및 회분식공정의 조업은 연속식공정과 달리 많은 노동력의 요구, 낮은 효율, 다음 조업을 위한 준비시간 필요, 제어의 어려움 등과 같이 비용에 관련된 많은 문제점들을 가지고 있다. 그래서 회분식공정의 조업에 있어서 경비절감을 위한 많은 연구가 진행되었다. 회분식공정의 낮은 효율을 극복하기 위한 연구 중 하나가 각 장치와 장치들 사이에 중간 저장 탱크를 설치하여 인접한 장치들 사이에서 발생하는 병목현상(bottleneck)을 완화 또는 소거시킴으로서 생산성을 증가시키는 방법이다. 지금까지 연구되어진 중간저장조 방안에는 UIS(Unlimited Intermediate Storage), NIS(No Intermediate Storage), FIS(Finite Intermediate Storage), MIS(Mixed Intermediate Storage), CIS(Common Intermediate Storage) 그리고 ZW(Zero Wait) 방안 등이 연구되어졌다[2-11,15,16]. 이러한 연구들 중에서 가장 먼저 연구된 것이 생산계획(scheduling)을 위한 조업완료시간 알고리즘 결정에 관한 연구였다. 이들 회분식공정 생산 시스템을 조업의 측면에서 볼 때, flow-shop 형태의 다품종 회분식공정(multi-product batch process)과 다목적 회분식공정(multi-purpose batch process) 그리고 job-shop 형태의 조업으로 분류할 수 있다. 이 중에서 다품종 회분식공정과 job-shop 형태의 공정에 관한 연구는 생산계획에 관한 연구뿐만 아니라 공정 설계에 관한 연구까지 폭넓게 이루어졌다[18-20]. 이러한 연구들에 비해 다목적용 회분식공정에 대한 연구는 극히 미미하였다고 볼 수 있다. 그 이유는 다품종공정에 비해 불규칙한 제품 경로, 불가능한 조업순서의 존재 등과 같은 상당히 복잡한 특성을 갖고 있기 때문이다. 최근 들어 Voudoulis와 Grossmann[17]은 다목적 회분식공정을 순차 다목적 공정과 비순차 다목적 공정으로 분류하였고, 순차 다목적 공정의 생산계획 및 공정설계를 위한 수학적 계획법을 발표하였고, 박과 정[13-14]이 비순차 다목적 회분식공정에 대한 조업완료시간 알고리즘과 Simulated Annealing을 이용한 생산계획법을 발표하였다.

본 논문에서는 전자산업, 조립공정 및 다목적 회분식공정 중 하나인 무배관 공정[12] 등에서 고려되어야 할 재순환 제품(recirculation product)을 고려한 순차 및 비순차 다목적 회분식공정의 조업완료시간 알고리즘을 수식으로 나타내었다. 특히 전자산업의 경우 같은 조업순서들을 여러 차례 조업해야하는 재순환 흐름 루프를 다수 갖는 조업형태를 띠고 있어서 부품 연마가공산업에서 흔히 보이는 job-shop공정과 는 거리가 멀고 다목적 회분식공정 조업 중 재순환 흐름 루프를 갖는 조업형태가 된다. 본 연구에서는 수송시간 및 준비시간을 고려하지 않은 단순화된 조업완료시간 결정 알고리즘뿐 아니라, 수송시간 및 준비시간을 고려한 조업완료시간 결정 알고리즘을 개발하였으며, 이들 알고리즘을 기초로 하여 재순환 흐름을 갖는 다목적 회분식공정의 최적 생산계획을 Genetic Algorithm으로 풀이하였다. 본 연구에서 제안한 알고리즘의 성능 검사를 위해 많은 예제들을 적용하였고, 그 계산결과를 Gantt chart로 나타내었다. 본 연구에서 개발한 알고리즘은 컴퓨터 언어인 C 언어로 코딩되

었고, Pentium-III 450/128Mbyte의 일반 PC에서 비교적 짧은 시간 내에 해답을 찾았다.

2. 재순환 제품을 고려한 조업완료시간 결정

최근 박과 정[13-14]은 다목적 회분식공정의 특징을 나타내는 세 변수 즉, j 장치에서 k 번째로 처리되는 제품번호를 뜻하는 P_{jk} 변수와 i 제품이 m 번째로 처리되는 장치를 의미하는 U_{im} 변수, 그리고 i 제품이 거치는 장치들 중 j 장치에서의 조업순서를 의미하는 O_{ij} 변수를 도입하여 UIS 정책하의 재순환 제품을 고려하지 않은 다목적 회분식공정에 대한 조업완료시간 알고리즘을 제시하였다. 여기서 P_{jk} 의 요소는 제품으로 장치기준에서 보는 제품이고, U_{im} 의 요소는 장치로써 제품기준에서, 그리고, O_{ij} 의 요소는 제품기준에서 장치의 순서를 의미한다. 다음의 식 (1)은 준비시간 및 수송시간 그리고 재순환 제품을 고려하지 않은 다목적 회분식공정의 조업완료시간 결정의 순환적 표현 수식이다.

$$\begin{aligned} C_{\alpha,j} &= \max(C_{\beta,j}, C_{\alpha,\gamma}) + t_{\alpha,j} \\ \alpha &= P_{j,k} \\ \beta &= P_{j,k-1} \\ \delta &= O_{P_{j,k},j} - 1 \\ \gamma &= U_{\alpha,\delta} \end{aligned} \quad (1)$$

재순환 제품이란 제품 생산을 위해 주어진 장치들 중에서 한 제품이 같은 장치를 두 번 이상 거쳐서 처리되는 제품을 말한다. 이러한 재순환 제품들은 전자 산업에 있어 전자 부품생산 공정이나 무배관 회분식 공정에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 본 논문에서는 박과 정[13]이 제시한 비순차 다목적 회분식공정의 조업완료시간 알고리즘에서 고려하지 않은 재순환 제품을 고려한 조업완료시간 알고리즘을 개발하였다. 그리고 본 연구에서 개발한 조업완료시간 알고리즘은 수송시간 및 준비시간을 고려하지 않은 것과 그들을 모두 고려한 것을 모두 포함하고 있으며, 중간 저장 탱크 방안으로는 UIS(Unlimited Intermediate Storage) 정책을 사용하였다.

본 논문에서는 재순환 제품을 고려한 단일 장치열로 구성된 다목적 회분식공정[21]을 대상공정으로 정하였다. 그러므로 다목적 회분식공정의 제품들은 다음의 4가지, 즉 정방향 제품(forward-flow product), 역방향 제품(backward-flow product), 순환제품(cycle product), 재순환 제품(recirculation product)으로 분류할 수 있다. 이는 박과 정[13]이 분류한 3가지 제품에 재순환 제품을 추가한 것이다. 본 연구에서 분류한 4가지 제품들을 Fig. 1에 나타내었으며 이때 P 는 제품을 의미하고 U_j 는 장치번호를 의미한다. 그리고, 화살표는 제품의 경로를 의미한다. 재순환 제품의 특성을 살펴보면 결국 정방향 제품, 역방향 제품, 순환 제품의 조합 형태를 가진다. 예를 들면 한 개의 재순환 제품은 순환되는 횟수에 따라 Fig. 2와 같이 다수의 정방향 제품과 다수의 역방향 제품으로 나눌 수 있다.

Fig. 2(a)에 나타난 것처럼 재순환 제품 P_1 을 분리하면 Fig. 2(b)의 P_1 라는 정방향 제품과 P_2 라는 역방향 제품으로 분해할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 분해된 두 제품, P_1 와 P_2 의 상관관계를 살펴보면 P_1 이 P_2

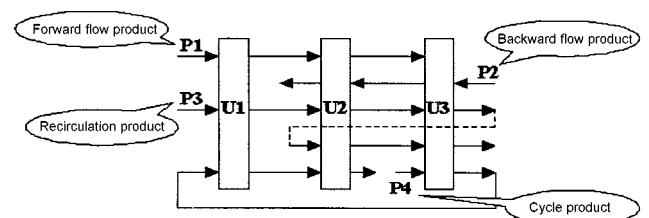


Fig. 1. Reclassification of products for multi-purpose batch process.

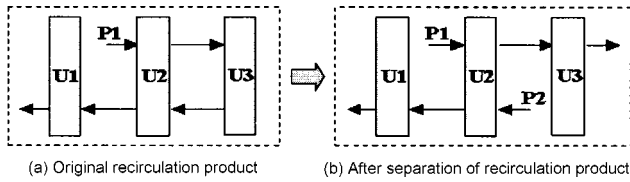


Fig. 2. Multi-purpose process 1 including recirculation product.

보다는 먼저 처리되어야 함을 알 수 있다. 그래서 본 연구에서는 재순환 제품에서 분해된 두 개 이상의 제품들에 대해서 선행 처리되어야 할 제품을 ‘상위 제품(upper product)’, 후행 처리되어야 할 제품을 ‘하위 제품(lower product)’이라 정의하였다. 그리고 분해된 두 제품간의 상관관계를 나타낼 수 있는 변수 R_p 를 도입하였다. R_p 변수의 의미는 p 제품의 상위 제품, 즉 p 번째 제품 바로 앞에 처리되는 제품을 의미한다. 즉, 재순환 제품의 분리된 제품들의 순서를 뜻하는 변수가 된다. 예를 들면, Fig. 3(a)에서 P_1 과 같은 재순환 제품은 Fig. 3(b)에서의 P_1 , P_2 , P_3 , P_4 의 4가지 제품으로 분해할 수 있다. 이 경우 분리된 제품들 중 P_1 의 상위 제품은 존재하지 않고, P_2 의 상위 제품은 P_1 , P_3 의 상위 제품은 P_2 , P_4 의 상위 제품은 P_3 이 된다. 그리고 상위 제품이 존재하지 않을 경우 즉, 재순환 제품이 아니거나(정방향 제품, 역방향 제품, 순환 제품) 또는 재순환 제품을 분해한 제품 중 가장 상위의 제품 [Fig. 3(b)에서 P_1]의 R_p 값은 0으로 설정한다. 결국 R_{p1} 는 0, R_{p2} 는 1 즉 P_1 , R_{p3} 는 2, 즉 P_2 , R_{p4} 는 3, 즉 P_3 의 값을 가진다. 본 연구에서 사용한 중간 저장 탱크 방안은 UIS이다. 이 방안의 특징은 장치 대기 시간(holding time)이 존재하지 않는다는 것이다. 그러므로 임의의 제품 α 의 임의의 장치 j 에서의 조업완료시간($C_{\alpha,j}$)을 계산하기 위해서는 두 항목만 고려하면 된다. 즉, 하나는 현 제품이 현 장치로 수송되기 바로 전 장치에서의 조업완료시간($C_{\alpha,\gamma}$)이고 다른 하나는 현 장치에서 현 제품이 처리되기 바로 전에 처리되었던 제품의 조업완료시간($C_{\beta,j}$)이다. 이 두 항목 중 큰 항목에 처리시간($t_{\alpha,j}$)만 합하면 된다. 그러나 재순환 제품에서 하위 제품의 조업완료시간은 상위 제품의 조업완료시간에 의해 영향을 받으므로 하위제품의 조업완료시간을 구하기 위해서는 상위제품의 조업완료시간을 고려하여야 한다. 그러나 Fig. 2와 3에서 살펴보면, 결국 분해된 하위제품들이 첫 번째로 처리되는 장치에서의 조업완료시간만이 상위제품의 조업완료시간에 의해 영향을 받음을 알 수 있다. 예를 들어, Fig. 3에서 P_3 의 하위제품인 P_4 의 첫 번째 처리되는 장치인 U_1 에서의 조업완료시간을 구하기 위해서는 그 상위 제품인 P_3 의 마지막 처리 장치인 U_4 에서의 조업완료시간과 장치 U_1 에서 P_4 가 처리되기 전에 처리 완료된 P_1 의 조업완료시간을 알아야 한다. 그러므로 하위제품의 첫 번째 장치에서의 조업완료시간을 계산하기 위해서는 상위제품이 마지막으로 처리되는 장치가 무엇이냐는 장치번호를 알아야 한다. 그래서 본 연구에서는 각 제품이 마지막으로 처리되는 장치를 나타내는 변수 L_p 를 도입하였다. Fig. 3에서 L_p 값을 살펴보면 L_{p1} 는 4, 즉 U_4 , L_{p2} 는 2, 즉 U_2 , L_{p3} 는 4, 즉 U_4 , L_{p4} 는 3, 즉 U_3 이다. 또, 총 조업순서의 경우의 수에 있어서 다목적 회분식공정과 재순환 제품을 고려한 다목적 회분식공정 그리고 재순환 제품을 고려하지 않은 다

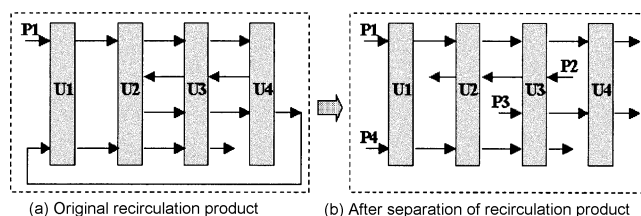


Fig. 3. Multi-purpose process 2 including recirculation product.

목적 회분식공정들 사이에 차이점이 나타난다. 다목적 회분식공정의 경우에 있어서 총 조업순서 경우의 수는 제품수의 순열 즉, $N!$ 로 표현되고 재순환 제품을 고려하지 않을 경우 다목적 회분식공정의 총 조업순서의 경우의 수는 각 장치에서의 제품수의 순열의 곱 즉, $(N_1!) \times \dots \times (N_M!)$ 이다. 여기서 N 은 생산해야할 총 제품수이고, N_j 는 j 장치에서 처리되는 제품수이다. 반면, 재순환 제품을 고려한 경우는 재순환 제품을 고려하지 않은 경우에 비해 재순환이 발생하는 장치에서의 제품수가 증가하기 때문에 총 조업순서의 경우의 수에 있어서도 증가함을 알 수 있다.

앞서 설명한 것처럼, 임의의 상위 제품에 속속된 하위 제품의 조업완료시간을 계산하기 위해서는 그 상위 제품의 마지막 장치에서의 조업완료시간을 알아야 한다. 예를 들면 Fig. 3(b)에서 P_1 의 하위제품인 P_2 의 제품 생산경로 중 첫 번째 장치인 U_3 에서의 조업완료시간($C_{p2,U3}$)을 계산하기 위해서는 P_1 의 마지막 처리장치인 U_4 에서의 조업완료시간($C_{p1,U4}$)을 알아야하고, P_2 의 하위제품인 P_3 의 경로 중 첫 번째 장치인 U_3 에서의 조업완료시간($C_{p3,U3}$)을 계산하기 위해서는 P_2 의 마지막 처리장치인 U_2 조업완료시간($C_{p2,U2}$)을 알아야 한다. 위에서 설명한 과정들은 비록 재순환 제품들을 상위 제품 및 하위 제품으로 분류한 후 적용한 예들이지만 다음의 몇 가지 가정들을 추가하면 재순환 제품이 아닌 제품들 즉, 정방향, 역방향과 순환 제품들까지 확장 적용할 수 있다. 다시 말해서, 가장 상위 제품 [Fig. 3(b)에서 P_1], 정방향 제품들, 역방향 제품들과 순환제품들의 R_p 값을 0으로 가정하고, $C_{\alpha,0}$ 와 $C_{0,j}$ 의 값을 0으로 가정한다. 이 두 가정과 주어진 제품의 처리순서(P_{jk})를 이용하면, 재순환 제품으로부터 분류된 상위 제품과 하위 제품들, 그리고 재순환 제품이 아닌 제품들의 맨 처음 처리되는 장치에서의 조업완료시간들을 다음 식 (2)로부터 계산할 수 있다.

$$C_{\alpha,j} = \max(C_{\beta,j}, C_{R_{\alpha},L_{\alpha}}) + t_{\alpha,j} \quad (2)$$

단, 위에서 설명한 것처럼 식 (2)는 $O_{\alpha,j}$ 의 값이 1일 경우에만 적용할 수 있다. 다시 말해 식 (2)는 장치 j 가 임의의 제품 α 의 첫 번째 처리장치일 경우에만 적용 가능하다는 것이다. 그 외의 경우 즉, $O_{\alpha,j}$ 의 값이 1이 아닌 경우에는 식 (1)을 사용하면 된다. 결국 재순환 제품을 포함하고 있고, 수송시간 및 준비시간을 고려하지 않은 단일 장치열로 구성된 다목적 회분식공정의 조업완료시간 알고리즘은 다음의 식 (3)으로 표현될 수 있다.

if($Q_{\alpha,j} = 1$) then

$$C_{\alpha,j} = \max(C_{\beta,j}, C_{R_{\alpha},L_{\alpha}}) + t_{\alpha,j} \quad (3)$$

else

$$C_{\alpha,j} = \max(C_{\beta,j}, C_{\alpha,\gamma}) + t_{\alpha,j}$$

또한, 수송시간과 준비시간을 고려하면 다음의 식 (4)로 표현된다.

if($Q_{\alpha,j} = 1$) then

$$C_{\alpha,j} = \max(C_{\beta,j} + S_{\beta,\alpha,j} + A_{\alpha,\delta}, C_{R_{\alpha},L_{\alpha}}) + t_{\alpha,j} + A_{\alpha,\delta+1} \quad (4)$$

else

$$C_{\alpha,j} = \max(C_{\beta,j} + S_{\beta,\alpha,j} + A_{\alpha,\delta}, C_{\alpha,\gamma}) + t_{\alpha,j} + A_{\alpha,\delta+1}$$

where, $\alpha = P_{j,k}, \beta = P_{j,k-1}, \delta = O_{P_{j,k}} - 1, \gamma = U_{\alpha,\delta}$

여기서, $S_{\beta,\alpha,j}$ 는 j 장치에서 β 제품과 α 제품사이의 준비시간(Set-up Time) 즉, j 장치에서 이전에 처리된 제품과 현재 처리될 제품간의 준비시간을 나타낸다. $A_{\alpha,\delta}$ 는 α 제품이 이전 장치에서 현 장치로의 수송시간(Transfer Time)을 나타낸다.

위의 내용을 종합해 보면 재순환 제품을 포함한 다목적 회분식공정의 조업완료시간을 계산하기 위해서는 다음과 같은 단계의 알고리즘에 의

해 계산될 수 있다.

단계 1. 다목적 회분식공정에 포함된 재순환 제품들을 다른 제품들(정방향, 역방향과 순환 제품)과 분류한다.

단계 2. 단계 1에서 분류한 모든 재순환 제품들을 재순환 제품의 성질을 소거할 수 있는 둘 이상의 제품으로 분류한다. 그리고, 변수 R_p 와 L_p 값을 설정한다.

단계 3. 처음 주어졌던 공정 데이터인 공정의 처리시간을 단계 2에서 정의한 하위 제품들을 포함하는 공정 처리시간으로 재설정한다.

단계 4. 재순환 다목적 회분식공정의 특징을 나타내는 변수들(P_{jk} , U_{im} , O_{ij} , R_p , L_p)의 값을 설정한다.

단계 5. 위의 4가지 단계에 의해 설정된 변수값(P_{jk} , U_{im} , O_{ij} , R_p , L_p)들과 식 (3)을 이용하여 조업완료시간들을 계산한다.

단계 6. 마지막으로 단계 5에서 계산된 조업완료시간 데이터들을 단계 2에서 분류하기전의 초기 제품으로 재설정한다.

3. 조업완료시간 결정 알고리즘 검증을 위한 예제들

본 논문에서는 제시된 재순환 제품을 포함하고 있는 다목적 회분식공정의 조업완료시간 결정 알고리즘[식 (3)]을 검증하기 위해 임의로 2개의 예제 공정을 만들었고, 공정 데이터인 처리시간은 무작위로 발생하였다. 또, 본 연구에서 제안한 조업완료시간 알고리즘을 적용하여 얻은 결과값을 Gantt Chart로 나타냈다.

3-1. 예제 1(주어진 조업순서 예제)

Fig. 4와 같은 공정을 고려하여 보자. Fig. 4에서 보는 바와 같이 제품 P_3 은 장치 U_3 와 장치 U_4 에서 두 번씩 처리되는 재순환 제품임을 알 수 있다. 본 연구에서 제시한 단계에 따라 주어진 다목적 회분식공정의 조업완료시간을 계산하면 다음과 같다. 이 예제는 준비시간과 수송시간을 고려하지 않은 것이다.

단계 1. P_1 은 정방향 제품, P_2 는 역방향 제품 그리고 P_3 는 재순환 제품으로 분류할 수 있다.

단계 2. Fig. 4(a)의 재순환 제품 P_3 은 1개의 상위 제품과 1개의 하위 제품으로 분류할 수 있다. 이 경우 Fig. 4(a)의 P_3 제품이 Fig. 4(b)의 P_3 라는 정방향 제품($R_p=0$)과 P_4 라는 정방향 제품($R_p=P_3$)으로 분류되었음을 알 수 있다. 재순환 제품이 아닌 P_1 과 P_2 제품의 R_p 값은 0으로 설정된다. 따라서 변수 R_p 와 L_p 의 값을 설정하면 다음과 같다.

단계 3. Table 2는 주어진 초기의 처리시간과 Fig. 4(b)의 공정도에 적합하게 바꾼 처리시간을 나타낸 것이다. 이 경우 재순환 성질을 갖는 제품(P_3)이 두 번 이상 처리되는 장치(U_3 , U_4)에서의 처리시간들은 재순환되더라도 처리시간을 각각 다르게 줄 수도 있지만 여기서는 이해하기 쉽게 서로 같다고 가정하였다. 즉, Fig. 4(b)에서 P_3 의 U_3 에서

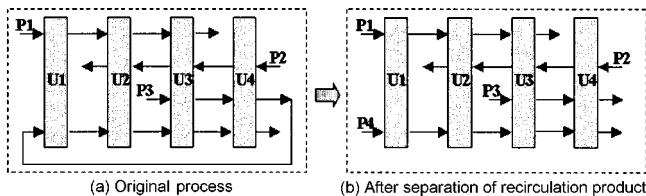


Fig. 4. Schematic diagram of example process 1.

Table 1. Values of R_p and L_p for example process 1

Subscript P	R_p				L_p			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
P value	0	0	0	P_3	U_3	U_2	U_4	U_4

Table 2. Processing times for the process of Fig. 4(a) and Fig. 4(b)

(a)					\Rightarrow	(b)				
	U_1	U_2	U_3	U_4			U_1	U_2	U_3	U_4
P_1	12	10	7	\times		P_1	12	10	7	\times
P_2	\times	4	9	8		P_2	\times	4	9	8
P_3	7	9	4	5		P_3	\times	\times	4	5
						P_4	7	9	4	5

Table 3. Value of three variables for the process of Fig. 4(b)

P_{jk}					U_{im}					O_{ij}				
	1_{st}	2_{nd}	3_{rd}	4_{th}		1_{st}	2_{nd}	3_{rd}	4_{th}		U_1	U_2	U_3	U_4
U_1	P_1	P_4	\times	\times		P_1	U_1	U_2	\times		P_1	1	2	\times
U_2	P_1	P_4	P_2	\times		P_2	U_4	U_3	\times		P_2	\times	3	2
U_3	P_3	P_2	P_1	P_4		P_3	U_3	U_4	\times		P_3	\times	\times	1
U_4	P_2	P_3	P_4	\times		P_4	U_1	U_2	U_3	U_4	P_4	1	2	3

Table 4. Completion times for the process of Fig. 4(a) and Fig. 4(b)

C_{ij}					\Rightarrow	C_{ij}				
	U_1	U_2	U_3	U_4			U_1	U_2	U_3	U_4
P_1	12	22	29			P_1	12	22	29	\times
P_2	\times	35	17	8		P_2	\times	35	17	8
P_3	\times	\times	4	13		P_3	\times	\times	4	13
P_4	20	31	35	40			20	31	35	40

Completion times for the process of Fig. 4(b). Completion times for the initial process in Fig. 4(a)

의 처리시간(t_{P_3, U_3})과 P_4 의 U_3 에서의 처리시간(t_{P_4, U_3})이 같고, P_3 의 U_4 에서의 처리시간(t_{P_3, U_4})과 P_4 의 U_4 에서의 처리시간(t_{P_4, U_4})이 같다고 가정하였다.

단계 4. 재순환 성질을 소거한 후 만들어진 새로운 공정도인 Fig. 4(b)의 공정도로부터 세 변수를 표현하면 다음과 같다. 단 여기서 Table 3의 P_{jk} 의 경우 본 알고리즘을 설명하기 위한 한 예로써 임의로 선택한 값들이다. 뒤에 이어 나올 Scheduling에서는 이 값들의 최적치들을 찾는 과정이 될 것이다.

단계 5. 단계 4까지의 결과들과 식 (3)을 이용하면 주어진 공정[Fig. 4(b)]의 조업완료시간을 계산할 수 있다.

단계 6. 계산된 조업완료시간들은 Fig. 4(a)의 P_3 제품에서 분류된 Fig. 4(b)의 P_3 과 P_4 제품에 대해 계산된 것이므로 이를 초기 공정도[Fig. 4(a)]에 대한 조업완료시간으로 변경하여 Table 4에 나타내었다.

계산된 조업완료시간(Table 4)을 Gantt chart로 나타낸 것이 Fig. 5이다. Fig. 5의 Gantt chart의 조업순서는 Table 3의 P_{jk} 값을 나타낸다. 그리고 Fig. 5에서는 Table 4처럼 계산된 조업완료시간을 재순환 제품을 분리하기 전의 초기 상태로 재설정하는 그림을 보여주고, 재순환 제품인 P_3 의 경로를 화살표로 나타내었다.

3-2. 예제 2(주어진 조업순서 예제)

Fig. 6은 두 개의 재순환 제품으로 이루어진 다목적 회분식공정이다. 이 공정에서 Fig. 6(a)의 P_1 은 장치 U_2 에서 두 번 처리되는 제품이고, P_2 는 2번 장치를 세 번 통과하는 제품이다. 이 공정에 대해 본 연구에서 제시한 단계들을 거쳐 조업완료시간을 구하는 과정은 다음과 같다.

단계 1. P_1 과 P_2 모두 재순환 제품이고 다른 제품들은 존재하지 않는다.

단계 2. Fig. 6에 나타난 것처럼 Fig. 6(a)의 P_1 을 Fig. 6(b)의 P_1 과 P_2 의

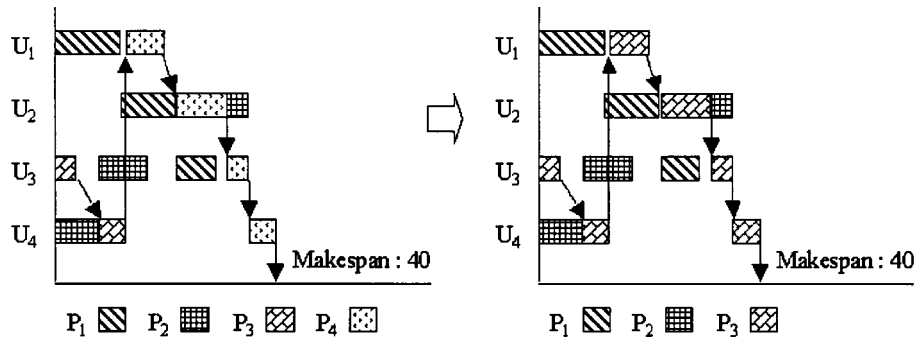


Fig. 5. Gantt chart for the result of example process 1.

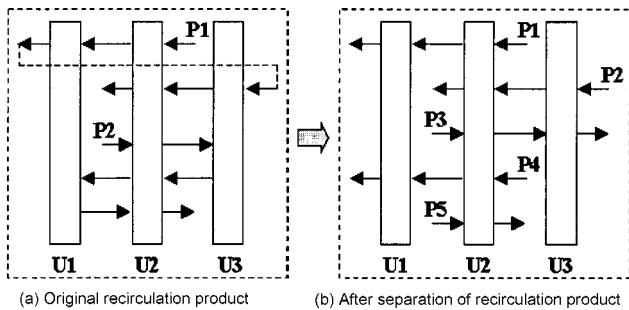


Fig. 6. Schematic diagram of example process 2.

두 역방향 제품들로 분류하고, Fig. 6(a)의 P_2 는 Fig. 6(b)의 P_3 , P_4 , P_5 의 세 제품으로 분류한다. 이때 변수 R_p 와 L_p 의 값은 다음과 같다.

단계 3. Table 6은 주어진 예제 2의 초기 처리시간과 재순환 제품을 분리한 후를 나타내는 Fig. 6(b)의 공정도에 해당되는 처리시간을 나타낸 것이다. 이 경우도 예제 1에서와 같이 재순환 성질을 갖는 임의의 제품이 두 번 이상 처리되는 장치에서의 처리시간들은 서로 같다고 가정하였다.

단계 4. 재순환 특성을 소거한 공정도[Fig. 6(b)]의 세 변수(P_{jk} , U_{im} , O_{ij})의 값은 다음과 같다. 주어진 문제를 표현하기 위해 이들 변수 중 P_{jk} 는 임의로 선택하였다.

단계 5. 단계 4까지의 결과들과 식 (3)을 이용하면 주어진 공정[Fig. 6]의 조업완료시간을 계산할 수 있다.

단계 6. 계산된 조업완료시간을 초기 공정도에 맞게 재설정하면 다음 Table 8과 같은 최종 조업완료시간을 얻을 수 있다.

Fig. 7은 계산된 조업완료시간(Table 8)을 Gantt chart로 나타낸 것이다. Fig. 7의 조업순서(P_{jk})는 Table 7에 나타내었다. Fig. 7에서 제품 1의 경로는 실선 화살표로 나타내었고, 제품 2의 경로는 점선 화살표로 나타내었다.

4. 최적 생산계획을 위한 Genetic Algorithm(GA)

재순환 제품을 갖는 다목적 회분식공정은 최근 각광을 받고 있는 전자산업에서 자주 보이는 조업방법이다. 기존의 회분식공정들과 이 재순환 제품을 갖는 다목적 회분식공정의 차이점은 우선 그 제품수에서 찾을 수 있다. 보통 전자 산업에서의 재순환은 한 완성된 전자부품을 생산하기 위해 10-30회 정도의 재순환을 하는 것이 일반적이라고 알려져 있다. 즉 1개의 제품이 문제를 풀이기 위한 modeling 단계에서 10-30개의 제품이 되고, 만약 이런 제품이 5개가 있다면, 계산을 위해 얻어진 수치적 제품 개수 자료는 50-150개의 제품을 갖는 생산계획 문제가 된다. 50-150개 가량의 제품군으로 다제품 공정의 생산계획 문제

Table 5. Values of R_p and L_p for example process 2

Subscript P	R_p					L_p				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
P value	0	P_1	0	P_3	P_4	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2

Table 6. Processing times(t_{ij}) for the process of Fig. 6(a) and Fig. 6(b)

(a)				\Rightarrow	(b)			
	U_1	U_2	U_3			U_1	U_2	U_3
P_1	7	6	9		P_1	7	6	\times
P_2	4	12	8		P_2	\times	6	9
					P_3	\times	12	8
					P_4	4	12	\times
					P_5	\times	12	\times

Table 7. Value of three variables for the process of Fig. 6(b)

P _{jk}						U _{im}				O _{ij}			
	1 _{st}	2 _{nd}	3 _{rd}	4 _{th}	5 _{th}		1 _{st}	2 _{nd}	3 _{rd}		U ₁	U ₂	U ₃
U ₁	P ₁	P ₄	×	×	×	P ₁	U ₂	U ₁	×	P ₁	2	1	×
U ₂	P ₃	P ₁	P ₄	P ₂	P ₅	P ₂	U ₃	U ₂	×	P ₂	×	2	1
U ₃	P ₃	P ₂	×	×	×	P ₃	U ₂	U ₃	×	P ₃	×	1	2
						P ₄	U ₂	U ₁	×	P ₄	2	1	×
						P ₅	U ₂	×	×	P ₅	×	1	×

Table 8. Completion times for the process of Fig. 6(a) and Fig. 6(b)

C_{ij}				\Rightarrow	C_{ij}			
	U_1	U_2	U_3			U_1	U_2	U_3
P_1	25	18	\times		P_1	25	18	\times
P_2	\times	40	34		P_2	\times	40	34
P_3	\times	12	20		P_3	\times	12	20
P_4	36	32	\times		P_4	36	32	\times
P_5	\times	52	\times		P_5	\times	52	\times

Completion times for the process of Fig. 6(b). Completion times for the initial process in Fig. 6(a)

를 풀더라도 수학적 Formulation에 의한 Optimal Solution을 찾기는 어렵고 문제풀이조차 힘들 수 있는 크기의 문제가 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위해 비록 최적해를 보장하지는 못하지만 매우 효과적인 최적화 방법으로 인정되고 있는 Genetic Algorithm을

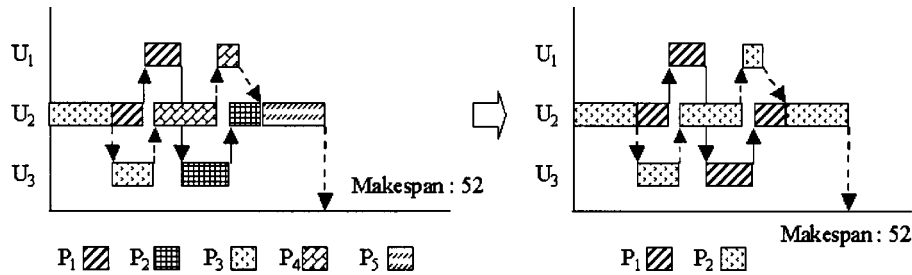


Fig. 7. Gantt chart for the result of example process 2.

다목적 회분식공정에 적합하도록 적절히 개발하여 사용하였고, 개발된 GA로 몇몇 문제를 풀이해 보았다.

최근 combinatorial 최적화 문제에 대해서 유전 알고리즘이 매우 효과적인 최적화 알고리즘으로 각광받고 있다[27]. Jung[1] 등은 다품종 회분식공정에서 makespan의 최소화의 생산계획문제를 유전알고리즘을 이용하여 풀었고, 그 결과 RAES(Rapid Access Extensive Search)[22]와 SA(Simulated Annealing)[23]보다 우수한 결과를 나타내었으며 지금까지 가장 효과적이고 강건한 알고리즘이라는 것을 보여주었다. 유전 알고리즘은 재생, 교배 돌연변이의 3가지 기본연산자와 몇 가지 고급연산자들로 구성된다. 재생 연산자는 각 개체의 적합도에 비례하여 다음 세대에 그들의 유전형질을 가진 자손을 재생 또는 복제하는 연산자이다. 교배연산자는 자손에게 부모의 유전형질을 합성하여 더 나은 자손을 생산하는 연산자이고, 돌연변이 연산자는 무작위로 개체의 유전자를 변형시키는 연산자이다. 최적화 알고리즘에서 교배연산자는 지역 탐색을 수행하고 돌연변이 연산자는 uphill movement를 가능하게 함으로써 지역탐색으로 인한 국부 최소값을 극복하여 전체 최적해를 구할 수 있게 한다. 이 유전 알고리즘이 다른 최적화 알고리즘에 비해 두드러진 특징은 병렬탐색기법을 이용한다는 것과 제약조건에 대한 영향을 적게 받는다는 것이다.

본 논문에서는 Jung[1] 등의 Genetic Algorithm을 기본 골격으로 하여 십진열과 sigmoid 적합도 함수를 기초로 재생 연산자로서 채택했고 교배 연산자에 대해서는 PMX(Partially Matched-up Exchanger)와 OX(Ordered Exchanger)를 교대로 사용했다. 상세한 GA 알고리즘은 Jung[1] 등에 나타나 있으며 본 논문에서는 본 논문을 위해 개선된 GA의 module들과 핵심적 module들의 내용만을 간략히 나타내기로 하였다.

재생 연산자는 자연도태의 인위적 개념으로서 구세대로부터 부모를 선택하고 새로운 개체를 생성하는 선택절차이다. 이 연산자에 대해 비대체 추계론적 잔류선택(Goldberg[25])을 사용했다. 재생산에서 복사본

의 개수의 조절이 특히 중요하다. GA를 진행해 나감에 따라 개체 평균 적합도는 개체 최적 적합도에 가까워진다. 이런 이유로 적합도 스케일링이 필요하고 sigmoid 스케일링이 개발됐다. Sigmoid 스케일링은 식 (5)에 나타냈고 이 식에서 가로축은 적합도와 평균적합도의 편차($f - f_{avg}$)이고 세로축은 스케일링 적합도(f')다. 여기서 λ 는 스케일링 적합도의 최대값을 결정하는 기울기이고 f'_{max} 는 기울기를 결정하기 위해 고정된다. 그리고 f'_{max} 는 대개 1.2와 1.9사이의 범위에 있다. 본 논문에서 f'_{max} 는 모든 문제에 대해 1.5의 값을 가진다.

$$f' = \frac{2}{1 + \exp[-(\lambda \cdot x)]} \quad \lambda = -\frac{\log[(2 - f'_{max})/f'_{max}]}{x_{max}} \quad (5)$$

교배연산자는 부모의 적합도보다 더 나은 적합도를 가진 자손을 생산하기 위해 부모의 정보를 부분적으로 교환하는 것이다. 본 논문에서 Goldberg와 Lingle[26]의 PMX와 Davis의 OX를 사용했고 각각의 교배 연산에 의해 십진코드로 구성된 두 자손을 생성했다. 단순 교배연산에서 두 개의 선택된 부모는 한번의 교배로 두 개의 자손을 생성했다. 이 단순교배는 우등과 열등의 두 자손을 생산한다. 더 나은 자손을 보장하기 위해 우수한 강과 정책을 개발했다. 이 정책에서, 두 부모가 두 개의 교배연산자에 의해 두 자손을 생성할 때, PMX와 OX 두 개 각각에서 다른 것보다 나은 자손이 선택된다. 전체 과정을 조합하면 다음과 같다.

- 1 단계: 교배 위치를 무작위로 선택
- 2 단계: PMX에 의해 두 자손 생성
- 3 단계: 두 개중 우수한 자손 선택
- 4 단계: 교배 위치를 무작위로 선택
- 5 단계: OX에 의해 두 자손 생성
- 6 단계: 두 개중 우수한 자손 선택

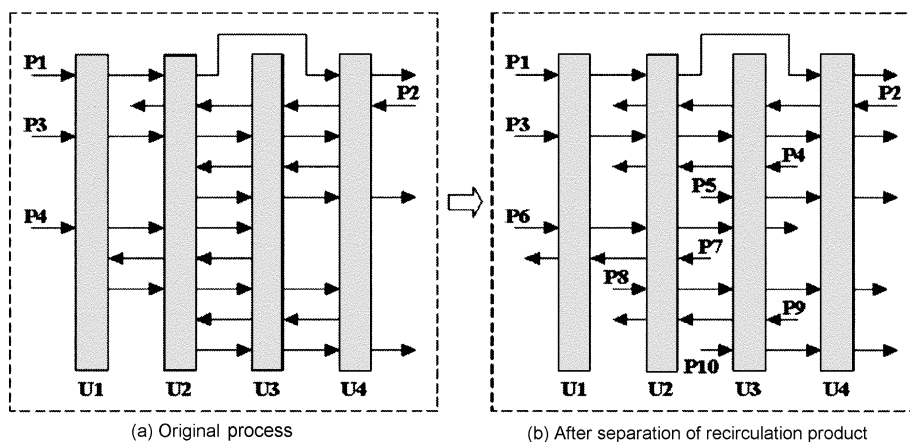


Fig. 8. Schematic diagram of example process 3.

돌연변이 연산자는 무작위로 선택된 열의 위치에 있는 값을 변화시킨다. 열의 위치에 있는 값은 십진열 표현에서 쌍 상호교환에 의해 변이된다. 이러한 단순 상호교환 돌연변이 연산자는 너무 외란이 커서 유전자의 구조를 크게 변경시키기 때문에 외란을 줄이도록 하는 방안으로 인접상호교환과 슬라이딩 상호교환을 돌연변이 연산자로 제안한다. 이 연산자들은 본 논문의 실험에서 쌍 상호교환보다 우수했다. 그래서 돌연변이 방법으로 인접 상호교환과 슬라이딩 상호교환의 조합을 선택

했다.

GA의 성능을 향상시키기 위해 De Jong[24]이 제안한 *elitist model*, *expected value model*, *elitist expected value model*과 *crowding factor model* 등을 사용하였다. 특히 Crowding Factor 모델의 경우, 비슷한 염색체를 선택하기 위한 방법으로 Crowding sub-population의 값은 3, Crowding Factor는 2를 사용했다.

Table 9. Set value of parameter for example process 3

P_{jk}		1_{st}	2_{nd}	3_{rd}	4_{th}	5_{th}	6_{th}	7_{th}	8_{th}
	U_1	P_1	P_3	P_6	P_7	\times	\times	\times	\times
	U_2	P_1	P_3	P_6	P_2	P_4	P_7	P_8	P_9
	U_3	P_2	P_3	P_4	P_6	P_5	P_8	P_9	P_{10}
	U_4	P_2	P_1	P_3	P_8	P_{10}	P_5	\times	\times

R_p	0	0	0	P_3	P_4	0	P_6	P_7	P_8	P_9	
-------	---	---	---	-------	-------	---	-------	-------	-------	-------	--

L_p	U_4	U_2	U_4	U_2	U_4	U_3	U_1	U_4	U_2	U_4	
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--

T_{ij}					O_{ij}					U_{im}					A_{ip}								
	U_1	U_2	U_3	U_4			U_1	U_2	U_3	U_4			1_{st}	2_{nd}	3_{rd}	4_{th}			U_{01}	U_{12}	U_{23}	U_{34}	U_{45}
P_1	10	20		30		P_1	1	2		3		P_1	U_1	U_2	U_4	\times		P_1	4	3	6	\times	\times
P_2	\times	30	35	15		P_2	\times	3	2	1		P_2	U_4	U_3	U_2	\times		P_2	3	5	2	\times	\times
P_3	40	35	15	10		P_3	1	2	3	4		P_3	U_1	U_2	U_3	U_4		P_3	6	5	7	\times	\times
P_4	\times	25	20			P_4	\times	2	1	\times		P_4	U_3	U_2	\times	\times		P_4	3	3	6	\times	\times
P_5	\times	\times	35	40		P_5	\times	\times	1	2		P_5	U_3	U_4	\times	\times		P_5	6	7	9	\times	\times
P_6	15	10	20	\times		P_6	1	2	3	\times		P_6	U_1	U_2	U_3	\times		P_6	7	6	5	\times	\times
P_7	30	35	\times	\times		P_7	2	1	\times	\times		P_7	U_2	U_1	\times	\times		P_7	4	4	6	\times	\times
P_8	\times	20	20	30		P_8	\times	1	2	3		P_8	U_2	U_3	U_4	\times		P_8	6	5	6	\times	\times
P_9	\times	15	25	\times		P_9	\times	2	1	\times		P_9	U_3	U_2	\times	\times		P_9	4	7	9	\times	\times

Set-Up Time on 1st Unit											Set-Up Time on 2nd Unit											
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}			P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
P_1	\times	\times	5	\times	\times	8	8	\times	\times	\times	P_1	\times	3	4	4	\times	5	5	5	5	\times	
P_2	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_2	3	\times	6	6	\times	7	7	7	7	\times	
P_3	5	\times	\times	\times	\times	7	7	\times	\times	\times	P_3	4	6	\times	\times	\times	4	4	4	4	\times	
P_4	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_4	4	6	\times	\times	\times	4	4	4	4	\times	
P_5	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_5	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_6	8	\times	7	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_6	5	7	4	4	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_7	8	\times	7	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_7	5	7	4	4	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_8	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_8	5	7	4	4	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_9	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_9	5	7	4	4	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_{10}	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_{10}	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	

Set-Up Time on 3rd Unit											Set-Up Time on 4th Unit											
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}			P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
P_1	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_1	\times	2	3	\times	3	\times	\times	\times	6	\times	\times
P_2	\times	\times	3	3	3	4	\times	4	4	4	P_2	2	\times	4	\times	4	\times	\times	\times	5	\times	\times
P_3	\times	3	\times	\times	\times	5	\times	5	5	5	P_3	3	4	\times	\times	\times	\times	\times	\times	7	\times	\times
P_4	\times	3	\times	\times	\times	5	\times	5	5	5	P_4	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_5	\times	3	\times	\times	\times	5	\times	5	5	5	P_5	3	4	\times	\times	\times	\times	\times	\times	7	\times	
P_6	\times	4	5	5	5	\times	\times	\times	\times	\times	P_6	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_7	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	P_7	6	5	7	\times	7	\times	\times	\times	\times	\times	
P_8	\times	4	5	5	5	\times	\times	\times	\times	\times	P_8	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_9	\times	4	5	5	5	\times	\times	\times	\times	\times	P_9	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	\times	
P_{10}	\times	4	5	5	5	\times	\times	\times	\times	\times	P_{10}	6	5	7	\times	7	\times	\times	\times	\times	\times	

5. GA에 의한 최적생산계획 예제들

5-1. 예제 3(최적생산계획)

최적의 조업순서를 찾기 위해 Fig. 8과 같은 공정을 고려하여 보자. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 제품 P_3 과 P_4 는 재순환 제품임을 알 수 있다. 이러한 재순환 제품의 재순환 특성을 소거해 주면 Fig. 8(b)와 같이 Fig. 8(a)의 P_3 은 Fig. 8(b)의 $[P_3-P_4-P_3]$ 로, P_4 는 $[P_6-P_7-P_8-P_9-P_{10}]$ 로 분류된다.

본 연구에서 제시한 단계에 따라 주어진 다목적 회분식공정에 대한 변수들을 Table 9와 같이 설정한다. 이 예제의 경우는 수송시간과 준비시간을 고려한 것으로써 재순환 제품인 Fig. 8(a)의 P_3 이 분리된 제품인 Fig. 8(b)의 $[P_3-P_4-P_3]$ 들은 동일한 제품이므로 당연히 제품간의 준비시간이 없고, 수송시간은 현재 제품의 상위제품이 각 장치를 거쳐 다 처리되고 난 뒤 나가는 데 걸리는 수송시간이 곧 그 제품이 처음 처리되는 장치로 들어오는 수송시간과 동일하므로 즉, 한 예로써 Fig. 8(b)의 P_3 가 U_4 에서 처리된 후 나가는 시간과 P_4 가 처음으로 처리되기 위해 U_3 로 들어오는 시간을 동일하게 설정한다. 마찬가지로 다른 재순환 제품에서 분리된 제품들에 대해서 같은 조건으로 설정해 주면 Table 9에 나타나 있는 준비시간(Set-up Times)과 같이 나타난다. 또한 이 예제에서는 알고리즘이 일반적인 상황에서도 적용되는 것을 보여주기 위해 재순환 제품이 분리된 제품이라든가 각 장치에서의 처리시간을 각각 다르게 주고 수송시간과 준비시간을 고려한 식 (4)를 이용하여 조업완료시간을 계산한다.

GA를 이용하여 최적의 조업순서를 찾기 위해 초기의 조업순서를 임의로 Table 9의 P_{jk} 와 같이 만들고 그 일부분을 무작위로 인접상호교환을 해서 조업순서를 변화시켜 개체수만큼의 조업순서를 만든다. 여기서 개체수와 돌연변이 확률은 문제의 크기에 맞게 적절히 선택해야 GA의 최적값을 찾는 성능이 보다 향상될 것으로 생각하는데 이에 대한 연구가 좀더 진행되어야 할 것이다. 이렇게 만든 각 개체들에 대한 조업완료시간, 즉 개체의 Fitness를 식 (4)의 알고리즘으로 계산한다. 그런 후 GA로 계산한 결과, 세대를 거듭하면서 더 나은 최적의 조업순서를 찾을 수 있었고, 그 결과를 Table 10에 나타내었다. Table 10은 계산된 조업완료시간을 초기의 공정도에 맞게 재설정하는 것을 나타내고 Optimal Sequence P_{jk} 를 보여준다.

Table 10의 최적의 조업순서와 조업완료시간을 가지고 Fig. 8의 공정에 대한 Gantt Chart를 Fig. 9에 나타내었다.

여기서 막대 안의 숫자는 제품을 의미한다. Fig. 9는 재순환 제품에서 분리된 제품인 Fig. 9(a)의 $[P_3-P_4-P_3]$ 와 $[P_6-P_7-P_8-P_9-P_{10}]$ 을 원래의 재순환 제품인 Fig. 9(b)의 P_3 과 P_4 로 재설정하는 것을 보여준다. 점선으로 나

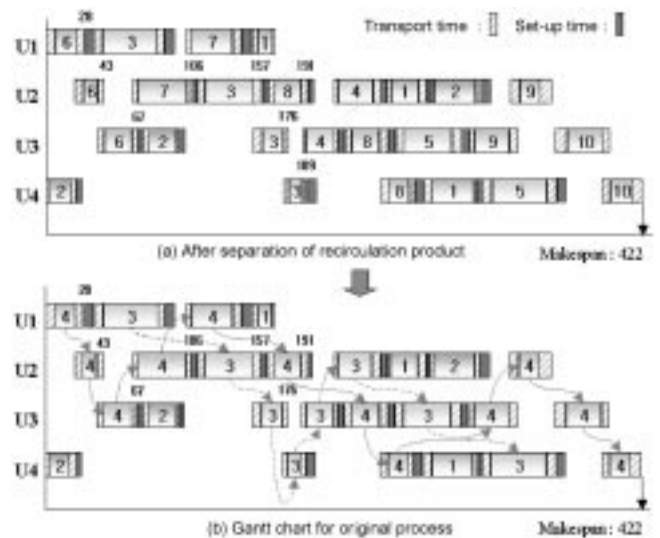


Fig. 9. Gantt chart for the result of example process 3.

타낸 것은 P_3 의 처리경로이고, 실선으로 나타낸 것은 P_4 의 처리경로이다.

5-2. 예제 4(최적생산계획)

Fig. 10은 전자산업에서 흔히 볼 수 있는 유형의 공정으로써 여러 개의 재순환 제품으로 이루어진 다목적 회분식공정의 예이다. 이 공정에서 Fig. 10(a)의 P_1, P_2, P_3, P_4 는 모두 재순환 제품들로서 Fig. 10(b)처럼 재순환의 성질을 소거한다. 즉 Fig. 10(a)의 P_1 은 Fig. 10(b)의 $[P_1-P_2-P_3]$ 으로 분류되고, P_2 는 $[P_4-P_5]$ 로, P_3 은 $[P_6-P_7-P_8-P_9]$ 로, P_4 는 $[P_{10}-P_{11}-P_{12}-P_{13}-P_{14}-P_{15}-P_{16}]$ 으로 각각 분류된다. 이 예제의 경우 수송시간과 준비시간을 고려한 식 (4)를 사용하여 조업완료시간을 계산하였다.

본 연구에서 제시한 단계에 따라 주어진 다목적 회분식공정에 대한 변수들을 Table 11과 같이 설정한다. 이 예제의 경우도 수송시간과 준비시간을 고려한 것으로써 예제 3과 같이 재순환 제품에 대해 수송시간과 준비시간을 설정한다.

예제 3과 같이 조업완료시간 알고리즘(식 4)과 GA로 계산된 조업완료시간과 최적의 조업순서를 Table 12에 나타내었다.

Table 12의 최적의 조업순서와 조업완료시간을 가지고 Fig. 10의 공정에 대한 Gantt chart를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11의 Gantt chart의 조업순서는 Table 12의 Optimal Sequence P_{jk} 값을 나타낸다. 여기서

Table 10. Completion times and optimal sequence for the process of Fig. 8(a) and Fig. 8(b)

C_{ij}					\Rightarrow	C_{ij}					Optimal Sequence P_{jk}								
	U_1	U_2	U_3	U_4			U_1	U_2	U_3	U_4		1 _{st}	2 _{nd}	3 _{rd}	4 _{th}	5 _{th}	6 _{th}	7 _{th}	8 _{th}
P_1	167	276	\times	327		P_1	167	276	\times	327	U_1	P_6	P_3	P_7	P_1	\times	\times	\times	\times
P_2	\times	315	113	23		P_2	\times	315	113	23	U_2	P_6	P_7	P_3	P_8	P_4	P_1	P_2	P_9
P_3	86	157	176	189		P_3	86	157	176	189	U_3	P_6	P_2	P_3	P_4	P_8	P_5	P_9	P_{10}
P_4	\times	243	212	\times		\times	\times	243	212	\times	U_4	P_2	P_3	P_8	P_1	P_5	P_{10}	\times	\times
P_5	\times	\times	301	386		\times	\times	\times	301	386	Makespan=422								
P_6	28	43	67	\times		P_4	28	43	67	\times									
P_7	142	106	\times	\times		\times	142	106	\times	\times									
P_8	\times	192	248	282		\times	\times	192	248	282									
P_9	\times	366	342	\times		\times	\times	366	342	\times									
P_{10}	\times	\times	397	422		\times	\times	397	422	\times									

Completion times for the process of Fig. 8(b). Completion times for the initial process in Fig. 8(a)

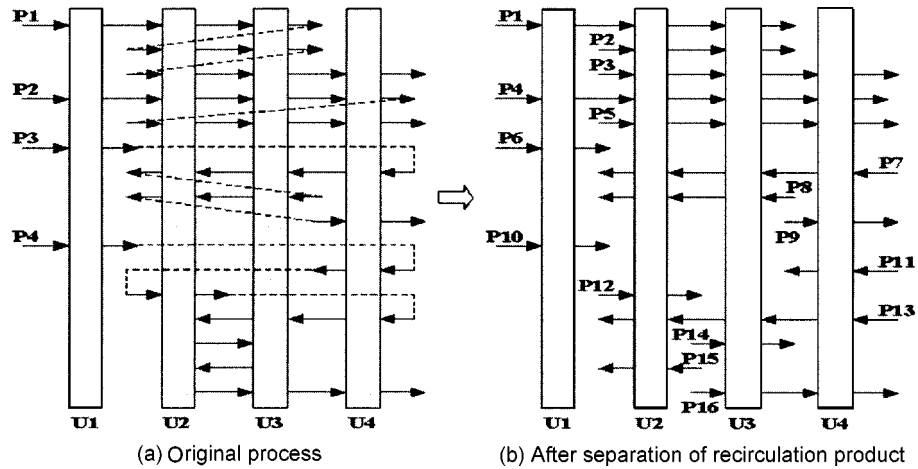


Fig. 10. Schematic diagram of example process 4.

Table 11. Set value of parameter for example process 4

P_{jk}		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th	10 th	11 th	12 th	13 th	14 th	15 th	16 th
	U_1	P_4	P_{10}	P_6	P_1												
	U_2	P_4	P_1	P_5	P_2	P_7	P_3	P_{12}	P_8	P_{13}	P_{15}						
	U_3	P_7	P_1	P_4	P_2	P_5	P_{13}	P_8	P_{14}	P_3	P_{16}						
	U_4	P_{11}	P_4	P_7	P_5	P_9	P_{13}	P_{16}	P_3								

R_p	0	P_1	P_2	0	P_4	0	P_6	P_7	P_8	0	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}
L_p	U_3	U_3	U_4	U_4	U_4	U_1	U_2	U_2	U_4	U_1	U_4	U_2	U_2	U_3	U_2	U_4

	T_{ij}					O_{ij}					U_{im}					A_{ip}				
	U_1	U_2	U_3	U_4		U_1	U_2	U_3	U_4		1 st	2 nd	3 rd	4 th		U_{01}	U_{12}	U_{23}	U_{34}	U_{45}
P_1	5	10	10		P_1	1	2	3		P_1	U_1	U_2	U_3		P_1	3	4	3	5	
P_2		5	15		P_2		1	2		P_2	U_2	U_3			P_2	5	3	3		
P_3		5	5	7	P_3		1	2	3	P_3	U_2	U_3	U_4		P_3	3	4	6	3	
P_4	15	5	10	5	P_4	1	2	3	4	P_4	U_1	U_2	U_3	U_4	P_4	5	3	5	5	6
P_5		8	5	4	P_5		1	2	3	P_5	U_2	U_3	U_4		P_5	6	3	3	4	
P_6	7				P_6	1				P_6	U_1				P_6	5	4			
P_7		15	10	5	P_7		3	2	1	P_7	U_4	U_3	U_2		P_7	4	3	4	2	
P_8		5	7		P_8		2	1		P_8	U_3	U_2			P_8	2	5	3		
P_9				10	P_9				1	P_9	U_4				P_9	3	5			
P_{10}	5				P_{10}	1				P_{10}	U_1				P_{10}	5	3			
P_{11}				15	P_{11}				1	P_{11}	U_4				P_{11}	3	4			
P_{12}		5			P_{12}		1			P_{12}	U_2				P_{12}	4	3			
P_{13}		15	10	7	P_{13}		3	2	1	P_{13}	U_4	U_3	U_2		P_{13}	3	5	5	4	
P_{14}			15		P_{14}			1		P_{14}	U_3				P_{14}	4	3			
P_{15}		10			P_{15}		1			P_{15}	U_2				P_{15}	3	6			
P_{16}			5	10	P_{16}			1	2	P_{16}	U_3	U_4			P_{16}	6	5	3		

막대 안의 숫자는 제품을 의미한다.

재순환 제품에서 분리된 제품인 Fig. 11(a)의 $[P_1-P_2-P_3]$, $[P_4-P_5]$, $[P_6-P_7-P_8-P_9]$, $[P_{10}-P_{11}-P_{12}-P_{13}-P_{14}-P_{15}-P_{16}]$ 을 원래의 재순환 제품인 Fig. 11(b)의 P_1 , P_2 , P_3 , P_4 로 재설정 한 것을 보여준다. 선으로 나타낸 것은 재순환 제품 P_4 의 처리경로를 나타낸다.

6. 결 론

최근 회분식공정은 다품종 소량생산의 요구에 보다 유연히 대처할 수 있는 다목적 회분식공정으로의 전환이 두드러지고 있으나 기존의 다품종 회분식공정을 다목적 공정으로 사용하는 운전방식과 최적조업의 연구가

Table 11. Continued

Set-Up Time on 1st Unit																
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆
P ₁				3		4				2						
P ₂																
P ₃																
P ₄	2					5				3						
P ₅																
P ₆	3			3						5						
P ₇																
P ₈																
P ₉																
P ₁₀	5			4		3										
P ₁₁																
P ₁₂																
P ₁₃																
P ₁₄																
P ₁₅																
P ₁₆																
Set-Up Time on 2nd Unit																
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆
P ₁				4	4		3	3				5	5		5	
P ₂				4	4		3	3				5	5		5	
P ₃				4	4		3	3				5	5		5	
P ₄	3	3	3				2	2				4	4		4	
P ₅	3	3	3				2	2				4	4		4	
P ₆																
P ₇	2	2	2	5	5							3	3		3	
P ₈	2	2	2	5	5							3	3		3	
P ₉																
P ₁₀																
P ₁₁																
P ₁₂	3	3	3	4	4		2	2								
P ₁₃	3	3	3	4	4		2	2								
P ₁₄																
P ₁₅	3	3	3	4	4		2	2								
P ₁₆																
Set-Up Time on 3rd Unit																
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆
P ₁				2	2		3	3					4	4		4
P ₂				2	2		3	3					4	4		4
P ₃				2	2		3	3					4	4		4
P ₄	4	4	4				3	3					3	3		3
P ₅	4	4	4				3	3					3	3		3
P ₆																
P ₇	2	2	2	5	5								2	2		2
P ₈	2	2	2	5	5								2	2		2
P ₉																
P ₁₀																
P ₁₁																
P ₁₂																
P ₁₃	3	3	3	4	4		2	2								
P ₁₄	3	3	3	4	4		2	2								
P ₁₅																
P ₁₆	3	3	3	4	4		2	2								

Table 11. Continued

Set-Up Time on 4th Unit																
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆
P ₁																
P ₂																
P ₃				4	4		5		5		3		3			3
P ₄			3				4		4		2		2			2
P ₅			3				4		4		2		2			2
P ₆																
P ₇			4	3	3						4		4			4
P ₈																
P ₉			4	3	3						4		4			4
P ₁₀																
P ₁₁			5	4	4		3		3							
P ₁₂																
P ₁₃			5	4	4		3		3							
P ₁₄																
P ₁₅																
P ₁₆			5	4	4		3		3							

Table 12. Completion times and optimal sequence for the process of Fig. 10(a) and Fig. 10(b)

C _{ij}						C _{ij}				
	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄			U ₁	U ₂	U ₃	U ₄
P ₁	12	25	40		⇒	P ₁	12	25	40	
P ₂		48	83					48	83	
P ₃		184	206	216				184	206	216
P ₄	58	68	105	116		P ₂	58	68	105	116
P ₅		127	163	171				127	163	171
P ₆	32					P ₃	32			
P ₇		91	60	40				91	60	40
P ₈		142	122					142	122	
P ₉				157						157
P ₁₀	74					P ₄	74			
P ₁₁				93						93
P ₁₂		106						106		
P ₁₃		169	148	133				169	148	133
P ₁₄			188						188	
P ₁₅		208						208		
P ₁₆			224	239					224	239

Completion times for the process of Fig. 10(b). Completion times for the initial process in Fig. 10(a)

Optimal Sequence P _{jk}																
	1 _{st}	2 _{nd}	3 _{rd}	4 _{th}	5 _{th}	6 _{th}	7 _{th}	8 _{th}	9 _{th}	10 _{th}	11 _{th}	12 _{th}	13 _{th}	14 _{th}	15 _{th}	16 _{th}
U ₁	P ₁	P ₆	P ₄	P ₁₀												
U ₂	P ₁	P ₂	P ₄	P ₇	P ₁₂	P ₅	P ₈	P ₁₃	P ₃	P ₁₅						
U ₃	P ₁	P ₇	P ₂	P ₄	P ₈	P ₁₃	P ₅	P ₁₄	P ₃	P ₁₆						
U ₄	P ₇	P ₁₁	P ₄	P ₁₃	P ₉	P ₅	P ₃	P ₁₆								

Makespan=239

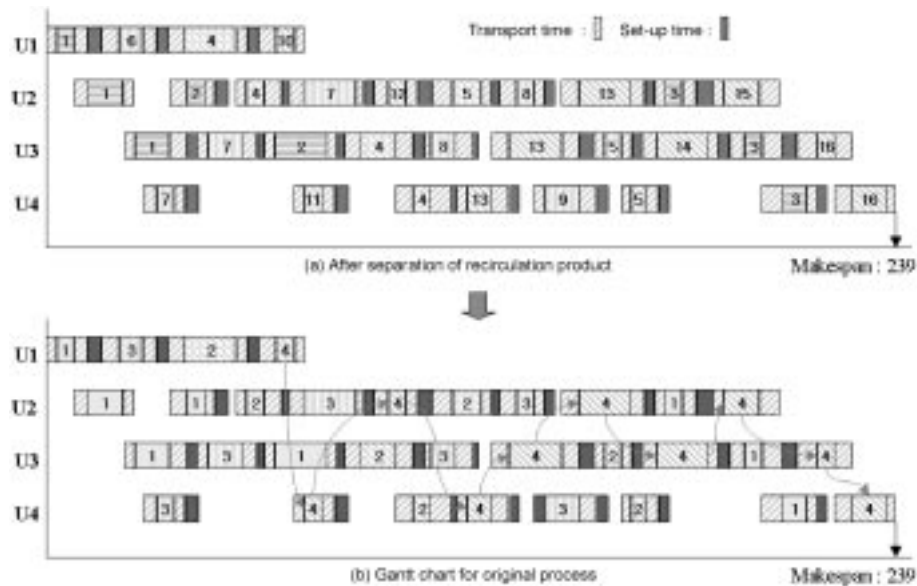


Fig. 11. Gantt chart for the result of example process 4.

미비하였다. 최근 박과 정 [13]이 비순차 다목적 회분식공정의 조업완료시간 알고리즘을 순환 수식으로 표현한 논문을 발표하였다. 하지만 그들이 제시한 알고리즘은 전자산업이나 화공산업 중에서 무배관 공정과 같은 장치에서 빈번히 발생할 수 있는 재순환 제품은 고려하지 않았다. 본 연구에서는 재순환 제품을 포함하는 다목적 회분식공정의 최적조업을 가능하게 하는 단일 장치로 구성된 다목적 공정에서의 조업완료시간 결정 알고리즘을 수식으로 표현하였다. 물론 본 연구에서 제시한 조업완료시간 알고리즘은 주어진 종료조건 내에서 makespan을 계산하지 못할 경우를 불가능한 조업 순서로 규정하는 등 그 기본 골격은 박과 정 [13]의 연구내용을 대체로 받아들였다. 그러나 박과 정 [13]에서 다루지 못한 Set-up time과 Transfer를 모두 고려하는 등 보다 완성도 높은 연구결과를 제시하였다. 향후 전자산업에서의 생산계획 문제가 매우 큰 관심의 대상이 될 것이고, 이 분야산업에 적용될 수 있는 재순환 제품의 생산 완료 결정 및 계획의 기초적 연구를 제시하였다는 점에서 본 연구는 큰 의의가 있다고 하겠다. 조업완료시간 결정 알고리즘이 중요한 이유는 조업자 임의의 re-scheduling이나, monitoring이 포함된 scheduling s/w package를 만드는데 매우 용이한 tool이 된다는 것과 수학적 모델링 또는 random search 등 최적화 기법의 어느 것으로도 확장이 용이하다는 점이다. 그래서 본 연구의 결과는 향후 많은 연구자들의 후속 연구에 도움을 줄 수 있고 이에 따른 이 분야의 연구가 활발히 일어날 것으로 기대된다. 나아가 본 연구에서는 다목적 단일 장치열에서 재순환 제품을 갖는 생산계획 문제의 최적해를 풀기 위해 GA를 개발하였고, 이 문제에 적용시켜 보았다. 일반적으로 재순환 제품들은 순환 횟수만큼이 제품으로 분리되어야 하므로 보통 50-150개의 제품을 생산하는 문제가 된다. 그래서 본 연구에서는 GA를 개발하였고 몇 가지 문제에 대해 풀이해 본 결과 매우 합리적 계산시간 내에 우수한 해답을 얻었다. 본 연구에서는 UIS 중간저장조 정책을 사용하였으나 향후 본 연구는 보다 다양한 중간저장조 정책을 사용하고, 전자산업의 공정조업 형태를 면밀히 분석하여 현실적인 모델과 최적생산계획 tool로서의 완성도있는 package를 구축하는 것을 목표로 계속 연구가 진행될 것이다.

감 사

본 논문은 1998년도 과학재단 지원의 특정기초연구과제(98-0502-05-01-3)와 영남대학교 1999년 교비 자유공모과제에 의해 이루어진 것으로

연구비 지원에 감사드립니다.

사용기호

- C_{ij} : completion time of i product on j unit
 t_{ij} : processing time of i product on j unit
 U_{im} : unit at which i product was processed m th
 O_{ij} : order of i product on j unit
 P_{jk} : product which is processed k th on j unit
 A_{ip} : time that i product is transferred from p th unit to $p+1$ th unit
 $S_{i,i+1,j}$: set-up time between i product and $i+1$ product on j unit
 R_i : upper product of i product
 L_i : last unit on which i product was processed

참고문헌

1. Jung, J. H., Lee, C. H. and Lee, I.: *Comput. Chem. Engng.*, **22**, 1725(1998).
2. Ha, J. K., Lee, B. S., Lee, I. B. and Lee, E. S.: *HWAHAK KONG-HAK*, **36**, 813(1998).
3. Hasebe, S. and Hashimoto, I.: *Proc. 4th Intl. Symp. on Proc. Systems Engng.*, Canada(1991).
4. Johnson, S. M.: *Naval Research Logistics Quarterly*, **1**, 1(1954).
5. Jung, J. H., Lee, H. and Lee, I. B.: *Comput. Chem. Engng.*, **20**, 845 (1996).
6. Jung, J. H., Lee, H., Yang, D. R. and Lee, I. B.: *Comput. Chem. Engng.*, **18**, 537(1994).
7. Kim, H. J., Jung, J. H., Kim, M. and Lee, I. B.: *Korean J. Chem. Eng.*, **14**, 225(1997).
8. Kim, M., Jung, J. H. and Lee, I.: *Comput. Chem. Engng.*, **20**, s1149(1996).
9. Kondili, E., Pentelides, C. C. and Sargent, R. W. H.: *Comput. Chem. Engng.*, **17**, 229(1993).
10. Ku, H. M. and Karimi, I.: *Comput. Chem. Engng.*, **14**, 49(1990).
11. Lee, I. B., Jung, J. H., Yang, D. R. and Chang, K. S.: *FOCAPO '93*, U.S.A.(1993).

12. Niwa, T.: Proc. Fourth Intl. Symp. on Proc. Systems Engng, Montebello, Canada(1991).
13. Park, S. and Jung, J. H.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 411(1999).
14. Park, S. and Jung, J. H.: *Comput. Chem. Engng.*, **23**, s543(1999).
15. Raimon Grau, Antonio Espuna and Luis Puigjaner: *Comput. Chem. Engng.*, **20**, s1143(1996).
16. Rajagopalan, D. and Karimi, I. A.: *Comput. Chem. Engng.*, **13**, 175 (1989).
17. Voudouris, V. T. and Grossmann, I. E.: *Comput. Chem. Engng.*, **20**, 1335 (1996).
18. Wiede Jr, W., Kuriyan, K. and Reklaitis, G. V.: *Comput. Chem. Engng.*, **11**, 337(1987).
19. Wiede Jr, W. and Reklaitis, G. V.: *Comput. Chem. Engng.*, **11**, 345 (1987).
20. Wiede Jr, W. and Reklaitis, G. V.: *Comput. Chem. Engng.*, **11**, 357 (1987).
21. Yamalidou, E. C., Patsidou, E. P. and Kantor, J. C.: *Comput. Chem. Engng.*, **14**, 281(1990).
22. Dannenbring, D. G.: *Mgmt. Sci.* **23**(11), 1174(1997).
23. Davis, L.: "Genetic Algorithms and Simulated Annealing," Pitman, London(1987).
24. De Jong, K. A.: "Genetic Algorithms: a 10year Perspective," Proc. int. Conf. on Genetic Algorithm and Their Application, 210(1995).
25. Goldberg, D. E.: "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning," Addison-Wesley Reading, MA(1989).
26. Goldberg, D. E. and Lingle, R.: "Alleles, Loei, and the Traveling Salesman Problem," Proc. Int. Conf. on Genetic Algorithm and their Application, 154(1985).
27. Holland, J.: "Adaptation in Natural and Artificial Systems," University of Michigan Press, MI(1975).