Journal of the Korean Institute
of Industrial Engineers
Vol.24, N0.4, December, 1998

대체 공정을 도입한 유전 알고리즘 응용의 작업 일정 계획

A Genetic Algorithm Approach to Job Shop Scheduling Considering Alternative Process Plans

박지형* · 최회련* · 김영휘**

Ji-Hyung Park* · Hoeryeon Choi* · Younghui Kim**

Abstract

In this paper, a job shop scheduling system is developed which can cope with the changes of shop floor status with flexibility. This system suggests near optimal sequence of operations by using Genetic Algorithm which considers alternative process plans.

The Genetic Algorithm proposed in this paper has some characteristics. The mutation rate is differentiated in order to enhance the chance to escape a local optimum and to assure the global optimum. And it employs the double gene structure to easily make the modeling of the shop floor. Finally, the quality of its solution and the computational time are examined in comparison with the method of a Simulated Annealing.

1. 서론

일정 계획은 공정 계획 정보와 생산 현장의 생산 설비의 가용 정보를 이용하여 제조 작업에 대한 최적의 작업 순서 및 기계 부하를 제공하는 것이다. 그러므로, 본 논문에서는 가급적 외주나 잔업을 거치지 않고 기계의 과부하를 조정하기 위하여 대체 공정을 이용하여 생산 현장의 상황 변화에 보다 유연하게 대처할 수 있는 일정 계획 방법을 제시하고자 한다.[1][8][9] 생산에 있어서 대체 공정 계획이란 다른 제조 방법을 준비하는 것을 의미한다. 즉, 원래의 공정 계획이 요구하고 있는 생산 수단이 전체 보유 자원의 부분 집합일 때, 원래의 공정 계획과 부분적으로 혹은, 완전히 다른 생산 수단을 이용하는 공정 계획을 말한다. 이러한 대체 공정 계획을 이용하는 장점은 하나의 가공품에 하나 이상의 공정 계획을 제시함으로써 작업 현장에서의 상황 변화에 보다 유연하게 대응 가능하다는 데에 있다.

AI기법 중의 하나이며, 자연 진화설을 바탕으로 한 유전 알고리즘은 다수 탐색점을 사용하여, 적절한 다양성(diversity)을 유지하면서 우수한 후보해들 간의 정보를 교환하기 때문에 최적해에 도달할 확률이 높다. 또한, 최적해를 발견하지 못하는 경우에도 이 알고리즘은 좋은 해를 제공할 수 있는 견실성(robustness)도 지니고 있다. 이러한 장점들 때문에 유전 알고리즘은 NP-hard문제에 대한 탐색 방법으로 효율적인 것으로 알려져 있다.[2][3]

이에 따라, 많은 연구자들에 의해 작업 일정 계획의 최

* 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터

** 고려대학교 산업공학과

적화 문제[4][5][6], 조립 라인 밸런싱 문제[7], 기계-부품 군 형성 문제[10], 다중 프로세스 일정 계획 문제[11] 등에 유전 알고리즘을 적용한 연구가 활발히 수행되어 왔다.

따라서, 본 논문에서는 납기를 만족하면서 전 작업 완료 시간(makespan)을 최소로 하는 최적의 작업 순서를 찾는 작업 일정계획문제에 대체 공정계획을 고려하는 유전 알고리즘(genetic algorithms) 적용 연구를 제안한다.

본 논문에서 제안된 유전 알고리즘을 통해 얻은 해의 유용성은 AI기법의 하나인 시뮬레이티드 어닐링 적용의 경우와 비교하여 검증한다.

2. 유전 알고리즘[2]

유전 알고리즘은 탐색과 최적화 문제를 해결하기 위한 방법 중의 하나이며, 생물의 진화 원리로부터 착상을 얻은 일종의 학습 알고리즘이다.

유전 알고리즘의 기본 원리는 다음과 같다. 변수 자체를 표현하는 것이 아니라 변수를 코드화(coding)하여 유전자(gene)를 만든 다음 단일해가 아닌 여러 해들의 집단인 첫 세대를 무작위 발생시키고 이들 중에서 다음 세대를 만들기 위한 부모해들을 선택한다. 우수한 해는 부모해로 선택될 확률이 높다. 일단 선택된 부모해는 유전 알고리즘의 일반적인 연산자인 재생과 교차와 돌연변이를 통해 다음 세대인 자손 세대를 만든다. 이 과정을 유전 집단이 수렴할 때까지 반복한다.

가. 재생(Reproduction)

부모 세대는 현재의 세대로부터 무작위 선택되고, 차세대는 선택된 부모 세대의 유전자 재결합, 교차, 돌연변이를 거쳐 만들어진다.

나. 교차(Crossover)

미지의 해공간에 대한 탐색의 개념에서 볼 때 유전 알고리즘에서는 상호 교차가 탐색의 주된 연산자이다. 두 부모해의 유전 정보를 임의의 위치에서 부분적으로 교환함으로써 새로운 자손해를 생성하도록 하는 조작법이다. 이것은 현재까지 탐색되지 않은 새로운 해공간을 탐색하는 것을 의미한다.

다. 돌연변이(Mutation)

부모해로부터 자손해로 전달되는 특정한 유전 정보에 대하여 무작위적인 변형을 시도함으로써 전체 해집단에서 배제된 새로운 개체를 발생시키거나 진화 과정에서 상실된 특정 유전 정보의 재현을 시도하는 조작 방법이다. 이 방법을 통해 집단의 다양성을 보존한다.

3. 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)

3.1 시뮬레이티드 어닐링의 정의

시뮬레이티드 어닐링은 Kirkpatrik 등에 의해 처음 소개되었으며, 최적화 문제에 적합한 휴리스틱한 방법 중의 하나이다.[12] 시뮬레이티드 어닐링은 기본적으로 힐 클라이밍(Hill Climbing)의 변형된 탐색 방법이다. 금속의 어닐링 과정과 마찬가지로 높은 온도에서는 탐색 공간이 넓고 온도가 떨어짐에 따라 탐색 공간이 줄어든다. 시뮬레이티드 어닐링은 메트로폴리스(Metropolis) 등의 방법을 이용하여 지역해에 빠질 확률이 비교적 적은 장점이 있다.

3.2 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘

일반적으로 메트로폴리스 기준에 따라 현 시스템의 상태가 변화된다. 현 시스템 에너지와 이전 시스템 에너지의 차이를 δ 라고 표시하면, $\delta < 0$ 이면 현 상태를 무조건 받아들인다. 만약 $\delta > 0$ 이면 메트로폴리스 기준에 따라 현상태를 받아 들인다. 메트로폴리스 방법에서 사용되는 기준값은 다음과 같다.[12]

$$\exp(-\delta / K_B T) \quad (1)$$

여기서 T는 온도를 나타내며 K_B는 볼츠만 상수를 의미한다.

다음 그림 1은 시뮬레이티드 어닐링의 일반적인 실행 순서를 나타낸다.

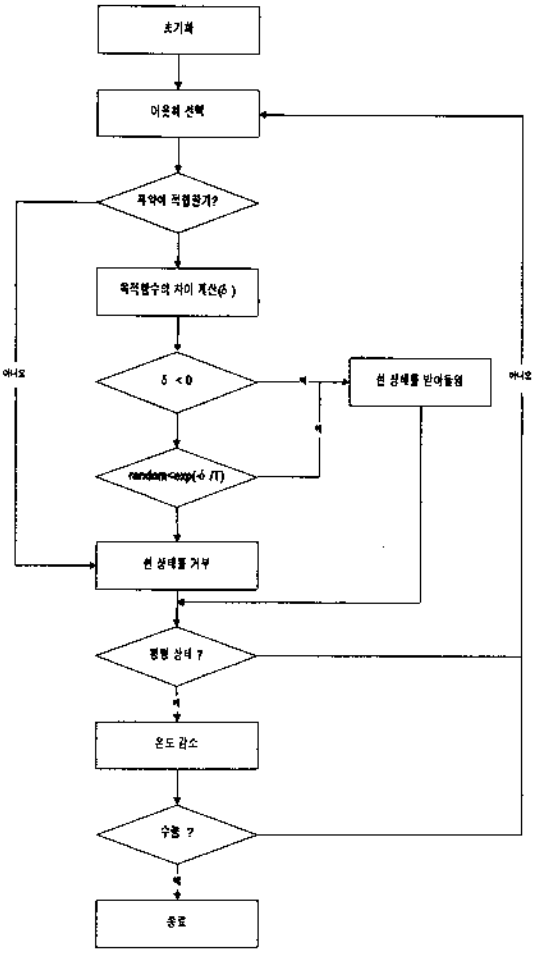

그림 1. 시뮬레이티드 어닐링의 흐름도

4. 유전 알고리즘을 이용한 작업 일정 계획 시스템

본 논문에서 사용된 유전 알고리즘의 특징은 기계 유전자와 우선순위 유전자를 동시에 가지는 이중 스트링 구조를 이용한 것과, 지역해에 빠지는 경우를 줄이고 최적해에 접근할 가능성을 증가시키기 위해 돌연변이를 차등화시킨 데 있다. 또한, 한 세대에서 가장 좋은 해를 발생시킨 개체는 반드시 선택하여 다음 세대로 상속시키는 엘리티즘(elitism)을 이용하였다. 본 논문에서의 목적함수는 전 작업 완료 시간(makespan)의 최소화이며 납기를 고려하여 순수 납기 지연(tardiness)을 발생시키는 작업에 대해서 공정 시간에 벌점(penalty)을 부과하여 그 작업의 일정 생성에 영향을 미치게 하였다.[13] 벌점의 크기는 각 부품의 납기와 마지막 작업 시간을 비교하여 작업의 지연이 발생되면 지연율(penalty rate)을 그 차이에다 곱한 것으로 한다. 목적함수를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{l} \left(\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} p_{kij} X_{kij} + G_k(200 + \partial (L_k - D_k)) \right) \quad (2)$$

P_{kij}는 부품k가 기계 i에서 수행되는 작업 j의 공정 시간을 뜻하며, 작업 j가 기계 i를 사용 하면X_{kij}가 1, 아니면 0으로 한다. 지연이 발생되면 G_k가 1, 아니면 0로 하고, L_k는 부품 k의 전체 공정 시간, D_k는 부품k의 납기를 의미한다. ∂는 지연율을 나타낸다. 본 논문에서는 표 1에서 표시된 납기의 크기를 고려하여 지연율을 0.2로 하였다.

본 논문에서 사용된 적합도 함수는 목적함수와 동일하게 전 작업 완료 시간의 최소화이다.

4.1 실험 대상 시스템

본 논문에서는 대체 공정을 고려하여 job shop 형태의 생산 시스템을 대상으로 실험하였다. 대체 공정을 고려하였기 때문에 표 1과 같이 하나의 작업에 대해 서로 다른 기능을 갖는 모든 기계에서의 작업 시간과 납기를 각각 별도로 부여하였다. 또한, 각 부품에는 납기를 책정하여 순수 납기 지연 계산에 이용하도록 하였다.

표 1. Job shop의 data set

(단위: 분)

부품	작업	수행 시간			납기
		기계1	기계2	기계3	
A	1	15	30	20	1300
	2	25	20	50	
	3	30	70	15	
B	1	20	70	60	900
	2	40	150	20	
	3	80	60	25	
	4	165	25	40	
C	1	60	45	50	1200
	2	120	35	20	
	3	80	120	95	
	4	30	150	80	
	5	50	60	100	

표 1. 계속

D	1	30	65	20	1450
	2	60	175	20	
E	1	30	40	20	1700
	2	50	90	40	
	3	30	70	60	
F	1	25	25	95	2050
	2	90	30	60	
	3	40	50	15	
G	1	30	40	40	1120
	2	50	15	20	
H	1	85	80	55	1900
	2	20	50	110	
	3	20	30	15	
	4	120	40	80	

4.2 Gene 구조

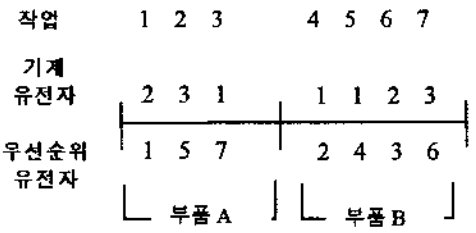

그림 2. 유전자 구조

부품과 작업에 대한 기계 유전자와 우선순위 유전자의 구조는 그림2와 같다. 기계수가 m일 때 기계 유전자를 1에서 m 사이의 정수로 무작위로 발생시킨다. 다만 부품 가공이 모든 기계에서 가능하지 않을 경우에는 대체가 가능하지 않은 기계를 제외하고 무작위로 기계 유전자를 발생시킨다. 표 1에서는 모든 기계가 사용이 가능함을 나타내고 있다. 유전자 길이가 n일 때 우선순위 유전자는 1에서 n 사이의 정수로 중복되지 않게 무작위로 발생시킨다. 같은 부품 내에서는 우선순위 유전자에 관계없이 선행되는 작업에 우선순위를 준다.

4.3 일정 생성 알고리즘

모든 작업에 대한 우선순위를 같은 기계별로 분류하고 비교한다. 선행 작업이 완료된 작업 중에서 우선순위 유전자에 따른 우선순위가 가장 높은 작업을 선택한다. 또한, 선택된 우선순위 유전자와 같은 위치의 기계 유전자에 지정된 기계를 선택한다. 선택된 작업이 속하는 부품의 선행 작업의 종료 시간과 선택된 기계의 선행 작업의 종료 시간을 비교하여 더 늦은 쪽을 선택된 작업의 시작 시간으로 한다. 또한, 이 값에 표 1의 작업 시간을 더한 것을 선택된 작업과 기계의 작업 종료 시간으로 한다. 단, 선택된 기계에서 작업이 수행될 부품이 바뀌거나 선택된 작업이 속하는 부품에서 작업을 수행할 기계가 달라지면 준비 시간(setup time)을 작업 시간에 가산한다.

4.4 유전 알고리즘 연산자

4.4.1 교차(Crossover)

P_1: 1 2 1 | 3 2 1 | 2 3 2 — 기계유전자
1 6 3 | 4 2 8 | 5 7 9 — 우선순위유전자
P_2: 2 3 1 | 2 1 1 | 3 2 1
7 2 4 | 1 3 9 | 8 5 6

P_1, P_2는 부모 유전자를 나타내며, 점선은 부품을 구분하는 선이다. 이렇게 표현된 두 부모의 유전자 배열에서 임의로 두 점을 잡아 기계 유전자와 우선순위 유전자를 교차시킨다.

P_1: 1 2 | 1 3 2 1 | 2 3 2
1 6 | 3 4 2 8 | 5 7 9
P_2: 2 3 | 1 2 1 1 | 3 2 1
7 2 | 4 1 3 9 | 8 5 6

이에 따라, 다음과 같이 자손 유전자가 발생한다.

O_1: 1 2 1 2 1 1 2 3 2
1 6 4 1 3 9 5 7 9
O_2: 2 3 1 3 2 1 3 2 1
7 2 3 4 2 8 8 5 6

O_1에서 중복되는 우선순위 유전자는 O_2에서 중복되는

우선순위 유전자와 바꾼다. 이때 우선순위 유전자와 연결되는 기계 유전자도 함께 바꾼다. 교환되는 유전자는 교차시킨 범위 밖에 있는 유전자를 대상으로 한다. 교차가 완전히 끝난 자손 유전자는 다음과 같다.

O_1: 3 2 1 2 1 1 2 3 3
2 6 4 1 3 9 5 7 8
O_2: 2 1 1 3 2 1 2 2 1
7 1 3 4 2 8 9 5 6

4.4.2 돌연변이(Mutation)

한 점의 기계 유전자와 우선순위 유전자를 돌연변이시킨다. 우선순위 유전자는 중복되지 않게 정해준다. 다음은 돌연변이 예를 보여준다.

P: 3 2 1 2 1 1 2 3 3
2 6 4 1 3 9 5 7 8

임의로 돌연변이값과 돌연변이시킬 유전자의 위치를 발생시킨다. 한 점의 기계 유전자와 우선순위 유전자를 돌연변이시킨다

P: 3 2 1 2 1 1 2 3 3
2 6 4 1 3 9 5 7 8

기계 유전자는 중복이 가능하므로 임의로 발생시킨 유전자를 돌연변이 시킬 위치에 대입시킨다.

우선순위 유전자의 중복을 막기 위해 돌연변이되기 전 유전자와 임의로 발생시킨 유전자를 대소 비교한다. 임의로 발생시킨 유전자가 돌연변이되기 전 유전자보다 작으면 모든 유전자에 다음의 두 조건을 적용시킨다. 두 조건을 만족하는 유전자는 유전자를 하나 증가시킨다.

i) 임의로 발생된 유전자 ≤ 유전자
ii) 유전자 〈 돌연변이되기 전 유전자

예를 들어 임의로 발생시킨 유전자를 5라고 하면 돌연변이되기 전 유전자 9하고 비교, 임의로 발생된 유전자가 작으므로 위의 조건을 모든 유전자에 적용한 결과는 다음과 같다.

P: 3 2 1 2 1 3 2 3 3
2 7 4 1 3 9 6 8 9

그리고 나서 임의로 발생시킨 유전자를 돌연변이시킬 위치에 있는 유전자와 바꾼다. 모든 돌연변이가 끝난 유전자 배열은 다음과 같다.

P: 3 2 1 2 1 3 2 3 3
2 7 4 1 3 5 6 8 9

반대로 임의로 발생시킨 유전자가 돌연변이되기 전 유전자보다 크면 모든 유전자에 다음의 두 조건을 적용시킨다. 두 조건을 만족하는 유전자는 유전자를 하나 감소시킨다.

i) 임의로 발생된 유전자 ≥ 유전자
ii) 유전자 〉 돌연변이되기 전 유전자

지역해에 빠져 있으면 돌연변이율을 프로그램 수행 중에 증가시켜 지역해에서 빠져나오도록 한다. 지역해에서 빠져나오면 돌연변이율은 증가되기 전의 값으로 돌아간다.

4.5 제안 유전 알고리즘

본 논문에서 사용된 유전 알고리즘의 흐름도는 그림 3과 같다. 첫 세대를 무작위로 발생시키고, 첫 세대에 대한 생성 일정의 Gantt도를 만드는 함수를 발생시킨다. 작성된 일정에 대한 전 작업 소요 시간과 순수 납기 지연을 참조하여 각 세대의 목적함수의 최소값을 저장하고 수렴 여부를 판단한다.

수렴 여부는 다음과 같은 3가지 조건을 만족하면 성공한 것으로 한다.

i) 현재 수행 중인 세대수가 최소 세대수를 초과하고 ii) 현재 세대의 평균값에 대한 현재 세대의 최소값의 비율이 95%이상이고 iii)현재 세대까지 나타난 최소값이 정해진 회수만큼 계속 반복되어 나타나야 한다.

다음으로 지역해에 빠져 있는지 판단한다. 이전 세대의 최소값과 현 세대의 평균값을 비교하여 이전 세대의 최소값이 현세대의 평균값의 95%보다 작으면 지역해에 빠져 있다고 판정한다. 다음 세대를 복제와 교차, 돌연변이

로 발생시킨 후 그림 3에서 보이는 루프를 정해진 세대 수와 수렴 조건에 맞을 때까지 반복한다.

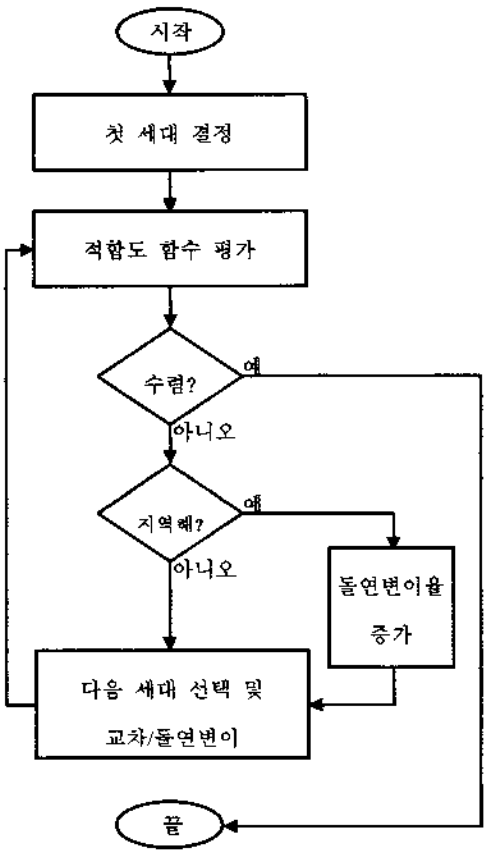

그림 3. 제안된 유전 알고리즘의 흐름도

4.6 시뮬레이티드 어닐링

본 논문에서 사용된 시뮬레이티드 어닐링의 흐름은 다음과 같다. 부품의 납기에 대해 작업의 지연을 고려하는 목적함수는 식 (2)와 같다. 초기 온도는 반복적인 실험을 통하여 최적해에 접근할 수 있도록 충분히 높은 온도로 설정하였다. 초기해는 임의로 발생시켰으며, 온도의 감소율은 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$T = (MAXT-MINT)\times exp(-i/BUNMO)+MAXT \qquad (3)$$

MAXT는 최고 온도, MINT는 최저 온도를 나타낸다. exp(i/BUNMO)에서 i는 반복 회수를 나타내고, BUNMO는 사용자에 의해 주어지는 매개 변수이다. 따라서 exp(-i/BUNMO)는 0-1사이의 임의의 상수이다.

탐색한 해의 수용 여부는 식 (1)에서 보이는 메트로폴리스방법을 이용하여 결정하였다. 마지막으로 수렴 조건은 일정한 반복수에 달하면 만족하는 것으로 하였다.

4.7 실험 결과

본 논문에서 제안된 유전 알고리즘을 Job Shop을 대상으로 적용하여 실험한 결과를 표 2에 보인다. 그림 4는 표1에서 제시한 부품수가 8이고 서로 다른 기능을 갖는 기계 3대 경우에 생성되는 일정의 한 사례이다. 전 작업 완료 시간은 665분이 소요되고 이 결과를 얻기 위해 소요된 계산 시간은 102.0초였다. 반면에 시뮬레이티드 어닐링기법을 적용하여 얻은 결과는 다음과 같다. 전 작업 완료 시간은 유전 알고리즘과 마찬가지로 665분이고 계산 시간은 118.0초였다. 적용 대상을 확장하여 부품 16개에 대하여 실험한 결과는 표 2와 같다. 실험 결과를 계산 속도면에서 비교해보면, 기계가 3대일 때에는 유전 알고리즘을 적용한 경우는 184.5초 걸렸고, 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 경우는 350.0초가 소요되었다. 기계가 6대일 때의 계산 속도를 살펴보면 유전 알고리즘의 경우는 102.0초, 시뮬레이티드 어닐링의 경우는 418.0초 각각 소요되었음을 알 수 있다. 마지막으로 기계 10대의 경우에는 유전 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링을 적용하여 각각 185.6초와 447.6초가 걸렸다. 전 작업 완료 시간은 유전 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링을 각각 적용했을 경우에 표 2에서 보이는 바와 같이 유사한 값을 얻었다.

종합적으로 실험 결과를 고찰해 보면, 같은 문제에 대해서 유전 알고리즘 적용의 경우가 시뮬레이티드 어닐링 경우에 비해 2~3배 빠른 계산 속도로 일정 계획의 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구를 통하여, 작업 일정 계획 문제에 대체 공정을 고려한 유전 알고리즘의 적용에 의해, 생산 현장의 상황 변동에 대해 유연하게 대처하여 최적의 작업 순서를 결정할 수 있는 작업 일정 계획 방법이 제안되었다. 본 연구에서는 유전 알고리즘에 사용된 돌연변이율을 차등화

함으로써, 최적해에 접근할 확률을 높였고, 이중 유전자 구조를 채택하여 모델링이 용이하도록 하였다.

또한, 본 논문에서 제시된 시스템에서는 유전 알고리즘 적용이 시뮬레이티드 어닐링 기법 보다 계산 속도면에서 우수함을 알 수 있었다. 유전 알고리즘을 통해 얻어진 전 작업 완료 시간은 시뮬레이티드 어닐링에서 얻어진 전 작업 완료 시간과 비슷하였다. 이 결과로 유전 알고리즘을 적용하여 얻은 해의 타당성이 검증되었다.

한편, 본 논문에서는 유전 연산자로 일반적으로 사용되는 교차와 돌연변이 연산자를 이중 유전자 구조에 맞추어 활용하였다. 따라서, 향후 연구로는 역위(inversion), 전이(translocation) 등의 다른 유전 연산자를 이용하여 작업 일정 계획에 적용되는 유전 알고리즘의 성능을 향상시키기 위한 연구가 필요하다. 또한, 본 연구에서 제시된 방법을 실제 생산 현장의 적용 가능성을 확인하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 정부 출연 기관 연구 개발 사업의 일부 지

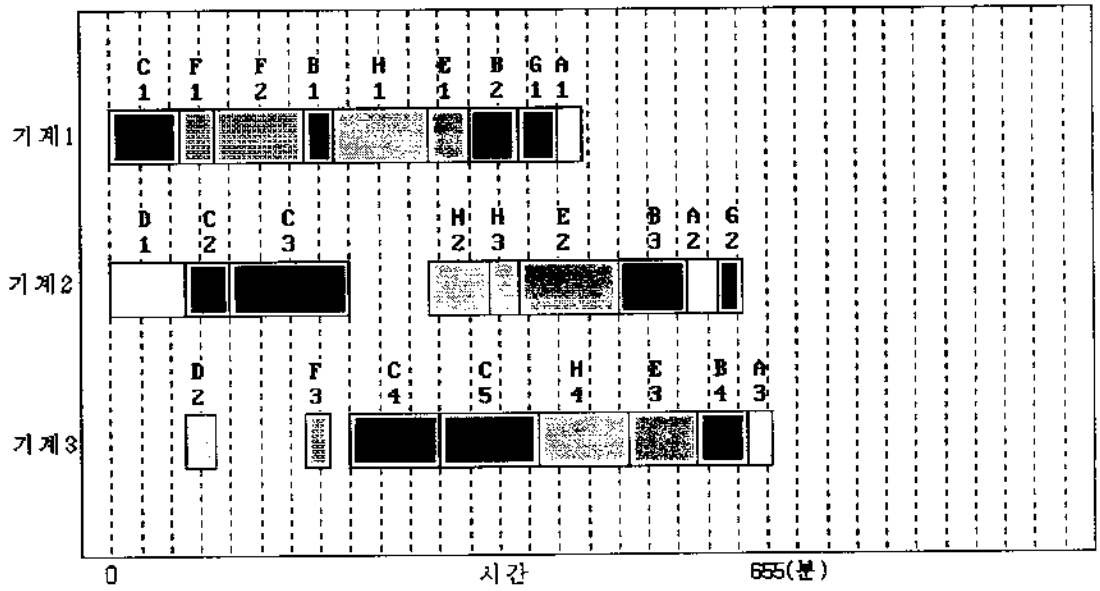

그림 4. 유전 알고리즘 적용의 준 최적 일정 계획의 예

표 2. 유전 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링의 수행 결과 비교

작업장의 형태	부품수	적용알고리즘	서로 다른 기능을 갖는 기계의 수								
			3			6			10		
			평균계산시간	전 작업 완료 최소값	전 작업 완료 최대값	평균계산시간	전작업완료 최소값	전작업완료 최대값	평균계산시간	전작업완료 최소값	전작업완료 최대값
Job Shop	16	GA	184.5	1335	1435	102.0	1125	1125	185.6	650	655
		SA	350.0	1360	1420	418.0	1125	1125	447.6	695	725

GA: 유전 알고리즘, SA : 시뮬레이티드 어닐링

원(2E1405A, 2E14430)으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다

참고문헌

[1] Ji-Hyung Park, Myon-Woong Park, Min-Hyoung Kang, 1997, "Generation of Alternative Process Plan by Net Model", 한국정밀공학회지 제 14권. 제1호. pp. 168-173.

[2] David Beasley, David R.Bull, Ralph R.Martin, 1993, "*An overview of Genetic Algorithms : Fundamentals*", Morgan Kaufmann.

[3] David E. Goldberg, 1989, "*Genetic Algorithms in search, optimization & machine learning*", Addison Wesley Co.

[4] Lae-Jeoung Park, Cheol Hoon Park, 1995, "Genetic Algorithms for Job Shop Scheduling Problems based on Two Representational Schemes", *Electronics Letters, Vol.31, No.23*, pp. 2051-2053.

[5] Byung-Jun Cho, Sung-Chan Hong, Seiichi Okoma, 1996, "Job Shop Scheduling Using Genetic Algorithm", *Critical Technology*, pp. 351-358.

[6] Mitsuo Goen, Yasuhiro Tsujimura, Erika Kubota, 1994, "Solving Job-Shop Scheduling Problem Using Genetic Algorithm", *16th International Conferences on Computer & Industrial Engineering, March 7-9*, pp. 576-579.

[7] Yow-Yuh Leu, Lance A.Matheson, Loren Paul Rees, 1994, "Assembly Line Balancing Using Genetic Algorithms with Heuristic-Generated Initial Populations and Multiple Evaluation Criteria", *Decision Sciences, Vol.25, No.4*, pp. 581-603.

[8] Jihyung Park, Mujin Kang, Kyoil Lee, "An Intelligent Operations Scheduling System in a Job Shop", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.11, No.2*, 1996. 3

[9] K.I.Lee, M. Kang, J.H.Park, "A Collaborative Scheduling System for Make-to-Order Manufactruing", *CIRP Annals 45*, 1996. 8, pp. 461-464.

[10] 한용호, 류광열, 1995, "기계-부품군 형성문제의 사례를 통한 유전 알고리즘의 최적화 문제에의 응용", 한국경영과학회지, 제12권 2호, pp. 105-127.

[11] 박승헌, 오영주, 1996, "Genetic Algorithm을 이용한 다중프로세스 일정계획문제의 효율적해법", 한국경영과학회지, 제12권 1호, pp. 147-161.

[12] R. Diekmann, R. Luling, J. Simon, "Problem Independent Distributed Simulated Annealing and its Application", *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 1993.

[13] 박지형, 최회련, 김영휘, 1997, "대체 공정 기능을 도입한 작업 일정 계획의 유전 알고리즘 응용", 한국경영학회/대한산업공학회 '97 춘계 공동 학술 대회 논문집, pp. 377-380.

97년 10월 최초 접수, 98년 11월 최종 수정