

작업순서와 기계 의존적인 작업준비시간을 고려한 이종병렬기계의 일정계획을 위한 효과적인 작업할당 방법을 이용한 유전알고리즘

주철민¹ · 김병수^{2*}

¹동서대학교 산업경영공학과 / ²부경대학교 기술경영(MOT) 일반대학원

Genetic Algorithm with an Effective Dispatching Method for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Sequence Dependent and Machine Dependent Setup Times

Cheol Min Joo¹ · Byung Soo Kim²

¹Department of Industrial and Management Engineering, Dongseo University

²Graduate School of Management of Technology, Pukyong National University

This paper considers a unrelated parallel machine scheduling problem with ready times, due times and sequence and machine-dependent setup times. The objective of this problem is to determine the allocation of jobs and the scheduling of machines to minimize the total tardy time. A mathematical model for optimal solution is derived. An in-depth analysis of the model shows that it is very complicated and difficult to obtain optimal solutions as the problem size becomes large. Therefore, a genetic algorithm using an effective dispatching method is proposed. The performance of the proposed genetic algorithm is evaluated using several randomly generated examples.

Keyword: unrelated parallel machine scheduling, sequence-dependent and machine-dependent setup times, genetic algorithm

1. 서론

본 연구는 다수의 작업(Job)을 다수의 이종병렬기계(unrelated parallel machine)에 할당하는 일정계획(scheduling) 문제를 다룬다. 각 작업은 투입가능시점(job release time)과 완료요구시점(due time)을 가지며, 작업이 완료되는 시점에 따라 작업완료지연시간(tardy time)이 발생한다. 다수로 주어진 이종병렬기계들은 그 용량이나 범용성의 정도 등에 따라 각 작업을 수행하는 속도가 다르게 주어지므로, 각 작업의 가공시간(processing time)

은 어느 기계에 할당되는지에 따라 달라진다. 작업준비시간(setup time) 역시 어떤 기계에 할당되느냐에 따라서도 달라질 뿐만 아니라, 해당기계에서의 작업순서에 따라서도 달라진다. 생산일정계획에 있어서 작업 순서 의존적(sequence dependent)이고 기계 의존적(machine dependent)인 작업준비시간은 작업준비시간 중 가장 일반적인 형태로 유리제조공정, 종이제조공정, 반도체공정, 화학공정, 도장공정 및 사출공정 등에서 자주 발생하는데 그 작업일정에 따라 설비의 효율과 납기 준수를 등에 많은 영향을 미친다(Behnamian *et al.*, 2009).

*연락처 : 김병수 교수, 608-737 부산광역시 남구 용소로 45번지 부경대학교 기술경영(MOT) 일반대학원,

Fax : 051-629-6496, E-mail : iekbs@pknu.ac.kr

투고일(2011년 08월 11일), 심사일(1차 : 2011년 12월 30일, 2차 : 2012년 04월 05일), 게재확정일(2012년 04월 05일).

작업순서 의존적인 작업준비시간에 대한 동종병렬기계 일정계획에 관한 연구는 Frederickson *et al.*(1978)의 연구 이래로 비교적 활발히 연구되어 왔다(Flynn, 1987; Hahn *et al.*, 1989; Bobrowski and Kim, 1994; Yalaoui and Chu, 2003; Behnamian *et al.*, 2009). 하지만 작업순서 의존적이고 기계 의존적인 이종병렬기계 일정계획문제의 주요 연구들은 다음과 같이 제한적으로 연구되어 왔다. Agarwal *et al.*(2006)은 총 작업완료시간(makespan)의 최소화 문제를 해결하기 위해 신경망 네트워크 모형을 이용한 휴리스틱들을 제안하였다. Hop and Nagaur(2004)는 역시 다수의 Printed Circuit Board(PCB)의 총 작업완료시간의 최소화 문제를 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용해 모델을 제안하였다. Balin(2011) 역시 병렬기계의 총 작업완료시간의 최소화 문제를 유전알고리즘을 이용한 해법을 제안하였다. 최근에 Vallada and Ruiz(2011)는 작업의 순서 의존적이고 기계의존적인 작업준비시간을 고려한 지역해 탐색 휴리스틱을 포함한 하이브리드 유전알고리즘을 제안하였다. Tavakkoli-Moghaddam *et al.*(2009)과 Gharehgozli *et al.*(2009)은 순서 의존적이고 기계의존적인 작업 준비시간과 작업 투입가능시점 및 완료요구시점을 고려한 이종병렬기계 일정계획 문제를 다루었다. Tavakkoli-Moghaddam *et al.*(2009)은 총 작업완료지연 작업수가 가장 적은 해들을 대상으로 작업완료 시간의 합이 최소가 되는 일정계획을 찾는 2단계 유전알고리즘을 제시하였다. 반면 Gharehgozli *et al.*(2009)은 총 작업완료지연시간과 총 작업완료시간의 가중치를 고려한 퍼지 혼합정수 목표계획 모형을 제시하였다.

본 연구에서는 순서 의존적이고 기계의존적인 작업 준비시간과 작업 투입가능시점 및 완료요구시점이 주어진 상황에서 총 작업완료지연시간을 최소화하는 이종병렬기계 일정계획 문제를 다룬다. 순서 의존적인 작업준비시간을 고려한 동일병렬기계의 총 작업완료시간 최소화 문제는 NP-hard로 증명되어 있다(Nait *et al.*, 2003; Sveltana *et al.*, 2001; Yalaoui and Chu, 2003). 따라서 본 연구에서 다루는 이종병렬기계 일정계획의 문제는 기계의 종류가 상이하여 작업준비시간이 작업 순서 및 기계에 따라 달라지며 작업시간 역시 기계에 따라 달라지는 훨씬 복잡한 상황을 다루므로 NP-hard하다. 주어진 일정계획 문제에 대해 기계별 작업 할당과 작업순서를 동시에 결정하기 위한 수리모형을 제시하고, 해를 보다 효율적으로 도출하기 위한 유전 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 유전알고리즘의 성능을 향상시키기 위해서는 해의 효과적인 표현방법이 필요하다. Cheng and Gen(1997)은 동종병렬기계 일정계획문제에 유전알고리즘을 적용하기 위하여 할당 구분자인 특수한 문자를 도입한 해의 표현을 제시하고 그 성능을 평가하였다. Jou(2005)는 특수한 문자를 도입한 해의 표현을 사용한 유전알고리즘이 작업시간 순서(shortest processing time) 규칙, 작업완료요구시점 순서(earliest due date)규칙 등의 로컬서치 알고리즘 및 다른 유전자표현의 유전알고리즘보다 동종병렬기계 일정계획문제에 보다 우수한 성능을 나타냄을 검증하였다. Tavakkoli-Moghaddam

et al.(2009)은 이종병렬기계 일정계획문제에 특수한 문자를 도입한 해의 표현을 사용한 유전알고리즘을 적용하고, 분지한계(branch and bound) 기법에 비해 제한된 시간에 성능을 나타냄을 검증하였다.

본 연구에서는 유전알고리즘의 성능 향상을 위해 기존의 여러 연구에서 입증된 할당 구분자인 특수문자를 이용한 해의 표현과 다른 새로운 해의 표현을 제안하고 그 성능을 비교한다. 새로운 해의 표현은 기계 할당을 위한 작업의 순서만을 결정하는 단순화된 방법을 이용하여 유전알고리즘을 시행하고 적합도(fitness) 평가시 효과적인 작업할당(dispatching) 방법을 적용하여 작업의 기계할당 및 기계 내의 작업들의 순서를 결정하도록 한다. 제 2장에서는 주어진 이종병렬기계 일정계획 문제에 대한 최적화 수리모형을 제시하였다. 제 3장에서는 해의 효율적인 도출을 위해 작업할당 방법을 적용한 해의 표현을 이용하여 작업의 기계할당 및 기계 내의 작업들의 순서를 동시에 결정하는 유전알고리즘 방법을 제안하였다. 제 4장에서는 제시한 알고리즘의 성능을 임의로 생성된 예제를 통해 평가하였다.

2. 혼합 정수모형

순서 의존적이고 기계의존적인 작업 준비시간과 작업 투입가능시점 및 완료요구시점이 주어진 상황에서 총 작업완료지연시간을 최소화하는 이종병렬기계 일정계획문제에서 기계별 작업 할당과 작업순서를 동시에 결정하기 위한 혼합정수계획 모형은 다음과 같다.

<파라미터>

- r_i : 작업 i 의 투입가능시점
- d_i : 작업 i 의 완료요구시점
- p_{ik} : 기계 k 에서 작업 i 의 작업시간
- s_{ijk} : 기계 k 에서 작업 i 이후 작업 j 를 작업하기 위한 준비시간
- s_{Ok} : 기계 k 에서 작업 i 가 최초 작업일 때 준비시간
- MS : 전체 기계 집합
- JS : 전체 작업 집합
- O : 각 기계별 최초 작업을 위한 가상의 작업
- M : 양의 큰 수(무한대)

<의사결정 변수>

- x_i : 작업 i 의 작업준비 및 시작시간
- τ_i : 작업 i 의 작업완료지연시간
- $y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{기계 } k \text{에 의해 작업 } i \text{가 작업되어지면} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

$$z_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{기계 } k \text{에 의해 작업 } i \text{ 후 작업 } j \text{가} \\ & \text{작업되어지면} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$z_{Okk} = \begin{cases} 1 & \text{기계 } k \text{에 의해 작업 } i \text{가 첫 번째로} \\ & \text{작업되어지면} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

<혼합정수계획 모형>

$$\text{Min } z = \sum_{i \in JS} \tau_i \quad (1)$$

$$\text{s.t. } x_i \geq r_i \quad \text{for } \forall i \in JS \quad (2)$$

$$x_i + \sum_{k \in MS} \left(s_{Okk} \cdot z_{Okk} + \sum_{\substack{h \in JS \\ h \neq i}} s_{hik} \cdot z_{hik} + p_{ik} y_{ik} \right) - d_i \leq \tau_i \quad (3)$$

for $\forall i \in JS$.

$$x_i + \sum_{k \in MS} \left(s_{Okk} \cdot z_{Okk} + \sum_{\substack{h \in JS \\ h \neq i}} s_{hik} \cdot z_{hik} + p_{ik} y_{ik} \right) \leq x_j + M \cdot \left(1 - \sum_{k \in MS} z_{ijk} \right) \quad (4)$$

for $\forall i, j \in JS; j \neq i$

$$\sum_{k \in MS} y_{ik} = 1 \quad \text{for } \forall i \in JS \quad (5)$$

$$\sum_{j \in JS} z_{Ojk} = 1 \quad \text{for } \forall k \in MS \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{j \in JS \\ j \neq i}} z_{jik} + z_{Okk} = y_{ik} \quad \text{for } \forall i \in JS; \forall k \in MS \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{j \in JS \\ i \neq j}} z_{ijk} \leq y_{ik} \quad \text{for } \forall i \in JS; \forall k \in MS \quad (8)$$

$$x_i, \tau_i \geq 0 \quad \text{for } \forall i \in JS \quad (9)$$

$$y_{ik} = 0 \text{ 또는 } 1 \quad \text{for } \forall i \in JS; \forall k \in MS \quad (10)$$

$$z_{ijk} = 0 \text{ 또는 } 1 \quad \text{for } \forall i, j \in JS; \forall k \in MS \quad (11)$$

$$z_{Okk} = 0 \text{ 또는 } 1 \quad \text{for } \forall k \in MS \quad (12)$$

위의 최적화 모형에서, 가상의 작업 0는 각 기계의 순서상 첫 번째 위치에 할당되는 작업의 작업준비시간을 표현하기 위해 도입되었다. 제약식 (2)는 모든 작업은 해당 작업의 투입가능시점 이후에 작업을 시작할 수 있음을 나타내며, 제약식 (3)은 모든 작업의 작업완료지연시간을 계산하기 위한 제약식이다. 제약식 (4)는 동일기계 상의 작업의 선후관계를 고려하여 각 작업의 시작시간을 제약하며, 제약식 (5)는 각 작업은 반드시 하나의 기계에만 할당되어야 됨을 나타낸다. 제약식 (6)~식 (8)은 동일한 기계에 할당된 모든 작업들은 반드시 그리고 한번만 그 기계의 작업순서상에 나타나야 됨을 제약한다. 제약식 (6)은 각 기계 내의 할당된 모든 작업들 중 첫 번째 순서는 가상의 작업 0가 할당되어야 함을 나타내며, 제약식 (7)은 만약 특정기계에 할당된 작업이 존재한다면, 그 작업의 선행 작업은 반드시 한 개가 되어야 함을 제약하며, 제약식 (8)은 만약 특정기계에 할당된 작업이 존재한다면, 그 작업의 후속작업은 1개 이상은 존재하지 않음을 제약한다.

3. 유전알고리즘

제 2장에서 제시한 혼합정수계획 모형은 기계당 평균 5개의 작업 이상인 문제인 경우 CPLEX 등의 상용 패키지를 사용하여 제한된 시간 내에 최적해를 구하기 어렵다(제 4장 참조). 따라서 본 연구에서는 효과적인 메타휴리스틱(meta-heuristic) 알고리즘의 개발에 초점을 맞추었다.

일반적으로 유전알고리즘은 생물의 진화과정인 적자생존의 원칙을 활용해 해를 탐색해가는 메타휴리스틱 기법의 하나로 Holland(1975)에 의해 처음 소개된 후로 다양한 문제에 적용되어 왔고, 특히 본 연구에서 다루는 문제와 같은 조합문제에 대해 비교적 짧은 시간 내에 근사 최적해를 도출하는 것으로 알려져 있다(Gen and Cheng, 2000). 보편적인 탐색기법들과는 달리 유전알고리즘은 염색체(chromosome)라 불리는 해들로 이루어진 해집단(population)을 하나의 세대(generation)로 정의하고, 적합도라는 평가척도를 이용하여 다음 세대로의 진화(evolution)를 반복함으로써 해를 탐색하게 된다. 병렬기계 일정계획 문제에서 일반적으로 많이 소개되는 염색체 표현은 기계들의 구분자인 $m-1$ 개의 특수문자 *와 n 개의 1부터 n 까지의 정수를 이용한 $(m+n-1)$ 1차원 배열 방법이다. 연속되는 특수문자 *사이의 숫자들은 동일기계 내에 가공되는 작업들의 순서이다. 따라서 위의 염색체 표현방법을 이용하게 되면 기계들의 작업할당 및 각 기계내의 할당된 작업들의 작업순서는 염색체 표현만으로 동시에 결정된다.

본 연구에서는 병렬기계의 일정계획문제에 소개되는 일반적인 염색체 표현과 달리 1부터 n 까지의 정수만으로 표현되는 1차원 배열의 염색체 표현을 사용한다. 단순화된 1차원 배열의 염색체를 이용하여 기계들의 작업할당 및 각 기계 내의 할당된 작업들의 작업순서를 결정하기 위해서 효과적인 작업할당 방법을 제안한다. 염색체 내에 존재하는 숫자들은 작업할당을 수행하는 작업순서를 의미하며, 해당 작업의 기계할당 방법은 각 기계의 작업완료시간을 기반으로 한다. 수행 대상 작업이 각 기계들에 할당되는 경우에 대해 모든 기계에서의 작업완료시간들을 계산하고, 계산된 작업완료 시간중 가장 빠른 시간을 갖는 기계에 해당 작업을 실제로 할당한다. <Figure 1>은 두 가지 경우에 대한 작업할당 방법을 표현하고 있다. 정의된 염색체 표현으로부터 작업 $i \rightarrow j \rightarrow k$ 순서로 작업할당을 수행하게 된다. 현재, 작업 i 가 기계 1에 그리고 작업 j 가 기계 2에 할당되어 있는 상태에서 첫 번째 경우는 작업 k 의 투입가능시점이 작업 i 와 j 의 작업완료시간보다 크기 때문에 작업 k 는 자신의 투입가능시점 이후에 각 기계들에 할당될 수 있다. 따라서 이 경우 작업 k 는 두 기계 중 작업준비시간과 작업시간의 합이 적은 기계 2로 할당된다. 두 번째 경우는 작업의 투입가능시점이 작업 i 와 작업 j 의 작업완료시간보다 빨라서 작업 k 는 각 기계에서 직전 작업의 작업완료시간 이후에 즉시 투입될 수 있다. 따라서 작업 k 는 기계 1에서의 작업준비시간과 작업시간의 합이 기계 2에서 보다 크지만 작업완료시간이 빠른 기

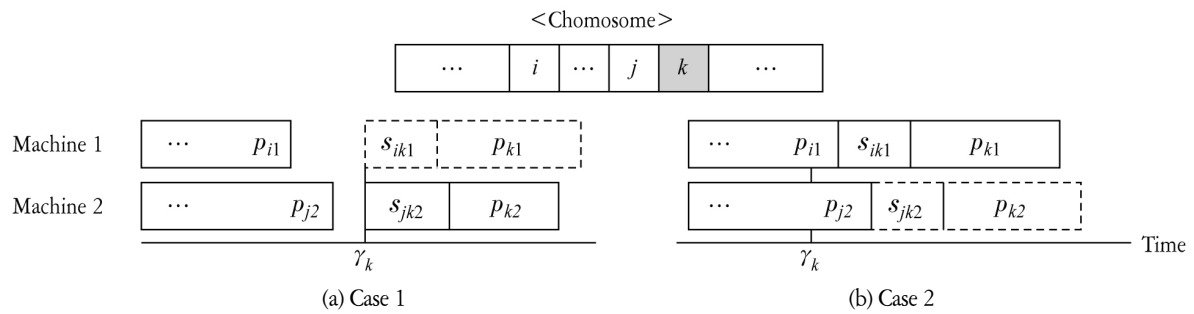


Figure 1. The Dispatching Rule for Job k to the Corresponding Machine

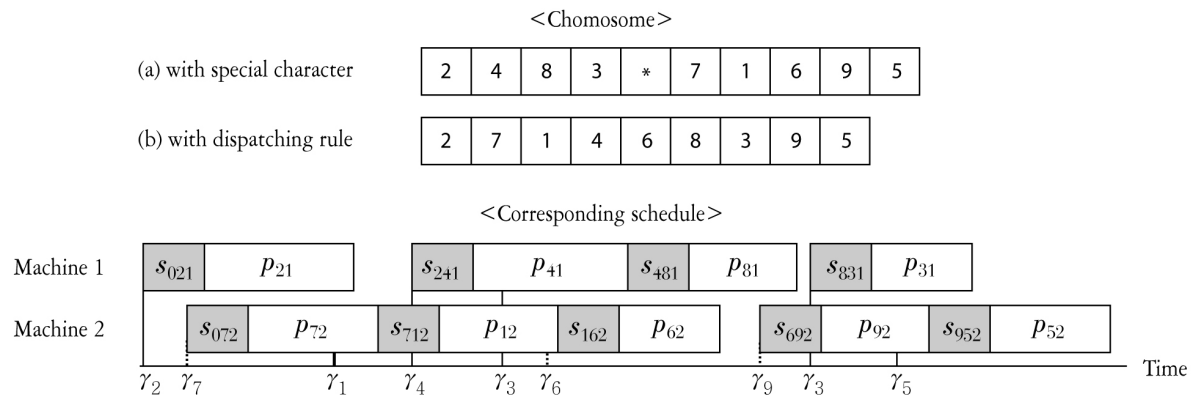


Figure 2. Chromosomes Representation and Their Corresponding Schedule

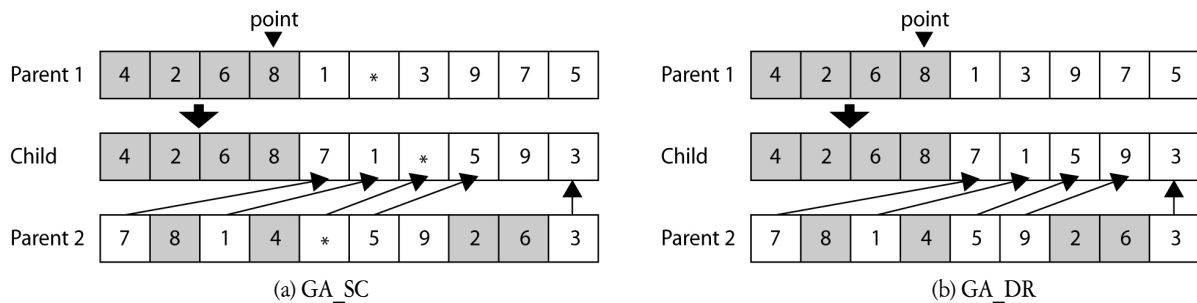


Figure 3. One-Point Crossover

계 1이 할당된다.

<Figure 2>는 본 연구에서 제시한 작업할당 방법을 기반으로 염색체 표현 (b)에 대한 일정계획을 나타낸다. 주어진 염색체는 두 대의 기계에 할당되는 9개의 작업의 순서를 나타낸다. 작업 2, 4, 8, 3은 기계 1에 그리고 작업 7, 1, 6, 5는 기계 2에 할당된다. 또한, 염색체 표현 (a)는 동일한 일정계획을 가지는 기계구분자 '*'를 포함한 1차원 염색체 표현을 나타낸다. 위의 두 가지 염색체 표현들을 이용한 유전알고리즘을 각각 특수문자를 갖는 유전알고리즘(Genetic Algorithm with Special Character : GA_SC)와 작업할당방법을 이용한 유전알고리즘(Genetic Algorithm with Dispatching Rule : GA_DR)이라고 부른다.

초기세대의 해집단을 형성하기 위한 초기해들은 임의(random)로 생성된다. 해집단 내의 염색체들은 적합도 함수로써 총

작업완료지연시간을 갖는다. 일반적으로 유전알고리즘은 교차변이연산(crossover), 돌연변이연산(mutation), 재생산(reproduction)의 세 가지 유전작업들을 이용하여 유전형질을 다음세대로 계승한다. 본 연구에서도 GA_SR과 GA_DR의 실험의 일관성을 유지하기 위해 동일한 상황에서 세 가지 유전작업 방식들을 적용한다. 교차변이연산으로 하나의 교차점을 임의로 선택하고 <Figure 3>과 같이 두 부모의 유전자를 교차하여 자식을 생성하는 한점 교차변이(one cut-point crossover)연산을 사용한다. 한점 교차방법은 순서결정 문제 및 일정계획 문제의 염색체 표현에서 가장 보편적으로 이용되는 방법으로 실행불가능(infeasible)해를 발생시키지 않고 다양한 해를 탐색할 수 있게 한다.

돌연변이연산으로는 <Figure 4>와 같이 부모의 유전자에서

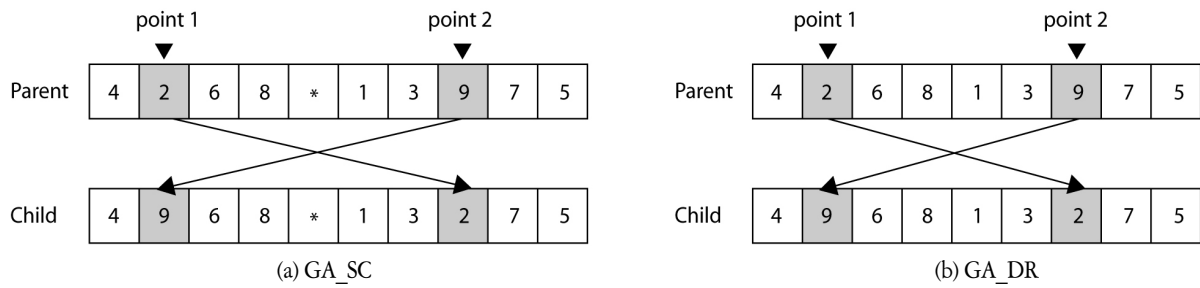


Figure 4. Swap Mutation

임의로 선택된 두 점을 상호 교환하여 자식을 생성하는 교환 돌연변이(swap-mutation)연산을 사용한다. 다음 세대를 구성하기 위한 염색체 재생산을 위한 부모 해는 현 세대 해집단의 적합도 평균보다 좋은(높은) 적합도를 갖는 해들에서 선택한다. 자식 해는 기본적으로 선정된 부모 해들을 임의로 짝을 지어 교차변이나 돌연변이 연산으로 생성하나, 가장 우수한 해가 일정비율 이상 부모가 되도록 조정하였다.

4. 알고리즘의 검증

본 연구에서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 임의로 실험데이터를 생성하였다. 각 기계에서 각 작업의 작업시간은 [30, 60] 단위시간 구간 내에서, 작업준비시간은 [10, 30] 단위시간 구간 내에서 임의로 생성하였다. 최초 작업준비시간은 작업준비시간의 70%로 고정하였다. 작업투입가능시점과 완료요구시점은 주어진 계획기간(planning horizon) 이내에서 임의로 생성하되, 그 간격이 [90, 180] 단위시간 이내로 되도록 하였다. 간격시간의 하한 90과 상한 180은 작업시간과 작업준비시간의 최대값의 비율로 정하였다. 일반적으로 병렬기계 일정계획문제의 복잡도는 기계당 평균 작업수가 늘어남에 따라 증가하게 된다. 따라서 GA_SC와 GA_DR의 상대적 성능평가를 위해 기계수를 2, 3, 4대로 고정하고, 기계당 평균 작업수를 5, 10, 20, 30개로 증가시켜 실험을 시행하였다. 각 12개의 실험방법에 대해 각각 3개 실험데이터(instance)를 생성하여 총 36개의 실험데이터를 생성하고, 각 실험데이터에 대해 10번의 반복실험을 시행하였다. 각각의 실험데이터에 대한 총 작업수 및 계획기간은 <Table 1>와 같다. 여기서, 기계당 평균작업수에 대한 계획기간의 생성은 작업시간과 작업준비시간의 중간값의 합인 65분에 기계당 평균 작업수를 곱한 값으로 정하였다.

Table 1. Number of jobs and Planning horizon

Jobs/Machine	Machines			Planning horizon
	2	3	4	
5	10	15	20	325
10	20	30	40	650
20	40	60	80	1,300
30	60	90	120	1,950

제 2장에서 제시한 혼합정수 모형에 의한 최적해는 ILOG CPLEX 10.2을 적용하여 구하였고 두 가지 유전알고리즘은 C#을 이용하여 구현하였으며, 모든 실험은 1.86GHz Intel Core 2 Processor, 2GB RAM의 PC를 이용하여 수행되었다. 유전알고리즘 파라미터 설정은 제시된 GA_SC와 GA_DR 모두 해집단의 수를 $2 \cdot n$ 으로 하였고, 교차변이율과 돌연변이율은 여러 가지 조합의 예비 실험결과에서 가장 좋은 성능을 보였던 0.7과 0.3으로 수행하였다. 동일한 조건하에서 상대적 비교실험을 수행하기 위하여 GA_SC의 총 세대수는 2,000으로 GA_DR의 총 세대수는 1,000으로 설정함으로써 평균적인 해 탐색시간을 유사하게 하였다. 실험 결과들은 <Table 2>에 정리하였다.

GA_SC와 GA_DR의 상대적 비교실험을 시행하기 전에 먼저 최적해와의 절대적 성능 비교를 위해 기계당 평균 작업수는 5개인 작은 규모의 문제들에 대한 실험을 시행하였다. 기계수 2, 3, 4인 경우 생성된 각각 3개 실험 데이터에 대해 혼합정수모형을 CPLEX로 수행한 결과, 기계 2대인 경우의 첫 번째 데이터는 73.250초, 두 번째 데이터는 430.368초, 세 번째 데이터는 9050.150 초 만에 최적해를 도출하였으나, 기계 3, 4대인 경우의 모든 데이터에 대해서는 10800초(3시간)내에 최적해를 도출하지 못하였다. 도출한 최적해는 각기 33, 77, 97로 이는 GA_DR의 결과와 비교하면(<Table 2> 참고), GA_DR의 절대적 성능이 규모가 제한된 문제에 대해 우수함을 알 수 있다.

생성된 대부분의 실험 데이터들은 합리적인 시간내에 CPLEX 의해 최적해를 찾는 것이 불가능하므로, GA_SC해와 GA_DR해의 상대적인 비교를 위해 식 (13)의 표현에 의해 GA_SA 대비 GA_DR의 상대적인 감소율(Reduction Rate : RR)를 이용하였다.

$$RR = \frac{Mean(GA_SC) - Mean(GA_DR)}{Mean(GA_SC)} \times 100 \quad (13)$$

<Table 2>에는 모든 실험 데이터의 10번의 반복에 대한 GA_SC와 GA_DR의 해의 평균 값(mean), 평균 절대편차(Mean Absolute Deviation : MAD), 수행 시간, 그리고 GA_SC 대비 GA_DR의 RR을 정리하였다. <Table 2>의 실험 결과를 보면 GA_SC 대비 GA_DR의 RR 전체 평균이 28.97%로 GA_DR 해가 GA_SC 해에 비해 현저히 우수하였다. 이는 특수문자를 이용한 염색

Table 2. Performance Comparison for GA_SC and GA_DR

Testing Data			GA_SC			GA_DR			RR(%)
Jobs/Machine	Total jobs	Machine	Mean	MAD	Times	Mean	MAD	Times	
5	10	2	40.4	29.31	0.291	37.2	18.06	0.238	7.92
			113.7	21.69	0.286	77	0.00	0.236	32.28
			113.8	19.75	0.292	100.3	4.61	0.236	11.86
	15	3	115.9	32.86	0.604	92.6	10.93	0.619	20.10
			38.3	52.69	0.603	2.4	130.00	0.610	93.73
			97.7	14.76	0.604	78.6	12.72	0.609	19.55
	20	4	172.1	29.13	1.051	105.7	17.26	1.273	38.58
			165.9	28.14	1.041	60.4	27.42	1.285	63.59
			167.2	56.58	1.042	17.2	82.79	1.264	89.71
10	20	2	236.6	18.87	1.014	220	21.73	0.867	7.02
			233.5	29.51	1.009	150.8	25.20	0.863	35.42
			991.9	8.05	1.011	992.7	2.03	0.865	-0.08
	30	3	218.2	31.64	2.212	58	61.38	2.351	73.42
			311.2	50.39	2.197	100.1	69.45	2.344	67.83
			552	32.21	2.232	517.4	31.77	2.392	6.27
	40	4	251.1	57.08	3.792	112	23.04	4.786	55.40
			556.8	39.40	3.789	230.3	38.25	4.763	58.64
			555.1	41.35	3.809	439.5	26.85	4.666	20.83
20	40	2	1823.8	43.91	3.763	812.5	13.56	3.282	55.45
			2875	33.98	3.721	2210.8	22.62	3.280	23.10
			2303.6	32.49	3.740	1682.3	10.07	3.232	26.97
	60	3	1855.7	41.56	8.412	2249.4	27.10	9.212	-21.22
			2904.6	24.00	8.451	2513.3	21.40	8.905	13.47
			941	49.93	8.363	383.4	50.15	9.485	59.26
	80	4	3885.2	33.30	17.577	4781.3	27.70	19.572	-23.06
			2478.4	18.25	17.494	2712.7	19.13	19.046	-9.45
			3277.8	28.78	17.596	2106.1	40.57	19.175	35.75
30	60	2	1959.8	36.30	8.480	863.8	23.94	7.486	55.92
			2248.2	50.12	8.343	1092.4	21.00	7.505	51.41
			2371.1	31.79	8.460	2007.1	19.47	7.684	15.35
	90	3	5748.6	20.90	20.305	5697.3	17.42	20.571	0.89
			6875.1	20.80	20.042	4782.7	32.87	21.330	30.43
			4162.9	51.15	20.232	5801	31.58	20.634	-39.35
	120	4	7385.2	41.71	41.995	5670.1	26.01	45.122	23.22
			7312.8	42.25	41.399	5037.7	16.49	44.524	31.11
			8604.3	32.45	41.360	7619.3	18.41	44.620	11.45
Average			34.09	9.073		28.97	9.581	28.97	

체 표현을 이용하는 것에 비해, 본 연구에서 제시한 작업할당 방법을 이용한 염색체 표현을 이용하는 것이 이중병렬기계 일정계획문제에 대한 GA의 성능을 훨씬 향상 시킨다는 사실을 알 수 있다. 해의 탐색시간은 총 작업수가 많아질수록 증가폭이 커지나 모든 실험에 대해 GA_SC와 GA_DR 모두 1분 이내 일정도로 적어 실제문제에 적용시 효율적인 일정계획의 수립이 가능할 것이다.

통계적으로 GA_SC 대비 GA_DR의 우수성을 검증하기 위하여 95% 신뢰구간의 평균과 Tukey HSD(Honestly Significant Difference) intervals로 기계당 작업수의 변화와 기계수의 변화에 따른 두 알고리즘의 RR에 대한 95% 신뢰구간의 평균을 도식화 하였다. <Figure 5>에서 보는바와 같이 기계당 작업수나 기계

수에 크게 관계없이 우수한 감소율(RR)을 보임을 알 수 있다. 이는 작업할당 방법을 이용한 염색체 표현을 이용한 하는 것이 기계당 작업수 및 기계수에 관계없이 이중병렬기계 일정계획 문제에 대한 GA의 성능 향상에 효과를 볼 수 있음을 의미한다.

6. 결론

본 연구에서는 작업순서 의존적이고 기계 의존적인 작업 준비 시간과 작업 투입가능시점 및 완료요구시점을 고려한 이중병렬기계의 일정계획문제를 다루었다. 목적함수는 총 작업완료 지연시간을 최소화하는 것이다. 최적해 도출을 위해 혼합정수

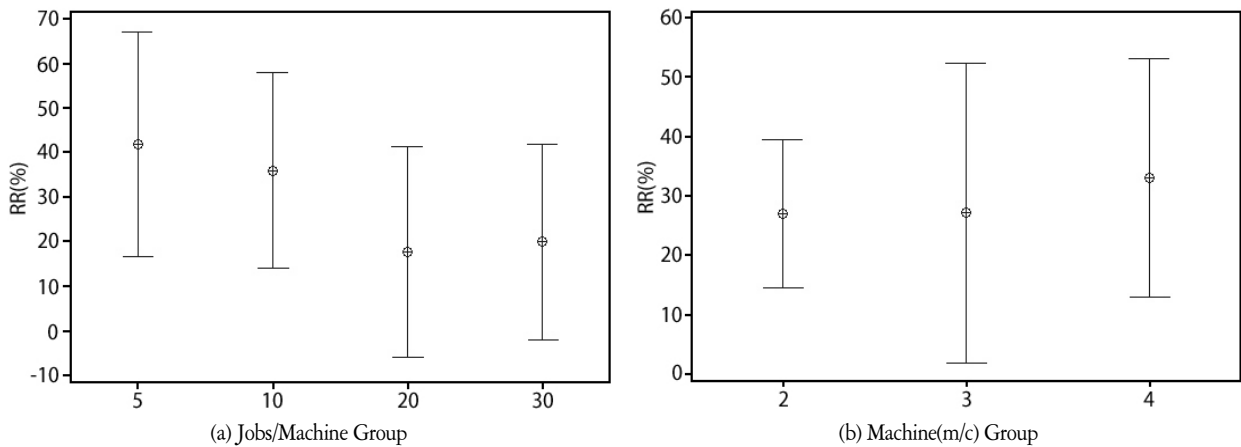


Figure 5. Mean Plots and Tukey HSD Intervals at the 95% Confidence Level for Machine and Jobs/Machine Groups

계획 최적화 모형을 제시하였다. 최적화 모형을 이용한 최적해 탐색은 기계당 평균 작업수가 5개를 초과하면 현실적으로 제한된 시간에 최적해의 탐색이 어려워진다. 따라서 보다 효율적인 해의 도출을 위해 본 연구에서는 효율적인 작업할당 방법을 이용한 유전알고리즘(GA_DR)을 제시하였다. 실험으로부터 GA_DR이 작업의 기계할당 방식의 복잡함 때문에 상대적으로 시간이 더 소요되지만 GA_SC보다 현저히 우수한 해를 도출함을 알 수 있었다. 또한, GA_DR은 규모가 큰 현실적인 문제에 대한 실험에서 GA_SC 대비 우수한 해를 1분 이내에 탐색하는 탁월한 효율성을 입증하였다.

참고문헌

Agarwal, A., Colak, C., Jacob, V., and Pirkul, H. (2006), Heuristics and augmented neural networks for task scheduling with non-identical machines, *European Journal of Operational Research*, 175(1), 296-317.

Balin, S. (2011), Non-identical parallel machine scheduling using genetic algorithm, *Expert Systems with Applications*, 38, 6814-6821.

Behnamian, J., Zandieh M., and Ghomi, F. (2009), Parallel-machine scheduling problems with sequence-dependent setup times using an ACO, SA and VNS hybrid algorithm, *Expert Systems with Applications*, 36, 9637-9644.

Bobrowski, P. M. and Kim, S. C. (1994), The impact of sequence dependent setup time on job shop scheduling performance, *International Journal of Production Research*, 32, 1503-1520.

Jou, C. (2005), A genetic algorithm with sub-indexed partitioning genes and its application to production scheduling of parallel machines, *Computers and Industrial Engineering*, 48, 39-54.

Flynn, B. B. (1987), The effects of setup time on output capacity in cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 25, 1761-1772.

Frederickson, G., Hecht, M. S., and Kim, C. E. (1978), Approximation algorithm for some routing problems, *SIAM Journal on Computing*, 7, 178-193.

Gen, M., and Cheng, R. (2000), *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, New York : Wiley.

Gharehgozli, A. H., Tavakkoli-Moghaddam, R., and Zaerpoor, N. (2009), A fuzzy-mixed-integer goal programming mode for a parallel-machine scheduling problem with sequence-dependent setup times and release dates, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25, 853-859.

Holland, J. H. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor, IL : University of Michigan Press.

Hop, N. V. and Nagarur, N. N. (2004), The scheduling problem of PCBs for multiple non-identical parallel machines, *European Journal of Operational Research*, 158, 577-594

Nait, T. D., Chu, C., Yalaoui, F., and Amodeo, L. (2003), A new approach for identical parallel machine scheduling with job splitting and sequence-dependent setup times based on linear programming, *In International conference on industrial engineering and production management (IEPM)*, 3, 266-274.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Taheri, F., Bazzazi, M., Izadi, M., and Sassani, F. (2009), Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times and precedence constraints, *Computers and Operations Research*, 36, 3224-3230.

Sveltana, A., Kravchenko, S., and Werner, F. (2001), A heuristic algorithm for minimizing mean flow time with unit setups, *Information Processing Letters*, 79, 291-296.

Vallada, E. and Ruiz, R. (2011), A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times, *European Journal of Operational Research*, 211, 612-622.

Yalaoui, F. and Chu, C. (2003), An efficient heuristic approach for parallel machine scheduling with job splitting and sequence-dependent setup times, *IIE Transactions*, 35(2), 183-190.

**주철민**

고려대학교 산업공학과 학사
 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 석사
 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 박사
 현재 : 동서대학교 산업경영공학과 교수
 관심분야 : 생산일정계획, 휴리스틱 알고리즘
 개발, 최적화, 물류시스템 관리

**김병수**

부경대학교 산업공학과 학사
 Auburn University, Industrial and Systems Engineering
 석사
 Auburn University, Industrial and Systems Engineering
 박사
 현재 : 부경대학교 기술경영(MOT) 일반 대학원
 교수
 관심분야 : 공급사슬망관리(SCM), 물류 시스템
 관리, 생산일정계획