

작업의 특성에 종속되는 병렬기계의 일정계획을 위한 발견적 기법

이동현* · 이경근* · 김재균** · 박창권** · 장길상***

A Heuristic for Parallel Machine Scheduling Depending on Job Characteristics

Dong-Hyun Lee* · Kyung-Keun Lee* · Jae-Gyun Kim** ·
Chang-Kwon Park** · Gil-Sang Jang***

□ Abstract □

In the real world, situations that some jobs need be processed only on certain limited machines frequently occur due to the capacity restrictions of machines such as tools, fixtures, or material handling equipment. In this paper, we consider n -job, non-preemptive and m parallel machines scheduling problem having two machines group. The objective function is to minimize the sum of earliness and tardiness with different release times and due dates. The problem is formulated as a mixed integer programming problem. The problem is proved to be NP-complete. Thus, a heuristic is developed to solve this problem. To illustrate its suitability and efficiency, a proposed heuristic is compared with a genetic algorithm and tabu search for a large number of randomly generated test problems in ship engine assembly shop. Through the experimental results, it is showed that the proposed algorithm yields good solutions efficiently.

1. 서 론

최근의 제조환경은 제품에 대한 고객의 요구 사항이 다양해지고 주문의 상황이 불규칙적으로

발생하며, 기타 제조 여건들이 복잡하게 변화하고 있다. 이러한 환경에 대응하기 위하여 기업의 제조형태는 과거의 대량생산방식에서 개별생산 방식 또는 민첩생산방식(Agile Manufacturing

* 부산대학교 산업공학과
** 울산대학교 산업공학부
*** 동국대학교 상경대학 정보산업학과

Pattern)으로 전환되고 있다. 이러한 제조회태에서 생산관리 부문의 목적은 고객이 요구하는 납기를 정확하게 맞추기 위하여 제조회장의 상황을 적절히 반영한 효율적인 생산일정계획을 수립하는 것이다.

고객의 납기에 대하여 조기생산을 하면 제품의 재고비용 및 보관장소의 활용문제가 발생하고, 지연생산을 하게 되면 후속공정의 전체일정에 영향을 줄 뿐 아니라, 고객에게 지체 보상 비용을 지불하여야 한다. 따라서, 고객의 납기와 관련하여 가장 중요한 것은 일반적으로 예상납기를 결정하는데 기준이 되는 공정이다. 대부분의 병목공정들이 여기에 포함되며, 예상납기는 기업 내부적으로 여유시간을 포함한 목표납기(Target Due-date)를 의미한다. 제조회장에서 병목공정의 생산흐름을 원활하게 하기 위하여 흔히 사용되는 방법으로는 대체공정 또는 대체장비를 투입하는 방법과 외주처리 방법이 있다.

본 연구에서는 제품의 특수성 및 제작장비의 설치에 따른 비용문제 때문에 외주업체에서 처리할 수 없고 자체공장에서 대체장비들을 사용하는 문제를 다루고자 한다. 이러한 경우에 해당하는 예로는 선박엔진 조립공장, 전력변압기 생산공장의 습기를 제거하는 건조로(Dry Oven) 공정 및 코일을 감기위한 권선(Wiring)공정 등이 있다. 이러한 공정들의 공통적인 특징은 작업의 종류(Type)에 따라 특정한 장비에서만 작업이 가능한 경우가 발생한다는 것이다. 선박용 엔진의 경우, 엔진의 종류(실린더 수, 실린더 내경의 크기, 중량 및 형상)에 따라 작업이 가능한 조립장비가 제한되어 있으며, 전력변압기의 건조로 공정은 변압기의 용량(Capacity : KVA) 및 외부형상에 따라 작업 가능한 건조로가 제한된다. 그리고 변압기용 코일을 감는 권선공정은 코일의 용량에 따라 작업 가능한 권선장비가 결정된다. 이와 같은 상황들은 병렬장비 작업장 환경에서 선행공정의 소요시간에 따라 작업가능시점(Ready Time)이 주어지고, 작업의 종류에 따라

작업 가능한 장비가 제한되며, 작업처리 시간은 작업 가능한 장비들에서는 동일한 경우에 대하여 조기생산과 지연생산의 합을 최소화하는 문제로 분류된다.

조기생산과 지연생산의 합을 최소화하는 일정 계획 문제에 대한 관심은 최근에 활발하게 이루어지고 있는 실정이다. 단일기계에서 도착시간 및 조기생산과 지연생산에 대한 벌금이 동일하고, 공통납기를 갖는 경우에 조기생산과 지연생산의 합을 최소화 하거나 납기로부터의 편차를 최소화하는 문제는 비교적 활발하게 다루어지고 있다[2-4, 10, 19, 20, 23]. Hall and Posner[18]는 공통납기를 가지며 각 작업들에 대하여 조기생산과 지연생산에 대한 벌금이 상이한 경우의 단일기계 일정계획 문제가 NP-complete임을 증명하였다. 또한, 단일기계에서 도착시간은 동일하고 납기는 상이한 경우의 문제로 확장한 연구가 활발하게 진행되었다[11, 21, 22, 24].

Cheng and Chen[7]은 병렬기계에서 동일한 도착시간을 가진 경우 조기생산과 지연생산의 합을 최소로 하는 작업의 순서와 공통납기를 결정하는 문제를 다루었다. Cheng and Sin[8]은 병렬기계에서 일정계획을 수립하는 문제를 연구한 기존의 논문들로부터 목적함수의 형태별로 분류하고 정리하였다. Cheng et al.[9]은 병렬기계에서 조기생산과 지연생산의 최대 가중치를 최소화하는 공통납기를 찾는 문제를 해결하기 위한 유전(Genetic) 알고리즘을 개발하였다. Funda and Ulusoy[12]는 두 개의 장비그룹이 있는 병렬 작업장에서 작업 준비시간이 순서 의존적이고, 장비 그룹들간의 처리시간비율(Processing Rate)이 서로 상이한 경우에, 조기생산과 지연생산의 가중치 합을 최소화하는 문제를 해결하기 위하여 유전 알고리즘을 개발하였다. Balakrishnan et al.[5]은 장비마다 처리속도가 상이한(Uniform Machine) 병렬작업장에서 작업 준비시간이 순서 의존적이고, 납기 및 도착시간이 상이하고, 조기생산과 지연생산에 대한 비용이 상이한 경우에,

조기생산과 지연생산 비용의 합을 최소화하는 문제를 혼합정수계획 모형으로 정식화하여 해를 구하였다. Centeno and Armacost[6]는 장비그룹 제약이 있는 병렬작업장에서 도착시간이 상이하고, 납기가 도착시간에 따라 결정되는 경우에, 최대지연(Maximum Lateness)을 최소화하는 문제를 해결하기 위하여 발견적 해법을 제시하였다.

기존의 문헌들을 통하여 확인한 바와 같이 장비그룹 제약을 고려한 병렬장비의 일정계획에 관한 연구들은 매우 미흡한 상태이다. 따라서, 본 연구에서 다루고자 하는 문제와 기존 연구들과의 차이는 다음과 같다. 첫째, 선형 공정의 소요시간에 따라 결정되는 작업가능시점을 작업 도착시간으로 간주하기 때문에 서로 상이하고, 둘째, 작업의 특성에 따라 작업 가능한 장비가 제한되며, 셋째, 작업처리 시간은 장비그룹에 상관없이 작업 가능한 장비들에서는 동일하며, 넷째, 각 작업에 대한 납기는 고객의 요구에 따라 상이하며, 다섯째, 조기생산과 지연생산에 대한 벌금이 동일하다.

본 연구는 병렬기계, 작업장에서 상이한 납기 및 도착시간, 그리고 작업 가능한 장비그룹을 동시에 고려하여 조기생산과 지연생산의 합을 최소화하는 모델을 제시하고, 이를 효과적으로 해결하기 위한 발견적인 해법을 제안하고자 한다. 또한, 제안된 발견적인 해법의 효과성을 검증하기 위하여, 다양한 크기의 문제에 대하여 지능형 탐색 기법(Intelligent Search Method)인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)과 타부서치(Tabu Search : TS)와 비교한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 문제정의에 필요한 기호 및 가정을 설명하고 또한, 상세하게 문제를 기술한다. 3장에서는 발견적 해법의 성질 및 절차에 대하여 설명하고, 4장에서는 전산실험을 통하여 제안된 휴리스틱(Heuristic Algorithm : HA)의 성능을 분석하고, 결론 및 추후 연구과제가 5장에 언급된다.

2. 문제정의

본 연구에서는 n 개의 작업에 대하여 m 개의 병렬기계로 구성된 작업장에서 두 개의 장비그룹이 있는 문제의 일정계획 수립을 대상으로 한다. 고객들로부터 주문되는 수주(Order)를 작업(Job)으로 지칭한다. 작업의 특성상 처리가 가능한 장비들이 두 개의 그룹으로 분류되는 경우를 고려한다. 또한 이들 작업들은 각각 상이한 도착시간과 납기를 가지며, 작업의 종류 즉, 기하학적인 형상(Geometric Feature)과 중량, 길이 등의 요소에 따라 두 개의 장비그룹 중 하나의 장비그룹에서만 처리가 가능한 경우와 두 개의 장비그룹 중 어디에서나 처리가 가능한 경우가 존재한다. 그리고 작업 소요시간은 어느 장비그룹에서나 동일하다. 이러한 문제들은 각 작업들에 대하여 납기를 정확하게 맞추지 못하면 즉, 조기생산 및 지연생산 모두에 대하여 비용이 초래 되기 때문에 경제적 손실 및 신뢰도 저하로 인한 문제가 발생한다. 그러므로 납기와 작업의 완료시점 간의 편차를 최소화 하는 것이 목적이다.

Garey et al.[13]은 목적함수가 조기생산과 지연생산의 합을 최소화하고, 각 작업들의 납기가 서로 상이하고 도착시간이 동일 할 때, 단일 기계에서 이들의 일정을 수립하는 것이 NP-complete문제임을 처음으로 입증하였다. 본 논문에서는 병렬기계에서 각 작업들에 대한 상이한 도착시간과 납기를 가지며, 특정한 작업의 처리를 위한 장비그룹 조건을 추가한 경우에 조기생산과 지연생산의 합을 최소로 하는 일정계획 문제를 다루고자 한다. 이 문제는 Garey et al.이 제시한 모델에서 도착시간과 기계의 수를 일반화하고, 또한 장비그룹 제약을 추가한 것이므로 NP-complete 문제이다.

본 연구에서는 다음과 같은 상황을 가정한다.

- (1) 작업가능시점 이전에는 시작할 수 없다.
- (2) 긴급작업이 발생하더라도 현재 진행중인 작업

을 중지하고 다른 작업을 시작할 수는 없다 (Non-preemption).

- (3) 각 기계는 한번에 하나의 작업만을 처리할 수 있다.
 (4) 작업은 처리 가능한 장비그룹에서만 처리할 수 있다.

앞 절에서 언급한 문제를 모형화 하기 위한 기호는 다음과 같다.

< 기호설명 >

본 연구에서 제시한 모델을 수리적인 모형으로 표현하기 위하여 필요한 기호를 정의하면 다음과 같다.

- I : 장비들의 집합
 i : 장비의 인덱스 ($i=1, \dots, m$)
 J : 작업들의 집합
 j : 작업의 인덱스 ($i=1, \dots, n$)
 α, β : 각각 조기생산(Earliness)과 지연생산(Tardiness)에 대한 단위비용
 c_j : 작업 j 의 작업 완료시간 (Completion Time)
 r_j : 작업 j 의 도착시간(Ready Time)
 p_j : 작업 j 의 소요시간(Processing Time)
 d_j : 작업 j 의 납기(Due Date)
 E_j : 작업 j 의 조기생산 기간 (Earliness Time : $E_j = \max(0, d_j - c_j)$)
 T_j : 작업 j 의 지연생산 기간 (Tardiness Time : $T_j = \max(0, c_j - d_j)$)
 M_j : 작업 j 를 처리할 수 있는 장비들의 집합
 Φ : 무한히 큰 수(Big Number)
 $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{만일 작업 } j \text{가 장비 } i \text{에 배정되면} \\ 0 & \text{그외에(Elsewhere)} \end{cases}$
 $y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{동일한 장비에서 작업 } j \text{가 작업 } k \text{에} \\ & \text{선행(Precede)되면} \\ 0 & \text{그외에(Elsewhere)} \end{cases}$

< 모형화 >

위의 기호를 사용하여 작업의 특성에 따라 처

리 가능한 장비가 지정되는 일반적인 경우의 문제를 혼합정수계획 모형으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize } f(S) = \sum_j (\alpha E_j + \beta T_j) \quad (1)$$

Subject to

$$c_j \geq r_j + p_j x_{ij}, \quad j \in J, i \in M_j \quad (2)$$

$$c_j + E_j + T_j = d_j, \quad j \in J \quad (3)$$

$$x_{ij} + \sum_{i' \in M_j - (i)} x_{i'k} + y_{jk} \leq 2 \quad (4)$$

$$j = 1, \dots, n-1, k = j+1, \dots, n, i \in M_j$$

$$c_k - c_j + \Phi(3 - y_{jk} - x_{ij} - x_{ik}) \geq p_k, \quad (5)$$

$$j = 1, \dots, n-1, k = j+1, \dots, n, i \in M_j$$

$$c_j - c_k + \Phi(2 + y_{jk} - x_{ij} - x_{ik}) \geq p_j, \quad (6)$$

$$j = 1, \dots, n-1, k = j+1, \dots, n, i \in M_j$$

$$\sum_i x_{ij} = 1, \quad j \in J \quad (7)$$

$$E_j, T_j, c_j \geq 0, \quad j \in J \quad (8)$$

식(1)은 납기를 만족시키지 못했을 때 발생하는 조기생산과 지연생산의 합을 최소화하는 목적함수를 의미한다. 식(1)의 $\sum_j (\alpha E_j + \beta T_j)$ 는 $\sum_j \{ \sum_i x_{ij} (\alpha E_j + \beta T_j) \}$ 를 의미한다. 식(2)는 작업의 도착시점이 작업의 완료시점을 결정하는데 고려된다는 것을 의미한다. 이것은 작업이 도착하기 전에 작업착수를 할 수 없음을 의미하는 것이다. 식(3)은 작업의 완료시점을 기준으로 하여 조기생산 시간 또는 지연생산 시간을 계산한다는 것을 나타낸다. 식(4)는 작업 j 와 k 가 동일한 장비에 배정이 되는 경우에만 그들 사이에 적절한 선후관계를 명시하는 것이다. 즉, 동일한 장비에 작업 j 와 작업 k 가 배정될 때, 작업 j 와 작업 k 보다 선행되면 y_{jk} 는 1이고, 아니면 0을 의미하며, 이들이 각각 서로 다른 장비에 배정된다면 y_{jk} 가 0이 된다. 식(5)와 (6)은 작업 j 와 작업 k 가 같은

장비에 배정될 때, 그들의 완료 시점들 간의 관계를 설정한 것이다.

이것은 작업의 선행관계를 토대로 하여 진행될 때, 작업 j 와 작업 k 의 완료 시점들 사이에 충분한 시간을 확보하기 위한 것이다. 여기서, 부등호가 의미하는 것은 작업일정을 수립하는데 있어서 모든 장비들 또는 임의의 장비들에 대하여 유휴시간(Idle Time)을 허용하는 것이다. 만일 작업 j 와 작업 k 가 서로 다른 장비에 배정되면 식(5)와 (6)은 중복(Redundant)된다. 식(7)은 하나의 작업은 정확하게 하나의 장비에만 배정되어야 함을 의미한다. 식(8)은 비음조건을 나타낸다.

위의 수리모형은 정수형 변수를 포함하는 NP-hard 문제이며, 문제의 크기가 커졌을 경우 해를 구하는데 많은 어려움이 있으므로 다음 장에서는 효율적으로 해를 구할 수 있는 방법을 개발하겠다. 아울러 본 연구에서는 모든 작업들에 대한 조기 및 지연생산에 대한 단위비용을 동일 ($\alpha = \beta$)한 것으로 하여, 해의 특성과 해법을 제안하고자 한다.

3. 발견적 해법 설계

본 연구에서 다루는 병렬기계 일정계획수립 문제는 NP-complete 문제이기 때문에, 이 문제를 해결하기 위한 발견적 해법의 개발이 요구된다. 제안된 발견적 해법의 기본개념은 다음과 같다. 각 작업들의 납기가 빠른 것부터 차례대로 선택하여 배정 가능한 모든 장비들 중에서 목적함수의 증분치가 가장 작은 장비에 배정한다. 여기서 목적함수는 선택된 작업을 각 장비의 부분일정(Partial Schedule)에 추가하여 계산한다. 그리고 해의 개선을 위하여 교환전략(Swap Strategy)을 이용한다.

제안되는 발견적 해법 설계에 사용되는 기호들을 정의하면 다음과 같다.

$c_{i(k)}$: 장비 i 에서 k 번째 위치로 배정되는 작

업 j 의 완료시점

$s_{i(k)}^j$: 장비 i 에서 k 번째 위치로 배정되는 작

업 j 의 착수시점

$p_{i(k)}^j$: 장비 i 에서 k 번째 위치로 배정되는 작

업 j 의 조립시간

L : 배정해야 할 작업들의 집합

J_i : 장비 i 에 배정된 작업들의 집합

N_i : 장비 i 에 배정되어 있는 총 작업의 수

$j_{i(k)}$: 장비 i 에서 k 번째 위치에 배정되어 있는 작업 ($k=1,2, \dots, N_i$)

제안된 휴리스틱은 다음의 세 가지의 원칙(Principle)들을 기반으로 개발되었다.

원칙1: 장비선택에 대하여 유연성(Flexibility)

이 적은 작업들을 우선적으로 배정한다. 이는 처리 가능한 장비의 수가 적은 작업을 우선적으로 배정함을 의미한다.

원칙2: 납기가 빠른 작업을 우선 배정한다

(Earliest Due Date : EDD).

원칙3: 식(1)의 목적함수 증분치를 최소화하

는 장비에 작업을 배정하기 위하여, 작업 j 의 완료시점을 초기에는 가능한 한 작업 j 의 납기에 일치시킨다. 그리고 완료시점을 점차 이동시키면서 작업의 착수 및 완료시점을 결정한다.

본 연구에서 제안된 휴리스틱은 위의 세 가지 원칙을 근거로 하여 2단계(Two Phase)로 구성된다. 단계 I에서의 과정은 다음과 같다. 모든 작업들에 대하여 납기를 올림차순(Ascending Order)으로 재 정렬을 한다. 그리고 작업의 특성상 장비를 선택하는데 있어서 유연성이 부족한 작업들 (TE_2) 중에서 가장 빠른 납기를 갖는 작업을 순차적으로 선택하여 이용 가능한 장비에 우선적으로 배정하며, 그 다음에 정렬되어 있는 작업

들을 차례대로 선택하여 배정한다. 조기생산과 지연생산 비용의 합을 최소화하기 위하여 작업 j 의 완료시점을 가능한 한 초기에는 작업 j 의 납기에 일치시킨다. 다음단계로 각 기계에 대하여 조기생산 비용과 지연생산 비용의 합을 최소화하기 위해서 각 작업들의 완료시점을 이동시켜 보면서 배정 될 위치를 찾는다. 이러한 과정을 조기생산 비용과 지연생산 비용의 합이 최소화되는 장비를 찾을 때 까지 반복한다. 일정계획 대상인 모든 작업들의 배정이 완료되었을 때 끝낸다. 단계 II에서는 단계 I에서 각 장비마다 배정된 작업순서를 현재 해(Incumbent Solution)로 하여 교환전략을 사용하여 가장 좋은 해(Best Solution)를 탐색한다.

앞에서 전반적으로 언급한 휴리스틱을 단계별로 기술하면 다음과 같다.

<단계 I(해 탐색 단계)>

[단계 1] 모든 작업들에 대하여 납기를 올림차순으로 재 정렬한다. 만일 동일한 경우가 발생하면 p_j 가 큰 작업 순서로 정렬하고, 그래도 동일하면 r_j 가 큰 작업 순서로 정렬하고, 여전히 동일하면 임의로 작업을 정렬한다.

[단계 2] $j \in TE_2$ 인 작업들 중에서 가장 빠른 납기를 갖는 작업을 순차적으로 선택하여 단계4로 간다.

[단계 3] $j \in TE_1$ 인 작업들 중에서 가장 빠른 납기를 갖는 작업을 순차적으로 선택하여 단계4로 간다.

[단계 4] 선택된 작업을 처리 가능한 모든 장비들에 대하여 배정(Allocation)과정을 수행한다.

단계 4.1: 만일 $p_{i[k]} \leq (s_{i[k+1]}^i - c_{i[k-1]}^i)$ 이고 처리 가능한 장비그룹이면, $J_i \leftarrow J_i \cup \{j\}$ 로 변경하고, 부분일정의 목적함수 $f_i(s)$ 를 계산한다. 여기서, $f_i(s)$ 는 $\sum_{j \in J_i} (aE_j + \beta T_j)$ 이다.

단계 4.2: 만일 $p_{i[k]} > (s_{i[k+1]}^i - c_{i[k-1]}^i)$ 이고 처리 가능한 장비그룹이면, 다음의 3가지 이동전략을 이용하여 가장 작은 목적함수 $f_i(s)$ 를 갖는 장비 i 에 작업 j 를 배정한다.

- (1) $c_{i[k]}^i \leftarrow s_{i[k+1]}^i$ 한 후, ($k-1$ 번째 위치의 작업, $k-2$ 번째 위치의 작업, $k-3$ 번째 위치의 작업, ...)들을 전방으로 이동시킨다.
- (2) $s_{i[k]}^i \leftarrow c_{i[k-1]}^i$ 한 후, ($k+1$ 번째 위치의 작업, $k+2$ 번째 위치의 작업, $k+3$ 번째 위치의 작업, ...) 들을 후방으로 이동시킨다.
- (3) $c_{i[k]}^i \leftarrow d_j$ 한 후, 이미 배정되어 있는 작업들을 전후 방향으로 이동시킨다.

[단계 5] 만일 $L = \emptyset$ 이면, 종료하고, 그렇지 않으면 단계 4를 반복 수행한다.

<단계 II(교환전략에 의한 개선 단계)>

[단계1] 단계 I에서 각 장비마다 도출된 해를 현재 해로 한다.

[단계2] 장비 i 의 순서상에서 교환되어질 두 작업을 선택한다.

[단계3] 첫번째 위치에 배정된 작업($j_{i[1]}$)을 기준으로 하여 맨 마지막 위치에 배정된 작업($j_{i[N]}$)으로부터 직전(Previous)의 위치($j_{i[N-1]}$, $j_{i[N-2]}$, $j_{i[N-3]}$, ...)에 배정되어 있는 작업들을 한번에 한 개씩 교환 해 보면서, 그때마다 부분일정의 목적함수 $f_i(s)$ 를 계산하여 현재 해와 비교한다.

단계 3.1: 만일 현재 해 보다 교환 후의 해가 좋으면 교환된 작업순서를 받아들인다. 그리고 교환된 작업들의 순서를 현재 해로 대체한다. 그리고 단계 1로 간다. 만일 이전에 한번 교환된 경우를 발견하면 교환을 하지 않는다.

단계 3.2: 만일 교환 후의 해보다 현재 해가

좋으면 단계 4로 간다.

[단계 4] 현재 기준의 직후(Successor) 위치에 배정되어 있는 작업을 기준으로 하여 단계 3을 반복 수행한다. 만일 현재 기준의 위치($j_{i,k}$)와 맨 마지막 위치(j_{i,N_i})가 같으면 단계 5로 간다.

[단계 5] 현재 배정된 작업의 순서를 가장 좋은 해로 결정한다. 그리고 종료한다.

4. 전산실험 및 결과

본 절에서는 제안된 휴리스틱의 성능을 평가하기 위하여 선박용 엔진 조립공장의 상황을 고려하였다. 선박용 엔진타입은 실린더(Cylinder)의 수와 실린더의 내경(Bore)의 크기에 따라 초대형 엔진과 대형엔진으로 분류되며, 이들은 기하학적인 형태와 중량, 길이 등의 특성치를 가지고 있다. 이러한 특성치에 따라 엔진타입별로 조립 가능한 장비가 제한된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 상황에 대하여 실험 조건들을 다음과 같이 설정하였다.

- (1) 작업의 종류가 대형 엔진인 경우 조립시간(p_j)은 [30, 40] 이고, 초대형 엔진인 경우는 [40, 50] 사이의 이산형 일양 분포(Discrete Uniform Distribution)로부터 각각 랜덤하게 발생시킨다.
- (2) 작업들의 도착시간(r_j)은 [1, 365] 사이의 이산형 일양 분포로부터 랜덤하게 발생시킨다. 작업의 도착은 일년동안 계속 발생한다는 것을 의미한다.
- (3) 각 작업의 납기(d_j)는 [$r_j + p_j, r_j + p_j + k_j$] 사이의 이산형 일양 분포로부터 랜덤하게 발생시킨다. 여기서 k_j 는 허용치(Allowance Value)를 의미하는데, 이것은 작업이 조립공장에 도착한 후 완료되기 까지 조립시간을 제외하고 평균적으로 허용되

는 여유시간이 20일 정도임을 나타낸다. 범위는 [10, 30] 사이의 이산형 일양 분포로부터 랜덤하게 발생시킨다.

- (4) 초대형 엔진의 수는 10%에서 15% 사이의 이산형 일양 분포로부터 난수를 랜덤하게 발생시킨 후, 그 비율을 전체 엔진대수에 곱하여 대수를 결정한다. 이것은 초대형 엔진의 대수가 평균적으로 전체 엔진대수의 10%에서 15% 범위 내에 수주가 된다는 것을 의미한다.

위의 실험 조건들을 적용하여 제안된 휴리스틱이 효과적으로 해를 탐색하는지를 검증하기 위하여 다양한 크기의 문제들에 대하여 전산실험을 수행하였다. 제안된 휴리스틱은 SUN워크스테이션인 ULTRA SPARC에서 C언어로 프로그래밍 되었다. 장비의 대수와 작업의 수는 <표 1>과 같은 조합(Combination)으로 구성하고, 각 실험에 대하여 랜덤하게 20문제씩 생성하여 실험하였다.

<표 1> 장비와 작업의 조합

구 분	장비의 수(m)		작업의 수(n)
	장비그룹 A	장비그룹 B	
실험 1	3	2	50
실험 2	7	3	100

제안된 휴리스틱을 평가하기 위해서 지능형 탐색 기법인 유전 알고리즘[14, 17]과 타부서치[1, 15, 16]에 의해서 구한 해와 비교검증 하였다. 유전 알고리즘과 타부서치 역시 C언어로 작성하였다. 본 논문에 사용한 유전 알고리즘에 대한 흐름도는 부록A에 기술되어 있다. 유전 알고리즘을 수행하기 위하여 사용한 기본 파라미터 정보는 다음과 같다. 최대 세대수(max_gen)는 4000이고, 모집단(pop_size)의 크기는 100이다. 교차변이율(p_c)은 0.85이고, 돌연변이율(p_m)은 0.05로 하였다. 교차변이 연산자(Crossover Operator)는 순서 교차(Order Crossover)를 사용하였고, 돌연변이(Mu-

tation)를 위한 연산자는 상호교환(Reciprocal Exchange) 방식을 이용하였다. 그리고 타부서치에 대한 흐름도 역시 부록B에 기술되어 있다. 여기에 사용된 타부서치는 장기기억함수를 사용하였으며, 기본 정보로는 다음과 같다. 해의 이동속성을 일정기간 기억하는 타부목록의 크기는 30이며, 이웃해의 생성방법으로는 교환이동을 사용하였다. 그리고 해의 이동속성을 나타내는 타부속성은 흔히 이동원소와 그 위치 등으로 나타낸다. 본 연구에서는 타부속성을 교환이동 하려는 장비와 작업, 교환이동 후의 장비와 작업의 순서로 나타내었다. 그리고 종료조건으로는 최대 반복수로 하였으며, 이는 8000회로 설정하였다. 유전 알고리즘과 타부서치에서 최대 반복 수를 다르게 한 것은 해의 탐색 빈도수를 동일하게 하기 위한 것이다.

본 논문에서는 제안된 휴리스틱과 유전 알고리즘을 비교하는 척도로 차이비율(Gap Ratio: GR)을 사용한다. 여기서, H_A 는 제안된 휴리스틱에 의한 목적함수 값이고, G_A 는 유전 알고리즘에 의한 목적함수 값이고 T_S 는 타부서치에 의한 목적함수 값이라고 정의하자. 그러면 차이비율 즉, $GR_1 = ((G_A - H_A) / H_A)$ 과 $GR_2 = ((T_S - H_A) / H_A)$ 으로 정의된다. GR_1 은 제안된 휴리스틱의 해와 유전 알고리즘의 해들 간의 편차를 추정하는 것이다. 그리고 GR_2 는 제안된 휴리스틱의 해와 타부서치의 해들 간의 편차를 추정하는 것이다. AGR 은 평균차이비율을 의미한다. 이러한 실험의 결과는 <표 2>에 요약정리되어있다. <표 2>에서 GR_1 과 GR_2 열의 ‘-’ 값은 주어진 최대 세대수의 범위 내에서 유전 알고리

<표 2> 실험결과 및 해에 대한 차이 분석표

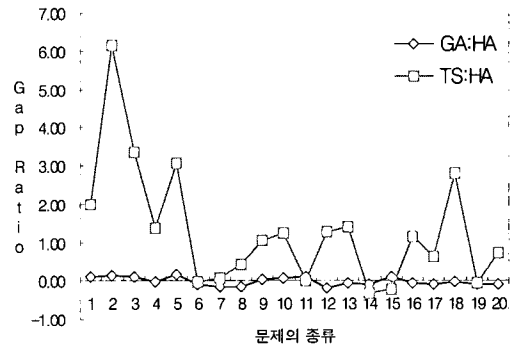
문제	$m=5, n=50$ 인 경우						$m=10, n=100$ 인 경우				
	해(Solution)			차이비율(GR)			해(Solution)			차이비율(GR)	
				GR_1	GR_2	GR_1				GR_2	
	HA	GA	TS	GA:HA	TS:HA	HA	GA	TS	GA:HA	TS:HA	
P1	395	443	1188	0.12	2.01	785	1296	2339	0.65	1.98	
P2	295	332	2109	0.13	6.15	484	823	2312	0.70	3.78	
P3	412	456	1792	0.11	3.35	778	1369	2182	0.76	1.80	
P4	504	498	1191	-0.01	1.36	642	1170	2854	0.82	3.45	
P5	260	306	1060	0.18	3.08	570	1053	2080	0.85	2.65	
P6	516	468	510	-0.09	-0.01	615	1069	2050	0.74	2.33	
P7	630	533	668	-0.15	0.06	814	1106	3520	0.36	3.32	
P8	456	380	658	-0.17	0.44	746	1228	2014	0.65	1.70	
P9	980	1019	1997	0.04	1.04	1036	1468	3146	0.42	2.04	
P10	404	428	911	0.06	1.25	574	902	3141	0.57	4.47	
P11	701	767	709	0.09	0.01	901	1496	2063	0.66	1.29	
P12	345	281	786	-0.19	1.28	615	810	488	0.32	-0.21	
P13	308	292	741	-0.05	1.41	577	858	2177	0.49	2.77	
P14	1127	1042	772	-0.08	-0.31	1348	1710	1747	0.27	0.30	
P15	671	740	522	0.10	-0.22	1152	1484	2932	0.29	1.55	
P16	532	503	1134	-0.05	1.13	1078	1318	1007	0.22	-0.07	
P17	608	549	993	-0.10	0.63	645	1067	2358	0.65	2.66	
P18	393	382	1495	-0.03	2.80	638	846	1806	0.33	1.83	
P19	468	429	441	-0.08	-0.06	1029	1642	1997	0.60	0.94	
P20	794	732	1361	-0.08	0.71	801	1615	1948	1.02	1.43	
평균차이비율 (Average Gap Ratio)				-0.01	1.31				0.57	2.00	

즘의 해 또는 타부서치의 해가 제안된 휴리스틱의 해보다 좋다는 것을 의미하며, '+' 값은 제안된 휴리스틱의 해가 유전 알고리즘 또는 타부서치의 해보다 좋다는 것을 의미한다.

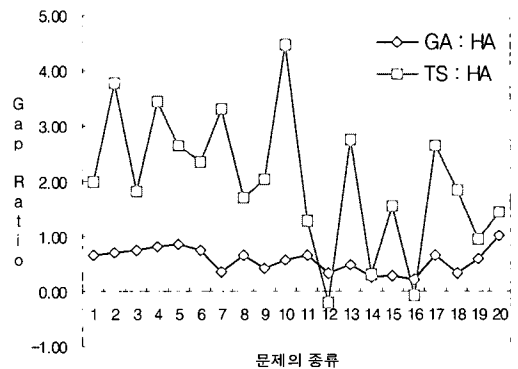
실험결과에 의하면, 제안된 휴리스틱의 수행 시간은 문제의 크기에 상관없이 평균적으로 0.20 초 이내에서 해를 도출하였으며, 반면에 유전 알고리즘은 문제의 크기에 따라 평균적으로 각각 25분과 148분이 소요되었으며, 타부서치는 각각 10분과 67분이 소요되었다. <표 2>에서 알 수 있듯이, 작업의 수와 장비의 수가 적은 경우에 제안된 휴리스틱의 해와 유전 알고리즘의 해는 평균적으로 차이가 거의 없다($AGR_1 = -0.01$)는 것을 알 수 있었다. 그리고 문제의 크기를 실제상황으로 확장해 본 결과, 제안된 휴리스틱의 해가 유전 알고리즘의 해보다 월등하게 좋다($AGR_1 = 0.57$)는 것을 알 수 있었다. 그러나 타부서치에 의해서 구한 해는 문제의 크기에 관계없이 휴리스틱과 유전 알고리즘에 의해서 구한 것보다 좋은 결과를 보여주지 못함을 알 수 있었다($AGR_2 = 1.31, 2.00$). 이러한 현상은 실제상황의 문제를 해결하기 위해서는 탐색해야 할 공간이 방대한 관계로 메타휴리스틱(Meta-heuristic) 기법을 가지고 한정된 시간 내에서 더 이상 양질의 해를 찾기가 어렵다는 것을 의미한다.

따라서, 작업의 수와 기계 수가 증가함에 따라 상이한 납기와 도착시간을 가지며 장비그룹을 갖는 병렬기계 일정계획 문제에서 제안된 휴리스틱이 짧은 수행시간 내에 양질의 해(Good Solution)를 제공해 준다는 것을 알 수 있었다.

<그림 1>과 <그림 2>는 제안된 휴리스틱의 해와 유전 알고리즘의 해에 대한 차이비율과 제안된 휴리스틱의 해와 타부서치의 해에 대한 차이비율을 시각적으로 보여주기 위하여 그래프로 보여준 것이다. 여기서 가로 축은 실험한 문제의 종류를 나타내고, 세로 축은 차이 비율을 나타낸다.



<그림 1> $m=5, n=50$ 인 경우 해에 대한 차이비율 비교



<그림 2> $m=10, n=100$ 인 경우 해에 대한 차이비율 비교

5. 결 론

본 논문에서는 병렬기계에서 각 작업들은 상이한 납기와 도착시간을 가지며, 작업의 특성에 따라 처리 가능한 장비그룹이 존재하는 일정계획 문제를 혼합정수계획 모형으로 정식화 하였으며 또한, 이 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 휴리스틱을 개발하였다. 개발된 휴리스틱의 효과성(Effectiveness)과 적용가능성(Applicability)을 입증하기 위하여, 현장 문제와 동일한 크기의 다양한 문제들에 대하여 메타휴리스틱의 일종인 유전 알고리즘과 타부서치의 해와 비교분석 하였다. 실험 결과, 개발된 휴리스틱은 이러한 문제들에

대하여 짧은 시간 내에 양질의 해를 제공해 준다는 것을 보여주었다.

향후의 연구과제로는 비정규평가기준(Non Regular Performance Measure)을 갖는 병렬 작업장에서 작업 가능한 장비에서 소요시간이 다른 경우와 작업특성에 따라 공간제약이 있는 문제로 확장하여 연구 해 볼 필요가 있을 것이다. 현재 이러한 문제들에 대하여 연구가 진행 중에 있다.

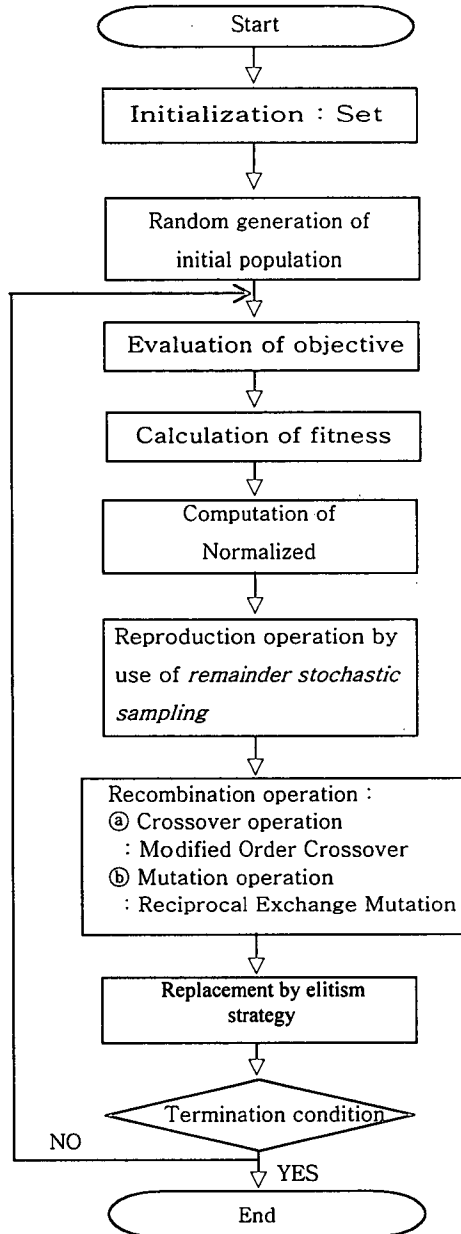
참 고 문 헌

- [1] 김여근, 현철주, "준비시간이 있는 혼합모델 조립라인의 제품투입순서 결정", 『경영과학』 제13권, 제1호, 1996년 2월, pp.13-27.
- [2] Adamopoulos G. I. and C. P. Pappis, "Scheduling Jobs with Different Job-dependent Earliness and Tardiness Penalties Using the SLK Method," *European Journal of Operational Research*, Vol.88, 1996, pp.336-344.
- [3] Ahmed M. U. and P. S. Sundararaghavan, "Minimizing the Weighted Sum of Late and Early Completion Penalties in a Single Machine," *IIE Transaction*, Vol.22, 1990, pp. 288-290.
- [4] Bagchi, U., R. S. Sullivan, and Y. L. Chang, "Minimizing Mean-squared Deviation of Completion Times about a Common Due Date," *Management Science*, Vol.33, 1987, pp. 894-906.
- [5] Balakrishnan, N., J. J. Karnet, and S. V. Sridharan, "Early/Tardy Scheduling with Sequence Dependent Setups on Uniform Parallel Machines," *Computers & Operations Research*, Vol.26, 1999, pp.127-141.
- [6] Centeno, G. and R. L. Armacost, "Parallel Machine Scheduling with Release Time and Machine Eligibility Restrictions," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.33, 1997, pp. 273-276.
- [7] Cheng, T. C., and Z. L. Chen, "Parallel-machine Scheduling Problems with Earliness and Tardiness Penalties," *Journal of the Operational Research Society*, Vol.45, 1994, pp. 685-695.
- [8] Cheng, T. C., and C. C. Sin, "A State-of-the-Art Review of Parallel-Machine Scheduling Research," *European Journal of Operational research*, Vol.47, 1990, pp.271-292.
- [9] Cheng, R., M. Gen, and T. Tozawa, "Minmax Earliness/Tardiness Scheduling in Identical Parallel Machine System Using Genetic Algorithms," *Computers and Industrial Engineering*, Vol.29, 1995, pp.513-517.
- [10] De, P, J. B. Ghosh, and C. E. Wells, "Scheduling to Minimize Weighted Earliness and Tardiness about a Common Due Date," *Computers & Operations Research*, Vol.18, 1991, pp.463-475.
- [11] Fry, T. E., R. D. Armstrong, and J. H. Blackstone, "Minimizing Weighted Absolute Deviation in Single Machine Scheduling," *IIE Transactions*, Vol.19, 1987, pp.445-450.
- [12] Funda, S. S. and G. Ulosoy, "Parallel Machine Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties," *Computers & Operations Research*, Vol.26, 1999, pp.773-787.
- [13] Garey, M. R., R. E. Tarjan, and G. T. Wilfong, "One-Processor Scheduling with Symmetric Earliness and Tardiness Penalties," *Math Ops Res.* Vol.13, No.2, 1988, pp.330-348.
- [14] Gen, M., and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, A Wiley-Interscience Publication, 1997.
- [15] Glover, F., "Tabu Search-Part I," *ORSA Journal on Computing*, Vol.1, No.3, 1989, pp. 190-206.

- [16] Glover, F., "Tabu Search-Part II," *ORSA Journal on Computing*, Vol.2, No.1, 1989, pp. 4-32.
- [17] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Co., 1989.
- [18] Hall, N. G. and M. E. Posner, "Earliness-tardiness Scheduling Problems I: Weighted Deviation of Completion Times about a Common Due-date," *Operations Research*, Vol.39, 1991, pp.836-849.
- [19] Kanet, J. J., "Minimizing the Average deviation of Job Completion Times about a Common Due Date," *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.28, 1981, pp.643-651.
- [20] Lee, C. Y., S. L. Danusaputro, and C. S. Lin, "Minimizing Weighted Number of Tardy Jobs and Weighted Earliness-tardiness Penalties about a Common Due Date," *Computers & Operations Research*, Vol.18, 1991, pp.379-389.
- [21] Sridharan, V. and Z. Zhou, "Dynamic Non-preemptive Single Machine Scheduling," *Computers & Operations Research*, Vol.23, No.12, 1996, pp.1183-1190.
- [22] Sridharan, V. and Z. Zhou, "A Decision Theory Based Scheduling Procedure for Single Machine Weighted Earliness and Tardiness Problems," *European Journal of Operational research*, Vol.94, 1996, pp.292-301.
- [23] Sundararaghavan, P. S. and M. U. Ahmed, "Minimizing the Sum of Absolute Lateness in Single Machine and Multi Machine Scheduling," *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.31, 1984, pp.325-333.
- [24] Yano, C. A. and Y. D. Kim, "Algorithms for a Class of Single Machine Tardiness and Earliness Problems," *European Journal of Operational research*, Vol.52, 1991, pp.167-178.

[부록 A]

본 논문에서 구현한 유전 알고리즘의 구체적인 절차에 대한 흐름도는 다음과 같다.



[부록 B]

본 논문에서 구현한 타부서치의 상세한 절차를 기술한 흐름도는 다음과 같다.

