

## 공간제약을 갖는 선박용 엔진 조립공장의 효율적인 일정계획을 위한 발견적 기법

이동현<sup>1</sup> · 이경근<sup>1</sup> · 김재균<sup>2</sup> · 박창권<sup>2</sup> · 장길상<sup>3</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>울산대학교 산업공학과 / <sup>3</sup>한국오라클(주)

### A Heuristic for Efficient Scheduling of Ship Engine Assembly Shop with Space Limit

Dong-hyun Lee<sup>1</sup> · Kyung-keun Lee<sup>1</sup> · Jae-gyun Kim<sup>2</sup> · Chang-kwon Park<sup>2</sup> · Gil-sang Jang<sup>3</sup>

In order to maximize an availability of machine and utilization of space, the parallel machines scheduling problem with space limit is frequently discussed in the industrial field. In this paper, we consider a scheduling problem for assembly machine in ship engine assembly shop. This paper considers the parallel machine scheduling problem in which  $n$  jobs having different release times, due dates and space limits are to be scheduled on  $m$  parallel machines. The objective function is to minimize the sum of earliness and tardiness. To solve this problem, a heuristic is developed. The proposed heuristic is divided into three modules hierarchically: job selection, machine selection and job sequencing, solution improvement. To illustrate its effectiveness, a proposed heuristic is evaluated with a large number of randomly generated test problems based on the field situation. Through the computational experiment, we determine the job selection rule that is suitable to the problem situation considered in this paper and show the effectiveness of our heuristic.

#### 1. 서 론

주문생산 시스템에서 제품의 경쟁력 강화를 위해서는 인력과 시설의 효율·극대화와 제품의 적기 인도(Delivery)가 매우 중요하다. 수주생산 업체에서는 각 주문에 대한 생산일정계획을 정확하게 반영하여야 한다. 그 이유는 각각의 주문들에 대하여 납기를 얼마나 정확하게 맞출 수 있는가에 따라 비용감소 및 고객의 신뢰도에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 고객에 대한 납기 만족을 달성하기 위해서는 각각의 주문들에 대하여 생산일정계획을 정확하게 수립하는 것이 무엇보다도 중요하다. 특히 어떤 공정의 일정계획이 후속 공정의 일정에 결정적인 영향을 미치는 제품에 있어서는 생산일정계획의 중요성이 보다 크게 인식되고 있다.

이러한 생산방식의 대표적인 제품중의 하나가 선박용 엔진이다. 이는 엔진자체의 생산일정도 중요하지만, 그 엔진을 선박에 탑재한 후에 진행되는 선박의 건조일정 전체에도 영향을 미치기 때문이다. 'H'사의 선박용 엔진은 실린더의 수와 실린

더 안지름의 크기에 따라 크게 초대형엔진과 대형엔진의 두 종류의 제품군으로 분류되는데, 이를 제품군은 엔진의 용량에 따라 80여 종류의 제품으로 분류된다. 각 엔진제품은 기하학적인 형태와 중량, 길이 등의 특성값을 가지고 있다.

선박용 엔진을 생산하는 흐름은 크게 소재(주조, 단조) → 가공 → 조립의 순으로 이루어진다. 초대형엔진 제품군과 대형엔진 제품군의 전체 제작기간은 평균적으로 각각 340일과 290일 정도 소요된다. 제품의 특성상 전체 일정의 70% 이상이 자재 구매 및 소재 제작기간으로 소요되어진다. 이는 와부에서 원재료인 강판이나 인고트(Ingots)를 구매하기 앞서 발행되는 자재구매요청서(POR: Plan Order Requisition) 및 외자발주 조치 등에 많은 과정을 거쳐서 승인을 받아야 하기 때문이다. 그리고 가공 및 조립은 각각 30일에서 55일 정도 소요된다. 이와 같이 엔진에 대한 제작기간이 길고, 제조과정이 복잡하게 연관되어 있기 때문에 전체의 일정을 융통성 있게 조정할 필요성이 중요하게 인식되고 있다. 대부분의 수주생산 방식에서 생산일정계획은 조립공장의 조립착수 가능시점을 기준으로 하여 후진 전개(Backward Schedule) 방식으로 수립한다. 선박용 엔진을 조

립하기 위해서는 소재 및 가공공장에서의 선행 공정들의 소요 시간에 따라 실제 조립착수 가능시점이 결정된다. 따라서 본 연구에서는 이것을 조립공장에 대한 작업 도착시간으로 간주 한다. 선박용 엔진의 합리적인 조립착수 및 완료시점은 조립 공장 내에 있는 여러 대의 조립장비에 대한 일정계획수립에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 여러 대의 조립장비(12대의 조립장비)가 있는 'H'사의 선박용 엔진 조립공장을 대상으로 일정계획 수립을 하고자 한다(Lee *et al.*, 1996). 각 조립 장비들은 가로 · 세로의 길이, 조립된 엔진의 시운전 후 해체를 위한 크레인의 용량, 시운전을 하기 위한 설비(동력계, 중간축, Floor Beam 등) 등의 공간제약을 가지고 있다. 따라서 엔진의 중량, 길이 및 기타 작업 특성에 따라 제품군별로 조립 가능한 장비가 제한된다. 그리고 조립 소요시간은 조립 가능한 장비에서는 동일하다. 본 연구에서 고려하는 조립장비의 일정계획 문제는 전형적인 병렬 기계의 일정계획 문제와는 달리 시간과 공간에 대한 일정계획을 동시에 수립해야 하는 특징을 가지고 있다.

Funda and Ulusoy(1999)는 두 개의 장비그룹이 있는 병렬작업장에서 작업 준비시간이 순서 의존적이고, 장비 그룹들간의 처리시간비율이 서로 상이한 경우에, 조기생산과 자연생산의 가중값 합을 최소화하는 문제를 해결하기 위하여 유전 알고리즘을 개발하였다. Balakrishnan *et al.*(1999)은 장비마다 처리속도가 상이한 병렬작업장에서 작업 준비시간이 순서 의존적이고, 납기 및 도착시간이 상이하고, 조기생산과 자연생산에 대한 비용이 상이한 경우에, 조기생산과 자연생산 비용의 합을 최소화하는 문제를 혼합정수계획 모형으로 정식화하여 해를 구하였다. Centeno and Armacost(1997)는 장비그룹제약이 있는 병렬작업장에서 도착시간이 상이하고, 납기가 도착시간에 따라 결정되는 경우에, 최대지연을 최소화하는 문제를 해결하기 위하여 발견적 해법을 제시하였다. Lee(1995)는 선박용 블록의 조립작업장 내에서 주어진 납기를 만족하고, 해당 조립작업장 내에서 블록의 기하학적인 형상(공간제약)을 고려하여 가장 현실적인 블록배치를 함으로써 총 처리시간(Makespan)을 최소화 하는 문제를 제시하였으며, 이를 해결하기 위한 전문가 시스템을 개발하였다. 이 문제는 3차원의 Packing문제로 정의된다(Li and Cheng, 1990). 이것을 수평적인 관점에서 보면, Packing의 높이는 블록조립 작업장(장비)의 길이가 되고, 각 블록들의 조립착수일과 완료일을 결정하기 위하여 블록들의 면적과 기하학적인 형상을 고려하여 배치하는 문제로 정리할 수 있다.

이와 같이 기존의 연구들을 통하여 확인한 바로는 공간제약을 고려한 병렬장비의 일정계획에 관한 연구들이 매우 미흡한

상태이다. 따라서, 본 연구에서 다루고자 하는 문제는 다음의 몇 가지 관점에서 기존의 연구들과 차이가 있다. 첫째, 목적함수가 비정규 평가척도(Non-regular Performance Measure)를 가진다. 둘째, 작업의 길이 및 중량을 동시에 고려한다. 셋째, 작업의 특성에 따라 작업 가능한 장비그룹이 결정된다. 넷째, 도착 시간과 납기가 상이하며, 작업 처리시간은 장비그룹에 상관없이 작업 가능한 장비들 내에서는 동일하다. 이것을 조립장비와 엔진타입에 대하여 길이 제약만 고려해 보면 Nesting 문제(Lee, 1995)로 정의될 수 있다. Nesting 문제는 잘 알려진 바와 같이 NP-complete 문제이다. 따라서, 본 연구에서 다루고자 하는 문제 역시 NP-complete 문제로 분류된다.

본 연구에서는 선박용 엔진 조립공장의 병렬장비에 대하여 상이한 납기와 도착시간 및 공간제약을 동시에 고려하여 조기 생산과 자연생산의 합을 최소화하는 문제를 제시하고, 이를 해결하기 위한 발견적 해법(Heuristic Algorithm : 이하 HA라고 사용)을 제안하고자 한다. 그리고 제안된 알고리즘의 적합성(Suitability)과 효율성(Efficiency)을 검증하기 위하여 선박용 엔진 조립공장의 실제 상황을 묘사한 다양한 크기의 문제들을 대상으로 전산실험을 수행한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 문제상황을 상세하게 정의하고, 문제를 정의하기 위하여 필요한 기호 및 가정을 설명한다. 3장에서는 발견적 해법의 성질 및 절차에 대하여 설명하고 4장에서는 제안된 알고리즘에 대한 전산실험을 통하여 적합성과 효율성을 검증한다. 그리고 결론 및 추후 연구과제를 5장에 언급한다.

## 2. 문제정의

본 연구에서는 선박용 엔진 조립공장의 병렬장비에서 엔진의 기하학적인 형상, 중량, 길이 및 기타 작업특성에 따라 조립 가능한 장비가 제한되는 문제의 일정계획을 수립하고자 한다. 여기서, 고객들로부터 수주되는 엔진을 작업이라고 가정한다. 이를 작업들은 각각 상이한 도착시간과 납기를 가지며, 기하학적인 특성값들을 가지고 있다. 작업의 종류는 초대형엔진 제품군과 대형엔진 제품군으로 분류되는데, 그 기준은 다음과 같다. 초대형엔진 제품군은 실린더의 수가 9 이상이고 실린더 안지름의 크기가 80cm 이상인 제품이며, 대형엔진 제품군은 그 이외의 것이다.

각 조립 장비들은 가로 · 세로의 길이, 조립된 엔진의 시운전 후 해체를 위한 크레인의 용·량, 시운전을 하기 위한 설비(동

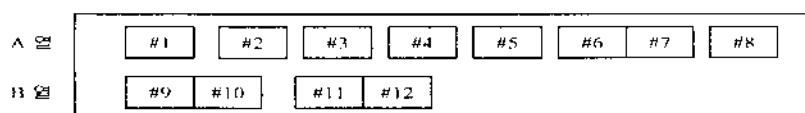


그림 1. 조립장비의 배치현황.

력계, 중간축, Floor Beam 등) 등의 제약을 가지고 있다. <그림 1>은 조립 장비들의 배치현황을 나타낸 것이다. 조립 장비들의 배치형태는 중간에 통로를 두고 2개의 열(Column) 즉, A열(A-column)과 B열(B-column)로 구성되어 있다. B열의 조립장비는 두 대가 한 대처럼 붙어 있다.

엔진종류별로 조립 가능한 장비는 다음과 같다. 초대형엔진 제품군은 기하학적인 형상과 길이 빛 조립완료 후 시운전을 할 때 순간적으로 가해지는 하중(대략 2,000 톤)을 견딜 수 있도록 장비가 한 쌍으로 구성된 조립장비에서만 작업이 가능하다. 즉, 쌍을 이루는 장비는 {(#6, #7), (#9, #10), (#11, #12)}이다. 그리고 이러한 조립장비에 초대형엔진 제품군을 배정할 때 조립장비의 가능성, 시운전 설비의 활용성 그리고 공간사용의 효율성 측면에서 대형엔진 제품군을 동시에 조립을 할 수 있다. 배정방법은 초대형엔진 제품군이 있는 경우, #6 장비를 중심으로 초대형엔진 제품군을 배정하고, #7 장비에 남아 있는 공간(길이)에 할당 가능한 대형엔진 제품군을 배정한다. 또한, (#9, #10)이 한 쌍으로 구성된 장비에서는 #10 장비를 중심으로 초대형엔진 제품군을 배정하고, #9 장비에 남아 있는 공간에 할당 가능한 대형엔진 제품군을 배정한다. 동일한 방법으로 #11 장비와 #12 장비에서도 #11 장비를 중심으로 초대형 엔진 제품군을 배정하고, 마찬가지로 #12 장비에 비어 있는 공간에 할당 가능한 대형엔진 제품군을 배정한다. 한편, 대형엔진 제품군은 어떤 조립장비에서도 조립이 가능하다.

본 연구에서는 이와 같은 공간제약을 만족하면서 고객의 요구납기를 만족하는 일정계획 수립이 목적이다. 만일 각 작업들에 대하여 납기를 정확하게 맞추지 못하면 즉, 조기생산을 하면 제품의 재고비용 및 보관장소의 활용문제가 발생하고, 자연생산을 하게 되면 선박의 전체 전조일정에 영향을 줄 뿐 아니라 고객에게 지체 보상 비용을 지불하여야 한다. 따라서 조기 및 자연생산 모두에 대하여 비용이 초래되기 때문에 납기와 작업의 완료시점 간의 편차를 최소화하는 것이 목적이다.

본 연구에서는 다음과 같은 가정을 토대로 하여 조립일정계획을 수립한다.

- (1) 수주단계에서 엔진별 특성값(길이, 중량, 형상 등)은 주어 진다.
- (2) 각 엔진의 특성값 중에서 가로·세로 길이 빛 중량을 고려하여 작업 가능한 장비가 결정된다.
- (3) 긴급주문이 발생하더라도 현재 진행중인 작업은 중지하고 다른 작업을 시작할 수는 없다(Non-preemption).

본 연구에서는 다음과 같은 3가지 제약조건을 고려한다. 첫째, 작업이 도착하기 전에 조립을 시작할 수 없다. 즉, 선행공정의 소요시간에 따라 조립가능시점이 주어진다. 둘째, 하나의 작업은 작업이 가능한 장비들 중에서 하나의 장비에만 배정된다. 셋째, 쌍으로 구성된 장비에 대해서는 공간이 허용하는 만큼 작업을 배정할 수 있다. 그리고 목적함수를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize } f(S) = \sum_i \left( \sum_{j \in J_i} (E_j + T_j) \right) \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는 장비의 인덱스이고  $j$ 는 작업의 인덱스이다.  $J_i$ 는 장비  $i$ 에 배정된 작업들의 부분 집합이다.  $E_j$ 는 작업  $j$ 의 조기생산기간(Earliness Time :  $E_j = \max(0, d_j - c_j)$ )이고,  $T_j$ 는 작업  $j$ 의 자연생산기간(Tardiness Time :  $T_j = \max(0, c_j - d_j)$ )이다.  $c_j$ 는 작업  $j$ 의 조립 완료시간(Completion Time)이고,  $d_j$ 는 작업  $j$ 의 납기이다. 위 식 (1)의  $\sum_i (E_j + T_j)$ 는 기계  $i$ 의 부분 일정(Partial Schedule)에 대한 목적함수를 의미하며,  $f(S)$ 로 나타낸다. 또한, 본 연구에서는 모든 작업들에 대한 조기 및 자연생산에 대한 단위비용을 동일한 것으로 하여, 해의 특성과 해법을 제안하고자 한다.

### 3. 발견적 해법 설계

본 연구의 대상시스템은 문제의 크기와 복잡성 때문에 수리적인 방법으로 최적해를 구하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 이 문제를 해결하기 위하여 효율적으로 해를 구할 수 있는 발견적 해법의 개발이 요구된다. 개발된 알고리즘 설계에 사용되는 기호들을 정의하면 아래와 같다.

$r_j$ : 작업  $j$ 의 조립 가능시점

$P_j$ : 작업  $j$ 의 처리시간

$d_{ik}$ : 장비  $i$ 에서  $k$ 번째 위치로 배정되는 작업의 완료시점

$e_{ik}$ : 장비  $i$ 에서  $k$ 번째 위치로 배정되는 작업의 착수시점

$p_{ik}$ : 장비  $i$ 에서  $k$ 번째 위치로 배정되는 작업의 조립시간

$n_{ik}$ : 장비  $i$ 에서  $k$ 번째 위치로 배정되는 작업의 납기

$J_i$ : 장비  $i$ 에 배정된 작업들의 부분집합

$n_i$ : 장비  $i$ 에 배정되어 있는 작업의 수

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

제안된 휴리스틱은 다음의 세 가지 원칙들을 기반으로 개발되었다.

**원칙 1:** 초대형엔진 제품군은 정해진 조립장비에서만 작업이 가능하다. 그리고 대형엔진 제품군은 공간제약을 만족하는 범위 내에서는 초대형엔진 제품군과 동시에 쌍으로 구성된 장비에서 작업이 가능하다.

**원칙 2:** 작업의 종류(엔진)가 초대형 제품군에 속하는 것들은 우선적으로 배정한다. 이것은 장비선택에 대한 유연성이 부족한 작업을 먼저 배정하는 규칙(LFJF: Least Flexible Job First)을 적용한 것이다(Centeno and Armacost, 1997). 그 이유는 조립기간이 길고 제품의 기하학적인 형상, 조립 장비들의 활용도 및 공간의 활용성 때문이다.

**원칙 3:** 식 (1)의 최소화를 위해 작업  $j$ 의 완료시점을 초기에는 가능한 한 작업  $j$ 의 납기에 일치시킨다.

본 연구에서 제안된 알고리즘은 다음 성질에 근거하여 수행된다.

**성질 1:** 특정한 장비 내에서 작업순서에 대한 경쟁이 치열하면 목적함수를 개선시키기 위하여 작업들의 이동을 가능하면 시간축의 방향이 0인 방향으로 하는 것이 납기와 작업의 완료시간과 편차를 최소화한다.

이것은 작업이 동시에 제약조건을 의미하는 것이다. 즉,  $f_{ik}$ 를 구하기 위하여 이동할 수 있는 범위는 장비  $i$ 에서  $k-1$ 번째 위치로 배정되어 있는 작업의 완료시점 또는 현재  $k$ 번째 위치에 배정하려는 작업의 작업가능시점 둘 중에서 큰 값을 가지는 것을 초과할 수 없다는 것이다. 위의 성질에 대한 증명은 Nandkeolyar et al.(1982)의 연구에서 이루어졌다.

본 연구에서 제안된 발견적 해법은 전술한 세 가지 원칙들과 성질을 근거하여 3가지 모듈로 구성된다. 모듈 I에서는 스케줄을 하기 위한 초기화 단계로써 어떤 작업을 먼저 선택할 것인지를 결정한다. 모듈 II에서는 모듈 I에서 결정된 작업선택 규칙에 따라 순차적으로 작업을 선택하여 이용 가능한 장비에 배정하며 동시에 작업순서를 결정한다. 모듈 III에서는 모듈 II에서 각 장비마다 배정된 작업순서를 현재 해(Incumbent Solution)로 하여 교환전략을 사용하여 가장 좋은 해(Best Solution)로 개선하는 과정이다.

휴리스틱1(HA1)은 본 연구에서 제안한 장비선택과 작업순서 결정을 동시에 수행하는 방안이다. 휴리스틱2(HA2)는 HA1을 비교하기 위한 것으로써, 기존의 병렬장비에서 일정계획을 수립하는 전형적인 기법인 2단계 방법 즉, 장비를 먼저 배정하고, 그 다음에 작업의 순서를 결정하는 방법(Pinedo, 1997)으로 설계한 방안이다. 본 연구에서 개발한 발견적 해법을 단계별로 기술하면 다음과 같다.

### 휴리스틱 1:

#### 모듈 I (작업선택 단계)

**단계 1:** 일정계획 대상인 작업(엔진)들에 대하여 초대형엔진 제품군과 대형엔진 제품군으로 분류한다.

**단계 2:** 제품군 내에서 납기순(EDD)으로 정렬을 수행한다. 만일, 동일한 경우가 발생하면  $P_i$ 가 큰 작업 순서로 정렬하고, 그래도 동일하면  $r_i$ 가 큰 작업 순서로 정렬하고, 여전히 동일하면 임의로 작업을 정렬한다.

#### 모듈 II (작업배정 및 순서결정 단계)

**단계 1:** 모듈 I에서 정렬되어 있는 작업들 중에서 작업의 종류(엔진)가 초대형 엔진인 것들부터 순차적으로 선택한다.

**단계 2:** 선택된 작업  $j$ 를 장비  $i$ 에 배정하기 위하여 다음과 같은 절차를 따른다. 여기서, 만일  $P_{ik} \leq (d_j - r_{k-1})$ 이고  $d_j \leq s_{[k+1]}$ 이며, 조립장비의 길이를 만족하면, 단계 2.1을 수행하고, 그렇지 않으면, 단계 2.2를 수행한

다. 그리고 선택된 작업  $j$ 를 배정하기 위하여 모든 기계  $i$ 에 대하여 탐색을 한다.

**단계 2.1:** 작업  $j$ 를 장비  $i$ 에 배정한다. 즉,  $j \leftarrow j, i \cup \{j\}$ 로 변경된다. 그리고 부분일정의 목적함수  $f_{ik}$ 를 계산한다.

**단계 2.2:** 다음의 3가지 이동전략을 이용하여 가장 작은 목적함수  $f_{ik}$ 를 갖는 장비  $i$ 에 작업  $j$ 를 배정한다. 단, 작업이 동시에 제약조건은 다음과 같다.  $s_{ik}$ 를 구하기 위하여 이동할 수 있는 범위는 장비  $i$ 에서  $k-1$ 번째 위치에 배정되어 있는 작업의 완료시점 또는 현재  $k$ 번째 위치에 배정하려는 작업의 작업가능시점( $r_j$ ) 둘 중에서 큰 값을 가지는 것을 초과할 수 없다.

**단계 2.2.1:** 작업  $j$ 의 완료시점을 이미 배정되어 있는  $k+1$ 번째 위치의 작업 착수시점에 일치시킨 후,  $\{k-1\}$ 번째 위치의 작업,  $k-2$ 번째 위치의 작업,  $k-3$ 번째 위치의 작업, … 를 전방으로 이동시킨다.

**단계 2.2.2:** 작업  $j$ 의 착수시점을 이미 배정되어 있는  $k-1$ 번째 위치의 작업 완료시점에 일치시킨 후,  $\{k+1\}$ 번째 위치의 작업,  $k+2$ 번째 위치의 작업,  $k+3$ 번째 위치의 작업, … 를 후방으로 이동시킨다.

**단계 2.2.3:** 작업  $j$ 의 완료시점을  $d_j$ 에 일치시키고 이미 배정되어 있는 작업들을 전후 방향으로 이동시킨다.

**단계 3:** 만일 배정해야 할 작업이 없다면 종료하고, 그렇지 않으면 단계 1을 반복 수행한다.

#### 모듈 III (해의 개선단계)

**단계 1:** 모듈 II에서 각 장비마다 도출된 해를 현재 해로 하여 모든 장비  $i$ 에 대하여 탐색을 한다.

**단계 2:** 선택된 장비  $i$ 에서 첫번째 위치에 배정된 작업( $j_{ik1}$ )을 기준으로 하여 맨 마지막 위치에 배정된 작업( $j_{ikn_i}$ )으로부터 직전(Previous)의 위치 ( $j_{ikn_i-1}, j_{ikn_i-2}, j_{ikn_i-3}, \dots$ )에 배정되어 있는 작업들을 한 번에 한 개씩 교환해 보면서, 그때마다 부분일정의 목적함수  $f_{ik}$ 를 계산하여 현재 해와 비교한다. 단, 교환되어 질 작업의 종류가 초대형엔진 타입인 경우는 조립장비의 길이를 만족하는 경우에만 교환이 가능하다.

**단계 2.1 :** 만일 현재 해보다 교환 후의 해가 좋으면 교환된 작업순서를 받아들인다. 그리고 교환된 작업들의 순서를 현재 해로 대체한다. 그리고 단계 1로 간다. 만일 이전에 한 번 교환된 경우를 발견하면 교환을 하지 않는다.

단계 2.2 : 만일 교환 후의 해보다 현재 해가 좋으면 단계 3으로 간다.

단계 3: 현재 기준의 직후(Successor) 위치에 배정되어 있는 작업을 기준으로 하여 단계 2를 반복 수행한다. 만일 현재 기준의 위치( $j_{[k]}$ )와 맨 마지막 위치( $j_{[n]}$ )가 같으면 단계 4로 간다

단계 4: 현재 배정된 작업의 순서를 가장 좋은 해로 결정한다. 그리고 종료한다.

#### 휴리스틱 2 :

##### 모듈 I (작업선택 단계)

단계 1과 2 모두 휴리스틱 1과 동일하다.

##### 모듈 II (작업배정 및 순서결정 단계)

모듈 II의 과정은 먼저, 장비를 선택하기 위하여 모든 장비에 대하여  $\{(c_{[k-1]} - s_{[k]}) + (d_{[k]} - s_{[k+1]})\}$ 를 계산하여 가장 작은 값을 가지는 장비에 작업을 배정한다. 그 다음, 배정된 장비 내에서 작업순서를 결정한다. 작업순서를 결정하기 위하여 작업을 이동하는 전략은 휴리스틱 1에서 모듈 II의 단계 2.2의 3가지 전략과 이동시 제약조건을 동일하게 수행한다.

##### 모듈 III (해의 개선단계)

단계 1에서 4까지 모두 휴리스틱 1과 동일하다.

## 4. 전 산 실험

본 장에서는 앞에서 기술한 발견적 해법의 성능 평가를 위한 전산실험 결과를 설명한다. 개발된 알고리즘의 성능 평가를 위하여 전산실험의 대상을 H사의 선박용 엔진 조립공장의 상황을 고려한다. 이 공장의 현재 조립할 수 있는 최대능력은 연 120대 정도이고 평균적으로 연간 100대에서 120대 사이의 선박용 엔진을 조립하고 있다. 이 중에서 평균적으로 20% 정도가 초대형엔진 제품군이다. 선박용 엔진은 실린더의 수와 실린더 안지름의 크기에 따라 초대형엔진 제품군과 대형엔진 제품군으로 분류되며, 이들은 기하학적인 형태와 중량, 길이 등의 특성치를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여 실험 조건들은 다음과 같이 선박용 엔진 조립공장의 실제 상황에 적합하게 설정하였다. 그리고  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값은 각각 1로 가정하여 수행한다.

(1) 작업의 종류가 대형 엔진인 경우 조립시간( $P_i$ )은 [30, 40]

이고, 초대형 엔진인 경우는 [40, 50] 사이의 이산형 일양 분포(Discrete Uniform Distribution)로부터 각각 랜덤하게 발생시킨다.

(2) 작업들의 도착시간( $r_i$ )은 [1, 365] 사이의 이산형 일양 분포

로부터 랜덤하게 발생시킨다. 작업의 도착은 일년동안 계속 발생한다는 것을 의미한다.

(3) 각 작업의 납기( $d_i$ )는  $[r_i + p_i, r_i + p_i + k_i]$  사이의 이산형 일양 분포로부터 랜덤하게 발생시킨다. 여기서  $k_i$ 는 허용값을 의미하는데, 범위는 [10, 30] 사이의 이산형 일양 분포로부터 랜덤하게 발생시킨다. 이것은 작업이 조립공장에 도착한 후 완료되기까지 조립시간을 제외하고 평균적으로 허용되는 여유시간이 20일 정도임을 나타낸다.

위의 실험조건들을 적용하여 제안된 발견적 해법이 효과적으로 해를 탐색하는지를 검증하기 위하여 다양한 크기의 문제들에 대하여 전산실험을 수행하였다. 제안된 발견적 해법은 IBM워크스테이션인 RS/6000 J40에서 C언어로 프로그래밍 하였다. 실험을 위하여 장비의 대수는 총 12대(초대형엔진 제품군 작업가능 장비 3대와 작업의 수는 3가지(80, 100, 120) 조합으로 구성하고, 각 작업의 크기에 대하여 랜덤하게 20문제씩 생성하여 총 60문제에 대하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 다룬 현장문제에 적합한 휴리스틱을 제안하기 위하여 휴리스틱 1과 휴리스틱 2를 비교분석하였고 또한, 적합한 작업선택 규칙을 제안하기 위하여 다양한 규칙들을 비교하였다.

본 연구의 실험에 사용한 작업선택 규칙들은 <표 1>과 같다. 이것은 Blackstone(1982)이 분류한 4가지 특성에 속하는 것들 중에서 선택하여 적용한 것이다.

표 1. 실험에 적용한 작업선택 규칙

특성	작업선택 규칙
1. 공정시간을 고려한 규칙	- SPT(Shortest Processing Time) Rule - LPT(Longest Processing Time) Rule
2. 납기일을 고려한 규칙	- EDD(Earliest Due Date) Rule - MST(Minimum Slack Time) Rule
3. 작업장 또는 작업의 특성을 고려한 규칙	- ERT(Earliest Ready Time) Rule
4. 조합형 규칙	- MCR(Modified Critical Ratio) Rule $MCR = \{ (r_i + p_i) / d_i / D \}$ 여기서, $D = \sum_j d_j$ 이다. 이것은 모든 작업들에 대한 납기들의 합을 나타낸다.

<표 2>는 작업을 배정할 때, 장비의 선택과 작업의 순서를 동시에 고려하는 휴리스틱 1과 장비를 먼저 배정한 후, 그 장비 내에서 작업순서를 결정하는 휴리스틱 2의 실험결과를 요약 한 것이다.

여기서, HA 1과 HA 2는 각각 휴리스틱 1과 휴리스틱 2를 적용했을 때의 목적함수값을 의미한다. 평균은 각 문제의 크기 모집단에 해당하는 평균을 의미하며, 편차는 표준편차를 의미한다. <표 2>에서 확인된 것처럼 작업의 일정계획을 수립할 때,

표 2. 휴리스틱 1과 휴리스틱 2의 평가척도에 대한 비교

우선 순위	평가 척도	80		100		120	
		HA1	HA2	HA1	HA2	HA1	HA2
EDD	평균	122.60	997.55	482.60	2896.70	1579.55	6209.15
	편차	57.08	439.39	207.76	1028.57	485.75	1333.67
MST	평균	175.40	902.00	592.50	2375.95	1716.15	5765.65
	편차	59.44	531.23	180.87	955.32	487.78	1743.87
SPT	평균	187.20	883.55	750.95	2302.35	2669.65	5489.05
	편차	78.18	464.06	312.14	678.92	636.98	1067.82
LPT	평균	152.35	544.80	522.35	2151.70	1491.70	5811.90
	편차	68.41	572.48	178.44	903.46	403.67	1699.09
MCR	평균	128.95	975.60	496.85	2353.50	1614.65	6480.90
	편차	60.97	513.78	206.14	887.45	516.60	1474.99
ERT	평균	136.85	590.65	507.70	2381.30	1592.00	5750.90
	편차	63.91	408.69	185.71	665.51	482.45	1427.52

장비선택과 작업순서를 동시에 고려하는 휴리스틱 1이 일반적으로 장비를 먼저 선택한 후, 해당장비 내에서 작업순서를 결정하는 휴리스틱 2보다 좋은 결과를 제공한다는 것을 알 수 있었다. <표 3>은 휴리스틱 1을 기반으로 했을 때, 작업의 크기가 증가함에 따라 어떤 작업선택 규칙을 적용해야 적합한지를 비교분석한 것이다. 일반적으로 낭기가 존재하는 일정계획 문제에 적합한 작업선택 규칙이 EDD 규칙이라고 추천하고 있다(Sule, 1997). 따라서, 본 연구에서는 EDD 규칙을 기준으로 하여 각 작업선택 규칙들에 대하여 대응 T-검정(Paired T-test)기법

표 3. 작업의 크기에 대한 작업선택 규칙들간의 영향분석(EDD 기준)

$n$	항목	대응비교(Paired T-test)				
		EDD-MST	EDD-SPT	EDD-LPT	EDD-MCR	EDD-ERT
80	통계량( $ t_0 $ )	8.030	7.570	4.147	2.696	4.861
	$t_{0.025}(19)$			2.093		
	채택여부	Re	Re	Re	Re	Re
100	통계량( $ t_0 $ )	6.856	8.439	2.879	1.317	2.207
	$t_{0.025}(19)$			2.093		
	채택여부	Re	Re	Re	Ac	Re
120	통계량( $ t_0 $ )	2.584	14.994	2.179	1.723	0.475
	$t_{0.025}(19)$			2.093		
	채택여부	Re	Re	Re	Ac	Ac

으로 유의수준 5%에서 검정을 하였다. 결과를 분석해 보면, 작업의 크기가 증가함에 따라 작업선택 규칙은 EDD와 MCR이 적합함을 알 수 있었다. 여기서, Re는 작업선택 규칙으로 EDD와 대응비교 하였을 때 부적합함을 의미하며, Ac는 적합하다는 것을 의미한다.

<표 4>는 휴리스틱 1을 기반으로 장비선택에 대한 유연성이 부족한 작업을 먼저 배정하는 규칙(LFJF)을 적용한 경우와 LFJF 규칙을 적용하지 않은 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다.

표 4. LFJF 규칙을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 평가척도에 대한 비교

우선 순위	평가 척도	80		100		120	
		LFJF 1	LFJF 2	LFJF 1	LFJF 2	LFJF 1	LFJF 2
EDD	평균	122.60	350.50	482.60	1111.80	1579.55	2719.20
	편차	57.08	101.38	207.76	402.20	485.75	604.48
MST	평균	175.40	962.30	592.50	2119.05	1716.15	4143.65
	편차	59.44	311.45	180.87	628.29	487.78	880.44
SPT	평균	187.20	1817.25	750.95	3520.00	2669.65	5887.50
	편차	78.18	436.35	312.14	680.87	636.98	689.79
LPT	평균	152.35	152.35	522.35	522.35	1491.70	1491.70
	편차	68.41	68.41	178.44	178.44	403.67	403.67
MCR	평균	128.95	387.65	496.85	1030.45	1614.65	2914.30
	편차	60.97	94.87	206.14	325.70	516.60	792.77
ERT	평균	136.85	325.35	507.70	988.30	1592.00	2722.30
	편차	63.91	108.10	185.71	380.24	482.45	841.74

여기서의 평균과 편차의 의미는 <표 2>와 동일한 것이며, LFJF 1은 LFJF 규칙을 적용한 결과이고 LFJF 2는 LFJF 규칙을 적용하지 않은 경우의 결과를 의미한다. <표 4>로부터 LFJF 규칙을 적용한 경우가 적용하지 않은 경우보다 양질의 해를 제공함을 알 수 있다. 여기서 특이한 현상은 LFJF 규칙을 적용하지 않은 경우에 LPT 작업선택 규칙이 우위에 있음을 보여주었다. 이는 LPT 규칙의 속성이 본 연구에서 다른 현장문제의 특성 즉, 초대형엔진 제품군을 우선 배정하는 장비선택의 제약성을 잘 반영하기 때문에 좋은 결과를 보여준 것이다. 따라서 본 연구에서 다른 현장문제를 해결하기 위해서는 LFJF 규칙을 적용하여 일정계획을 수립하는 것이 양질의 해를 제공한다는 것이 입증되었다.

## 5. 결 론

산업현장에서 중량, 길이 및 형상과 같은 작업 특성을 고려한 일정계획 수립 문제가 자주 발생되고 있다. 그 이유는 작업을 배정할 때 조립상의 가용성, 부대설비의 활용성, 그리고 공간사용의 효율성 측면이 강조되고 있기 때문이다. 이러한 문제의 특징은 전형적인 병렬기계의 일정계획 문제와는 달리 시간과 공간에 대한 제약조건을 동시에 고려하여 일정계획을 수립하여야 한다. 본 연구에서 제시한 문제는 뮤현고찰을 통하여 확인한 바로는 처음 제시된 문제라고 사료된다. 이를 해결하기 위하여 장비배정과 작업순서 결정을 동시에 수행하는 발견적 해법은 세안하였다. 그리고 제시된 발견적 해법의 효율성을 입증하기 위하여 먼저 장비를 배정 한 후에, 그 다음으로 작업순서를 결정하는 기존의 발견적 해법의 형태와 비교하였다. 또한, 보다 적합한 작업선택 규칙을 제시하기 위하여 EDD 규칙을 기준으로 MST, SPT, LPT, MCR, ERT 규칙들과 각각 내용 비교시험(Paired Comparison Test)을 하였다.

제안된 해법은 'H'사의 선박용 엔진 조립공장의 실제 상황을 묘사한 데이터를 이용한 전산실험을 통하여 매우 짧은 시간 내에 양질의 해를 제공함으로써 산업현장에서 유용하게 적용할 수 있는 실용적인 해법임을 보여주었다. 또한, 본 연구에서 제시된 MCR이 EDD와 병행 사용할 수 있는 효율적인 작업선택 규칙임을 보여주었다. 그리고 제시된 발견적 기법은 'H'사의 통합 생산정보관리시스템의 생산일정계획 모듈의 일부분으로 구현되었다.

추후 과제로는 조립공장 내의 주어진 제약 조건들이 변화할 때 쉽게 대처할 수 있는 해법의 유연성에 대한 연구가 필요하다. 그리고 선박용 엔진 조립공장의 효율적인 운영을 위한 납

기예측(Order Promising)시스템, 대안분석 시스템, 계획과 실적 상황 대비를 위한 오더 네트워크, 부하평준화 시스템, 설계일정과 자재일정을 연동시킨 시스템 등과 같은 통합된 생산일정계획 지원시스템(Production Scheduling Support System)의 구축에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- Balakrishnan, N., Karmet, J. J. and Sridharan, S. V. (1999), Early/Tardy scheduling with sequence dependent setups on uniform parallel machines, *Computers & Operations Research*, 26, 127-141.
- Blackstone, J. H., Phillips, D. T. and Hogg, G. L. (1982), A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations, *International Journal of Production Research*, 20, 27-45.
- Centeno, G. and Armacost, R. L. (1997), Parallel machine scheduling with release time and machine eligibility restrictions, *Computers and Industrial Engineering*, 33, 273-276.
- Funda, S. S. and Ulossoy, G. (1999), Parallel machine scheduling with earliness and tardiness penalties, *Computers & Operations Research*, 26, 773-787.
- Lee, D., Kim, J. and Hur, J. (1996), Decision support system for dynamic production schedule in the ship engine manufacturing system, *Proceedings of 20th International conference on Computers and Industrial Engineering*, 2, 1115-1118.
- Lee, K. J. (1995), Development of spatial scheduling expert systems, Ph. D. Dissertation, KAIST.
- Li, K. and Cheng, K. H. (1990), On three-dimensional packing, *SIAM Journal on Computing*, 19(5), 847-867.
- Nandkeolyar, U., Ahmed, M. U. and Sundararaghavan, P. S. (1982), Dynamic single-machine-weighted absolute deviation problem: Predictive heuristics and evaluation, *International Journal of Production Research*, 31(6), 1453-1466.
- Pinedo, M. (1997), *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Sule, D. R. (1997), *Industrial Scheduling*, PWS Publishing Co.



이동현

1985년 울산대학교 산업공학과 학사  
1987년 동아대학교 산업공학과 석사  
현재: 부산대학교 산업공학과 박사과정 수  
료, 제론정보기술(주) 대표이사  
관심 분야: 생산스케줄링, CIM, PDM, DB 응  
용, WEB Application, ERP

이경근

1971년 서울대학교 섬유공학과 학사  
1973년 서울대학교 경영학과 석사  
1987년 University of California Berkeley 산업공  
학 박사학위 취득  
현재: 부산대학교 산업공학과 교수  
관심 분야: 가격정책이론, DSS, 재고이론, 원  
가관리



김재균

1979년 인하대학교 산업공학과 학사  
 1981년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 1992년 한국과학기술원 경영과학 박사 취득  
 현재: 울산대학교 수송시스템공학부 교수  
 관심 분야: CIM, PDM, DB 응용, 정보표준화, WEB Application, Network Design



장길상

1986년 울산대학교 산업공학과 학사  
 1988년 한국과학기술원 산업공학 석사  
 1997년 한국과학기술원 경영정보공학 박사  
 현재: 한국오라클(주) Senior Technical Specialist  
 관심 분야: 데이터 베이스, 정보공학, ERP, EC, DW, 생산정보시스템



박창권

1986년 울산대학교 산업공학과 학사  
 1988년 한국과학기술원 산업공학 석사  
 1993년 한국과학기술원 산업공학 박사 취득  
 현재: 울산대학교 수송시스템공학부 부교수  
 관심 분야: 생산 스케줄링, 조합최적화, 지능형 탐색기법, 생산시스템의 컴퓨터 응용