

추가자원제약을 갖는 Job Shop 작업계획의 성능 비교

배 상 윤

전주공업대학 경영정보과

A Comparison of Dispatching Rules for Auxiliary Resource Constrained Job Shop Scheduling

Sang-Yun Bae

Dept. of Management Information Systems, Jeonju Technical College

This study presents the new dispatching rules of job shop scheduling with auxiliary resource constraint to improve the schedule performance measures related to completion time and due dates. The proposed dispatching rules consider the information of total work remaining and machine utilization to decrease mean flowtime and mean tardiness. The results of computer experiments show that those schedule performances are significantly improved by using the new dispatching rules. The results provide guidance for the researchers and practitioners of auxiliary resource constrained job shop scheduling to decrease mean flowtime and mean tardiness.

Keywords : Job Shop Scheduling, Dispatching Rule, Auxiliary Resource Constraint

1. 서 론

본 연구는 다양한 부품(job)의 공정(operation)을 주 설비(resource) 및 추가자원(auxiliary resource)에서 작업하는 job shop 작업계획(scheduling)을 다룬다. Job shop은 중소 제조업, 병원, 식당 및 학원 등 다양한 업종에서 볼 수 있는 시스템으로 생산활동의 혼잡도(shop congestion)가 높고 물류자동화가 어렵지만 다양화되어 가는 고객의 요구를 수용하기 위하여 증대되고 있는 실정이다. 추가 자원은 주 설비 외의 다른 설비, 작업자, 공구와 지그 및 고정구(jig and fixture) 등이다. 주 설비가 작업이 가능한 시점에 필요한 추가자원을 구할 수 없다면 작업 진행이 불가능하므로 추가자원은 제약이 된다[6, 7, 8].

Job shop 작업계획은 부품의 공정이 설비에서 작업이 시작되는 시각과 완료되는 시각을 계획하는 것으로 부품내의 공정순서를 지키는 순서제약(precedence constraint)

과 어떤 가공 시점에 각 설비는 단지 하나의 공정만을 수행할 수 있다는 자원제약(resource constraint)을 갖는다 [2]. 이러한 두 가지 제약을 만족하며 계획된 작업계획은 설비가 작업이 가능한 시점에 필요로 하는 작업자, 공구와 지그 및 고정구 등을 마련할 수 없다면 진행이 불가능하게 된다. Job shop은 작업의 진행을 위한 주 설비 외에도 추가자원이 필요한 경우가 흔히 있어 추가자원을 제약으로 가정하지 않고 단지 순서와 자원제약만을 지킨 작업계획은 실제적인 진행이 가능하지 않을 수 있다.

추가자원은 작업에 대한 보조가 필요하거나, 공구의 구매비용이 매우 높거나, 효율적인 작업을 위한 안내를 마련하거나, 작업의 수행을 위한 고정기 필요한 경우 등의 이유로 현장에서는 필요한 경우가 많다. 추가자원은 작업의 정확도와 효율성을 높이고 공정의 단순화, 검사의 간소화, 비숙련공 고용 가능 및 불량 감소 등의 효과를 얻게 할 수 있다. 이러한 작업자나 공구 등의 추가자

원을 마련하기 위해서는 비용이 발생하므로 대부분의 현장에서는 주 설비가 추가자원을 공유하여 사용함으로써 추가자원제약이 발생하게 된다. Job shop 작업계획에서 추가자원제약을 구성하는 요소는 주 설비, 주 설비와 보조설비, 주 설비와 작업자, 주 설비와 공구, 주 설비와 지그 및 고정구, 주 설비와 복수의 추가자원 등 다양한 형태로 존재할 수 있다.

그 동안 job shop 작업계획 연구는 수학적 최선해의 산출에 중점을 두고 정수계획법이나 동적계획법을 이용하는 최적화 모형 및 알고리즘 개발과 추계적(stochastic) 최적화기법인 genetic algorithm, tabu search와 simulated annealing을 이용한 기법 제시, 뉴럴 네트워크와 전문가 시스템을 적용한 지능형 모형 제시 및 방법 개발 등으로 이루어져 왔다. 이와 같은 이론적 연구 외에도 미비하지만 작업계획의 실제적 접근 측면을 보완하는 연구로 주 설비 외 작업자나 공구 등의 자원제약 추가, 설비 유연성에 의한 순서제약 및 자원제약의 가정 완화 및 현장의 예기치 않은 동적 상황에 실시간으로 대처할 수 있는 빠른 산출 시간을 갖는 기법으로 시뮬레이션, 새로운 발견적기법 및 할당규칙(dispatching rule) 개발에 대한 연구가 진행되어 왔다.

현장 적용 측면의 연구에서 작업자나 공구 등과 같은 추가자원제약을 고려하지 않으면 설비가 하나의 공정을 완료하고 다음 공정의 작업이 가능하여도 작업에 꼭 필요한 보조자원이 없으므로 공정을 시작할 수 없음이 지적되어 왔다[6, 8]. 기존 연구에서, 설비에서 작업이 가능하여도 필요한 공구가 없어서 작업을 시작하지 못하는 경우가 16%임[7], 설비가 공정의 작업이 가능하여도, 작업자가 다른 설비에서 작업 중이거나 작업물을 이동시키고 있으면 그 공정을 시작할 수 없음[6, 8] 지적하였다. 관련된 기존 연구들이 이와 같은 문제점을 지적하였음에도 불구하고 아직 추가자원제약 작업계획 연구는 미비한 실정이다.

본 연구의 목적은 추가자원제약이 있는 job shop 작업계획 방법의 개발이다. 이를 위하여 추가자원을 작업계획의 제약으로 다루는 방법 및 새로운 할당규칙을 개발한다. 컴퓨터 실험을 통하여 추가자원을 사용하는 공정수의 변화에 따른 작업계획 성능을 분석한다. 분석결과는 추가자원제약을 갖는 job shop에서 ERP(Enterprise Resource Planning)와 APS(Advanced Planning and Scheduling) 등의 작업계획 모듈로 사용될 수 있다. 또한 공구 등의 추가자원을 마련하거나 새로운 작업자를 배치하는 비용과 납기준수 및 제조원가를 절감시키는 이익을 비교하는 투자모델 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

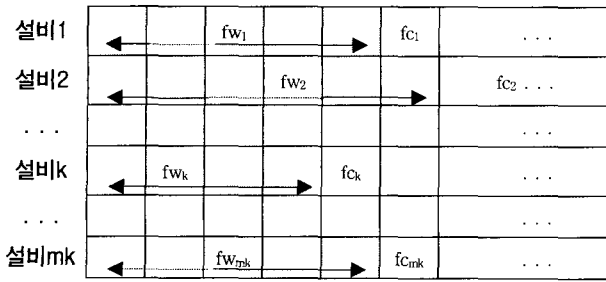
2. 문제설정

2.1 작업계획의 가정

작업에서는 각 작업의 시작가능시각 및 납기와 공정수가 서로 다르며 재작업계획 시점에 완성되지 않은 작업의 남아있는 공정부터 작업계획이 가능한 것으로 한다. 공정에서는 각 공정의 작업시간은 서로 다르고 각 공정의 작업시간에는 준비시간과 운반시간이 포함되어 미리 확정적으로 결정된 것으로 한다. 설비에서는 복수개의 대안설비가 있고 작업계획 시점에 모든 설비가 작업 시작 가능하고 작업계획 시점에 각 설비의 작업 시작가능시각이 서로 다른 것으로 한다. 순서제약에서는 각 부품은 서로 독립적인 다른 공정순서를 갖고 한 부품내의 공정은 선·후행 관계가 있는 것으로 한다. 자원제약에서는 각 설비는 어떤 작업 시점에 하나의 공정만을 작업할 수 있고 작업이 완료되기 이전에 중단하지 않는다. 추가자원제약에서는 공정을 작업하는 설비는 기본 설비 외에 작업자, 공구와 지그 및 고정구 등과 같은 보조자원은 유한하다고 가정하고 각 보조자원은 어떤 작업 시점에 하나의 공정만을 작업할 수 있고 작업이 완료되기 이전에 중단하지 않는 것으로 한다.

2.2 기호정의

부품 i 의 시작가능시각은 s_i , 납기는 d_i , 작업계획된 완료시각은 c_i , 총작업시간은 R_{ii} , 부품의 평균 작업시간은 MR_{ii} , 부품의 작업시간표준편차는 DR_{ii} 로 한다. 공정 (i,j) 의 작업시간은 pt_{ij} , (i,j) 를 포함한 부품 i 의 나머지 공정수는 O_{ij} , (i,j) 를 포함한 부품 i 의 공정의 작업시간의 합은 R_{ij} , (i,j) 를 작업계획 하는 시점에서 납기까지의 작업 여유시간은 $SL_{ij}=(d_i - c_{ij} - R_{ij})$, (i,j) 의 공정납기는 d_{ij} , (i,j) 를 가장 빨리 시작할 수 있는 시각은 σ_{ij} 를 사용한다. 공정납기 d_{ij} 는 부품납기와 그 부품의 총작업시간의 차인 작업여유를 해당 부품의 공정에 배분하는 방법인 $d_{ij}=d_{i-1}+pt_{ij}/R_{ii} \times d_i$ 를 사용하였다[11]. <그림 1>에서 보듯이 설비 k 의 사용가능시각은 f_k , 작업계획된 후 설비 k 의 사용완료시각은 fc_k , 설비 k 에서 작업되는 공정의 작업시간의 합은 fw_k , 작업계획된 후 평균설비가동률은 $\sum_i \sum_j pt_{ij} / \sum_k fc_k$ 로 정의한다. 본 연구에서는 작업계획을 무수히 반복되는 재작업계획의 한번의 시도로 보기 때문에 평균설비가동률의 분모를 모든 부품의 작업이 완료되는 시각인 총처리시간(makespan)으로 하지 않고 각 설비의 작업계획 완료시각인 fc_k 를 사용하고 있다. 작업계획 전개에서 t 반복에 작업계획 후보 공정의 설비가동률은 fw_k / fc_k , 전체 설비에 대한 평균설비가동률은 $\sum_k fw_k / \sum_k fc_k$ 로 정의한다.



〈그림 1〉 설비의 작업시간 합 f_{Ck} 와 사용완료시각 f_{Wk}

주 설비에 대한 복수개의 대안설비가 존재하는 것으로 문제를 설정하고 있다. (i,j) 의 대안설비 수는 m_{ij} , (i,j) 의 대안설비 집합은 MC_{ij} , (i,j) 의 대안설비 중에서 (i,j) 의 작업을 위해 선택된 설비는 mm_{ij}^* 로 한다. 대안설비를 다루는 방법은 부품의 남아 있는 공정 수인 O_{ij} 과 부품의 남아 있는 공정의 작업시간인 R_{ij} 를 대안 설비 수로 나누어 후행공정들의 대안설비 수가 적을 수록 작업계획 우선순위를 높게 하여 상대적으로 대안설비를 많이 갖는 부품의 작업계획을 뒤로 미루는 기존연구[9, 10]를 사용하기로 한다. 추가자원 g 의 사용가능시각은 h_g 로 한다. 알고리즘의 t 반복에서 작업계획 가능한 공정들의 집합 S_t , t 반복까지 작업계획된 공정들의 집합은 PS_t 로 정의한다.

2.3 성능평가척도

작업계획의 성능평가척도는 공장의 혼잡도와 재공재고의 수준을 나타내는 평균처리시간(mean flowtime), C_{mean} 과 고객의 만족도와 납기지연벌금과 관련되어 있는 평균순수납기지연(mean tardiness), T_{mean} 을 사용하기로 한다. $C_{mean} = \sum c_i / m_j$ 과 $T_{mean} = \sum [c_i - d_i]^+ / m_j$ 에서 m_j 는 부품의 최대수, $[x]^+ = \max(x, 0)$ 이다. C_{mean} 과 T_{mean} 은 총처리시간, 최대순수납기지연(maximum tardiness) 및 순수납기지연부품수(number of tardy jobs)과 함께 정규척도(regular measure)로서 이론적으로도 중요하지만 재고 및 납기와 관련하여 현장에서 중요하게 다루어져 왔다[2, 10, 11].

3. 작업계획 방법

3.1 작업계획 절차

본 연구가 가정하는 job shop의 작업계획 방법은 추가자원제약을 고려할 수 있도록 수정한 nondelay 작업계획 방법[2]과 3.3절에서 새롭게 제시하는 할당규칙을 사용하기로 한다. 많은 연구에서 효율적인 발견적기법으로 알

려진 nondelay 작업계획 방법은 선행공정이 완료된 후보 공정들 중에서 가장 빨리 시작될 수 있는 공정들에 대해 할당규칙의 우선순위를 사용하여 작업계획을 전개시키는 방법이다.

제시한 방법은 nondelay 작업계획 방법을 수정하여 단계 0에서는 각 부품의 서로 다른 시작가능시각 및 각 설비와 추가자원의 시작가능시각을 다룰 수 있게 함으로써 돌발 상황에 의한 재작업계획이 필요한 시점에 부품의 작업진도와 설비의 가용시각을 사용할 수 있게 하고 있다. 단계 1에서는 공정을 작업하는 대안설비를 선택하고 주 설비 및 추가자원의 사용가능시각을 비교하여 공정을 가장 빨리 시작할 수 있는 시각을 계산한다. 단계2에서는 새롭게 제시하는 할당규칙을 적용하고, 단계 3에서는 공정이 할당된 주 설비 및 추가자원의 사용 완료시각을 계산한다.

제시한 방법은 주 설비 외에도 공구나 작업자 등에 대한 추가자원제약, 재작업계획이 필요한 시점에 부품의 작업진도와 주 설비 및 추가자원의 시작가능시각을 다루고 있다는 점에서 기존의 방법과 차이가 있다. 추가자원이 세 개 이상인 경우에는 단계 0에서 해당 변수를 추가하고 단계 1 및 단계 3에서 σ_{ij} 와 f_{mm}^* 를 계산하는 수식에서 세 개 이상의 추가자원에 대한 시작가능시각과 완료시각을 계산하면 된다.

단계 0. (초기화)

부품 i 의 시작가능시각 s_i 와 납기 d_i , (i,j) 를 작업하는 대안설비 집합 MC_{ij} , 설비 k 의 사용가능시각 f_k , 추가자원 g 의 사용가능시각 h_g 를 지정하고 S_t 를 선행 공정이 완료된 공정으로 초기화한다. $t=1$, $PS_t = \emptyset$, $pt_{i0} = 0$, $\sigma_{i0} = s_i$, $\sigma_{j0} = s_j$ 로 둔다.

단계 1. (공정시작가능시각 및 설비결정)

S_t 에 있는 모든 공정 (i,j) 의 대안설비 중에서 (i,j) 를 가장 빨리 처리할 수 있는 설비 $mm_{ij}^* = \min_{k \in MC_{ij}} \{f_k\}$ 를 선택한다. $\sigma_{ij} = \max\{\sigma_{ij-t} + pt_{ij-t}, f_{mm_{ij}^*}, h_g\}$ 와 $\sigma^* = \min_{(i,j) \in S_t} \{\sigma_{ij}\}$ 를 계산하고 σ^* 를 갖는 (i,j) 에 해당하는 설비 mm_{ij}^* 로 mm^* 를 결정한다.

단계 2. (공정의 작업계획)

설비 mm^* 와 같은 설비 mm_{ij}^* 를 요구하고 $\sigma_{ij} = \sigma^*$ 인 (i,j) 가 유일하면 (i,j) 를 선택하고 단계 3으로 가고 그렇지 않으면 각 (i,j) 에 대하여 지정된 할당규칙에 의해 작업 계획 될 (i,j) 를 선택한다.

단계 3. (설비 및 추가자원의 시작가능시각결정)

$f_{mm}^* = \max\{\sigma_{ij}, f_{mm}^*, h_g\} + pt_{ij}$ 로 하고 $h_g = f_{mm}^*$ 로 둔다. S_t

로 부터 단계 2에서 선택된 (i,j)를 꺼내어 PS_{t+1} 에 넣는다. (i,j+1)을 S_{t+1} 에 넣는다. 만약 $S_{t+1}=\emptyset$ 이면 절차를 종료하고 그렇지 않으면 $t=t+1$ 로 두고 S_t 에 대해 단계 1로 돌아간다.

3.2 할당규칙

<표 1>에서 보듯이 부품의 총작업시간, 공정의 작업시간, 납기까지 작업여유시간, 부품납기, 공정납기 등의 정보를 사용하는 다양한 할당규칙이 개발되어 왔다. 할당규칙은 비교적 간단한 국부적인 정보를 이용하여 할당 가능한 공정에 대한 우선순위 지표를 빠르게 계산하고 비교하여 공정을 할당해 나가는 방법으로 단 한번의 전개(single pass)로 작업계획을 산출한다. 할당규칙은 작업계획을 빠르게 산출할 수 있고 예기치 않은 설비 고장, 공구 파손, 작업자 결근 및 작업지연 등의 동적 상황에 유연하게 대처할 수 있는 능력으로 실제적인 작업계획 접근 방법으로 현장에서 많이 사용되어 왔다.

3.3 새로운 할당규칙

할당규칙이 사용하는 정보는 부품의 작업시간, 공정의 작업시간, 부품의 공정수, 부품납기, 공정납기, 납기 임계비, 납기여유시간 및 수정된 공정납기 등 몇 가지로 정리 될 수 있다. 아직 어떤 정보도 추가자원제약 등의 실제적 접근을 위한 현장의 환경과 다양한 성능 평가척도에서 다른 정보보다 항상 좋은 결과를 산출하지 못한다는 한계를 갖고 있다[2]. 따라서 추가자원제약을 갖는 job shop에서 현장에서 중요하게 다루어지는 성능평가척도인 평균처리시간 C_{mean} 과 평균순수납기 지연 T_{mean} 에 잘 적용되는 할당규칙과 작업계획 방법이 필요하다.

기존 연구와 예비실험을 통하여 평균처리시간 C_{mean} 에서는 부품의 총작업시간 R_{ii} 이 부품의 평균 작업시간 MR_{ii} 및 부품의 작업시간표준편차 DR_{ii} 의 차이보다 적으면 공정 (i,j)의 작업시간 pt_{ij} 와 R_{ii} 의 곱이 적을수록, 그렇지 않으면 pt_{ij} 와 남아있는 작업시간의 합 R_{ij} 의 곱이 적을수록 우선하여 할당하는 방법이 잘 적용되

<표 1> 기존의 할당규칙

할당규칙	사용 정보	우선순위지표	정 의
Random			
SPT LPT	공정의 작업시간	pt_{ij} $-pt_{ij}$	Shortest Processing Time[2] Longest Processing Time[2]
FCFS LCFS	공정의 시작가능시간	σ_{ij} $-\sigma_{ij}$	First Come First Served[2] Last Come First Served[2]
TWR	부품의 총작업시간	R_{ii}	Total Work Remaining[2]
MWKR LWKR	부품의 남아있는 작업시간	$-R_{ij}$ R_{ij}	Most Work Remaining[2] Least Work Remaining[2]
MOPNR LOPNR	부품의 남아 있는 공정 수	$-O_{ij}$ O_{ij}	Most Operations Remaining[2] Least Operations Remaining[2]
MST S/RPT CR	납기여유 납기여유 납기임계비	SL_{ij} SL_{ij}/R_{ij} $(d_i-\sigma_{ij})/R_{ij}$	Minimum Slack Time[5] Minimum Slack Time/Work Remaining[1] Critical Ratio[1]
EDD MDD	부품납기 수정된 부품납기	d_i $\max_i\{d_i,\sigma_{ij}+R_{ij}\}$	Earliest Due Dates[5] Modified job Due Dates[3]
ODD MOD CEXSPT Hybrid CR+SPT S/RPT+SPT	공정납기 수정된 공정 납기 공정의 작업시간, 공정납기 공정납기, 작업부하 납기임계비, 공정납기 납기여유, 공정납기	d_{ij} $\max_i\{d_{ij},\sigma_{ij}+pt_{ij}\}$ $d_i-R_{ij}-\sigma_{ij}$, $d_{ij}-pt_{ij}-\sigma_{ij}$ $\max_i\{d_i,\sigma_{ij}+R_{ij}\}$, $\max_i\{d_{ij},\sigma_{ij}+pt_{ij}\}$ $\max_i\{\sigma_{ij}+(d_i-\sigma_{ij})/R_{ij}, pt_{ij}, \sigma_{ij}+pt_{ij}\}$ $\max_i\{\sigma_{ij}+S_{ij}/R_{ij}, \sigma_{ij}+pt_{ij}\}$	Operation Due Dates[5] Modified Operations Due dates[4] jobs are Conditionally Expedited by the SPT rule[12] MDD(bottleneck), MOD(nonbottleneck)[11] Critical Ratio+Shortest Processing Time[1] Slack per Remaining Processing Time+SPT[1]
COVERT ATC	순수납기지연 예측치	$\frac{[1-(d_i-r_{ij}-t)^+/k \cap [b \cap r_{ij}]/pt_{ij}]^+}{-\exp[-\{d_i-b(w_i-pt_{ij})-pt_{ij}-t\}^+/k \cap p]/pt_{ij}}$	Cost OVER Time[1] Apparent Tardiness Cost[13]

<표 2> 새로운 할당규칙

할당규칙	사용 정보	우선순위지표
CTW(Comparison of Total Work remaining)	부품의 작업시간이 (부품평균작업시간-부품작업시간 표준편차)보다 적으면 공정작업시간과 부품작업시간, 그렇지 않으면 남아있는 작업시간이 적을 수록 우선 작업계획	만약 R_{ij} 이 $MR_{ij}-DR_{ij}$ 보다 적으면 $pt_{ij} \times R_{ij}$ 그렇지 않으면 $pt_{ij} \times R_{ij}$
CMU(Comparison of Machine Utilization)	작업계획된 시점까지 설비가동률을 비교하여 평균보다 적으면 공정납기, 그렇지 않으면 부품납기가 촉박할수록 우선하여 작업계획	만약 fw_k/fc_k 이 $\Sigma_k fw_k / \Sigma_k fc_k$ 보다 적으면 $\max_i \{d_{ij}, \sigma_{ij} + pt_{ij}\}$ 그렇지 않으면 $\max_i \{d_i, \sigma_{ij} + R_{ij}\}$

는 것으로 나타났다. 이는 적은 작업시간을 갖는 부품일수록 부품의 총작업시간이 적은 공정을, 큰 작업시간을 갖는 부품일수록 남아 있는 작업시간의 합이 적은 공정을 우선하여 할당하는 방법이 유리함을 보이고 있다.

평균순수납기 지연 T_{mean} 에서는 작업계획된 시점까지 설비가동률 fw_k/fc_k 가 평균설비가동률 $\Sigma_k fw_k / \Sigma_k fc_k$ 보다 적으면 공정납기 $\max_i \{d_{ij}, \sigma_{ij} + pt_{ij}\}$ 가 촉박할수록 그렇지 않으면 부품납기 $\max_i \{d_i, \sigma_{ij} + R_{ij}\}$ 가 촉박할수록 우선하여 작업계획하는 방법이 잘 적용되는 것으로 나타났다. 이는 설비가동률이 낮은 설비일수록 부품납기를 배분하는 방식으로 구한 공정납기가 적은 공정을 우선하여 할당하는 것이다. 높은 설비가동률을 갖는 설비에서는 부품납기가 적을수록 공정을 할당해 나가는 것이 납기를 줄이는 효과가 있는 것으로 나타났다.

<표 2>는 본 연구가 제시하는 새로운 할당규칙 CTW와 CMU를 보이고 있다. CTW에서는 부품의 작업시간이 (부품평균작업시간-부품작업시간 표준편차)보다 적으면 공정작업시간과 부품작업시간, 그렇지 않으면 남아있는 작업시간이 적을 수록 우선하여 작업계획한다. CMU는 작업계획된 시점까지 설비가동률을 비교하여 평균보다 적으면 공정납기, 그렇지 않으면 부품납기가 촉박할수록 우선하여 작업계획하는 방법이다.

4. 비교분석

추가자원제약을 갖는 문제를 설정하기 위하여 주 설비 외에도 한가지의 추가자원이 있다고 가정하고 실험에 사용된 문제 크기를 50(부품수)×10(공정수)×10(설비수)×5(추가자원수)로 하였다. 공정의 작업시간은 1에서99

를 갖는 일양분포를 따라 발생시키고 공정이 추가자원을 갖는 비율을 5%, 10%, 15%, ... ,60%로 12수준으로 설정하였다. 대안설비를 갖는 공정의 비율은 30%, 대안설비의 수는 구간 1에서 4를 갖는 일양분포로 발생시키고, 설비별 작업부하의 편차는 부품 내 공정들이 같은 설비를 대안설비로 지정 받을 확률을 10%로 조정하고 설비의 평균가동률을 80%에서 90%를 갖도록 하였다. 대안설비를 다루는 방법은 기존 연구[9, 10]을 따랐다. 납기촉박성은 작업계획된 후 30% 정도의 부품이 납기 지연되도록 하였다. 이와 같은 가정으로 임의로 발생시킨 100개의 문제는 기존의 23개의 할당규칙과 본 논문이 제시한 새로운 할당규칙을 사용한 작업계획 방법으로 평가되었다.

<표 3>은 공정이 갖는 추가자원의 비율 5%와 60%에서 임의로 발생시킨 100문제에 대하여 할당규칙이 구한 해의 평균 값, 가장 좋은 해를 구한 회수와 각 할당규칙의 순위를 보여주고 있다. 새로운 할당규칙 CTW는 C_{mean} , CMU는 T_{mean} 에서 기존의 할당규칙들보다 좋은 결과를 보였다. <표 4>는 공정이 갖는 추가자원의 비율을 5%에서 60%까지 12수준으로 설정하여 발생시킨 임의의 각 100문제에 대한 실험결과를 보이고 있다. 새로운 할당규칙 CTW는 C_{mean} , CMU는 T_{mean} 에서 기존의 할당규칙들보다 추가자원의 여러 수준에서 안정적으로 좋은 해를 구할 수 있는 것으로 나타났다. 실험결과 성능평가척도 C_{mean} 에서는 부품의 작업시간과 부품의 평균작업시간 및 부품의 작업시간 표준편차의 비교 값과 공정작업시간, 부품작업시간 및 남아있는 작업시간이 할당규칙의 좋은 정보로 사용되는 것으로 보인다. T_{mean} 에서는 작업계획된 시점까지 설비가동률의 비교 값과 공정납기 및 부품납기의 촉박성이 할당규칙의 효과적인 정보로 나타났다.

<표 3> 추가자원 비율 5%와 60%의 실험결과

추가자원비율 성능평가척도 할당규칙	5%				60%											
	C _{mean}				T _{mean}											
	평균해 ¹⁾	회수 ²⁾	순위 ³⁾	개선율 ⁴⁾	평균해	회수	순위	개선율								
RANDOM	2252	0	18	-0.055	282	0	20	-0.153	2336	0	15	-0.023	373	0	20	-0.085
SPT	1918	0	6	0.101	182	5	6	0.256	2141	0	5	0.063	293	4	6	0.148
LPT	2351	0	21	-0.102	403	0	25	-0.647	2441	0	21	-0.069	466	0	24	-0.355
FCFS	2415	0	22	-0.132	354	0	22	-0.447	2441	0	21	-0.069	402	0	21	-0.169
LCFS	2003	0	10	0.062	248	1	17	-0.014	2216	0	10	0.030	354	0	14	-0.030
TWR	1806	12	3	0.154	215	0	11	0.121	2062	9	3	0.097	310	1	12	0.098
MWKR	2461	0	25	-0.153	392	0	24	-0.602	2524	0	25	-0.105	469	0	25	-0.364
LWKR	1794	20	2	0.159	218	0	12	0.109	2039	38	2	0.107	304	2	8	0.116
MOPNR	2446	0	24	-0.146	371	0	23	-0.516	2508	0	24	-0.098	448	0	23	-0.303
LOPNR	1899	0	4	0.110	240	0	15	0.019	2115	0	4	0.074	327	0	13	0.049
MST	2195	0	12	-0.028	230	0	14	0.060	2354	0	18	-0.031	354	0	14	-0.030
S/RPT	2293	0	19	-0.074	224	0	13	0.085	2414	0	19	-0.057	354	0	14	-0.030
CR	2312	0	20	-0.083	243	0	16	0.007	2422	0	20	-0.061	364	0	17	-0.059
EDD	1933	0	7	0.094	188	1	8	0.232	2169	0	9	0.050	295	2	7	0.142
MDD	1917	0	5	0.102	172	19	2	0.297	2144	0	6	0.061	273	25	2	0.206
ODD	2422	0	23	-0.135	339	0	21	-0.385	2497	0	23	-0.093	428	0	22	-0.245
MOD	2244	0	16	-0.051	181	5	5	0.260	2352	0	17	-0.030	304	1	8	0.116
CEXSPT	2125	0	11	0.004	190	1	10	0.223	2265	0	11	0.008	304	1	8	0.116
HYBRID	2222	0	14	-0.041	174	15	3	0.289	2320	0	13	-0.016	290	6	4	0.157
CR+SPT	2237	0	15	-0.048	178	12	4	0.273	2342	0	16	-0.025	307	1	11	0.107
S/RPT+SPT	1944	0	9	0.089	182	4	6	0.256	2155	0	7	0.056	291	7	5	0.154
COVERT	2218	0	13	-0.039	280	0	18	-0.144	2318	0	12	-0.015	368	0	18	-0.070
ATC	2251	0	17	-0.055	281	0	19	-0.148	2334	0	14	-0.022	372	1	19	-0.082
CTW	1767	71	1	0.172	189	6	9	0.228	2027	54	1	0.112	280	13	3	0.186
CMU	1933	0	7	0.094	161	33	1	0.342	2159	0	8	0.055	266	38	1	0.226

100문제에서 각 방법이 구한 1) 평균해, 2) 가장 좋은해를 구한 회수, 3) 할당규칙 순위, 4) 해의 개선율=(할당규칙의 평균해 - 새로운 할당규칙 해)/할당규칙의 평균해

<표 4> 새로운 할당규칙의 실험결과

추가자원비율(%)	C _{mean} : CTW		T _{mean} : CMU	
	평균해	회수	평균해	회수
5	1767	71	161	33
10	1768	74	163	31
15	1768	80	165	33
20	1779	75	162	43
25	1792	71	169	38
30	1808	75	173	43
35	1837	69	179	42
40	1859	75	189	47
45	1902	56	201	42
50	1945	51	220	40
55	1985	52	238	47
60	2027	54	266	38

5. 결 론

추가자원을 갖는 job shop 작업계획 방법과 새로운 할당규칙이 제시되었다. 제시된 작업계획 방법과 새로운 할당규칙은 평균처리시간 C_{mean}, 평균순수납기 지연 T_{mean}에 대하여 기존의 23개 할당규칙과 비교 분석되었다. 실험결과 본 연구가 주목하는 할당규칙의 정보인 부품의 총작업시간 및 설비가동률 비교 방법과 부품의 남아 있는 작업시간, 부품납기 및 공정납기 등은 안정적으로 좋은 작업계획을 산출하는 데 효과가 있는 것으로 나타났다. 개발된 방법은 현장에서 추가자원제약이 있는 작업계획 방법으로 적용될 수 있으며, 작업자, 공구나 지그 및 고정구를 추가하는 상황에서 비용과 재고수준 및 납기 준수 향상에 따른 이익을 비교하는 투자모델에 활용될 수 있다. 본 연구가 제시하는 방법은 향후 여러 추가자원을 동시에 고려하거나 대안 추가자원이 있는 job shop 작업계획으로 확장될 수 있다.

참고문헌

- Management Science, Vol. 33, No. 8, pp. 1035-1047 1987.
- [1] Anderson, E. J. and Nyirenda, J. C., "Two New Rules to Minimize Tardiness in a Job Shop", *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 12, pp. 2277-2292, 1990.
 - [2] Baker, K. R., *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley & Sons Inc., New York, Ch.2-8, 1974.
 - [3] Baker, K. R. and Bertrand, J. W., "A Dynamic Priority Rule for Scheduling against Due Dates". *Journal of Operations Management*, Vol. 3, pp. 37-42, 1982.
 - [4] Baker, K. R. and Kanet, J. J., "Job Shop Scheduling with Modified Due Dates", *Journal of Operations Management*, Vol. 4, pp. 11-21, 1983.
 - [5] Conway, R. W., "Priority Dispatching and Job Lateness in a Job Shop", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 228-237, 1965.
 - [6] Fredendall, L. D., Melnyk, S. A., and Ragatz, G., "Information and Scheduling in A Dual Resource Constrained Job Shop", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 10, pp. 2783-2802, 1996.
 - [7] Gargeya, V. B. and Deane, R. H., "Scheduling Research in Multiple Resource Constrained Job Shops : A Review and Critique", *Journal of Operations Management*, Vol. 34, No. 8, pp. 2077-2097, 1996.
 - [8] Gunther, R. E., "Server Transfer Delays in A Dual Resource Constrained Parallel Queueing System", *Management Science*, Vol. 25, No. 12, pp. 1245-1257, 1979.
 - [9] Kim, Y. D., "A Backward Approach in List Scheduling Algorithms for Multi-Machine Tardiness Problems", *Computers and Operations Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 307-319, 1995.
 - [10] Kim, Y. D., "A Comparison of Dispatching Rules for Job Shops with Multiple Identical Jobs and Alternative Routeings", *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 953-962, 1990.
 - [11] Raman, N, Talbot, F. B., and Rachamadugu, R. V., "Due Date Based Scheduling in a General Flexible Manufacturing System", *Journal of Operations Management*, Vol. 8, No. 2, pp. 115-132, 1989.
 - [12] Schultz, C. R., "An Expediting Heuristic for the Shortest Processing Time Dispatching Rule", *International Journal of Production Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 31-41, 1989.
 - [13] Vepsalainen, A. P. J., and Morton, T. E., "Priority Rules for Job Shops with Weighted Tardiness Costs",