

☒ 응용논문

설비 작업부하가 불균형한 Job Shop에서 할당규칙의 순위*
 - Ranking Dispatching Rules in the Job Shop
 with Unbalanced Machine Workloads -

배 상 윤*
 Bae, Sang Yun

Abstract

This paper evaluates forty different dispatching rules with respect to twenty different performance measures of job shop scheduling under seven levels of workload imbalance. Computer simulation is used as a tool to determine rankings of the dispatching rules for a given workload imbalance. The experiments results show rankings of dispatching rules are different in the job shop with unbalanced machine workloads. As variations of workload imbalance increase from 7% to 78%, the performance of dispatching rules is gradually deteriorated in measure related to completion time and due date. These results guide scheduling practitioners not only to choosing dispatching rules but also to developing the model of facility investment for workload balance, when there are different levels of workload imbalance.

1. 서론

본 연구에서는 서로 다른 설비가 다양한 부품(job)의 공정(operation)을 가공하는 job shop에서 설비별 작업 부하의 불균형에 따른 작업계획(scheduling)을 다룬다. 현장에서는 편중된 주문, 잘못된 공정계획, 선호 설비의 존재와 불충분한 공구 및 고정구 등의 다양한 이유로 설비별 작업부하의 불균형이 존재하게 된다[9, 19]. 설비별 작업부하의 균형화는 생산성을 향상시키지만 이의 불균형은 설비가동률, 재공제고, 납기 등의 작업계획 평가척도에 좋지 않은 영향을 주게 된다[11, 19, 21, 22]. 이와 같이 생산 활동이 전개되는 상황에서 작업부하의 불균형이 작업계획에 영향을 미침에도 불구하고 이에 대한 연구는 흔하지 않은 실정이다. 따라서 작업부하 불균형을 고려한 작업계획에 대한 연구가 필요하다.

Job shop의 작업계획은 선·후행 공정간의 순서제약(precedence constraint)과 설비가 어떤 작업시점에서 한개의 공정만을 작업해야 하는 설비제약(capacity constraint)을 만족시키며 설비에 대한 작업물의 시작/loading) 및 완료(unloading) 시각을 계획하는 것이다.[2, 3]. Job shop의 생산 활동에 대한 계획에서는 경영목표, 수주현황, 수요예측과 작업장의 능력 등을 고려하여 주일정계획을 세우고 이를 토대로 각 부품의 공정에 대한 설비별 정확한 작업 시작시각과 완료시각을 산출하게 된다[5, 8, 9]. 주일정계획은 부품별 개시일과 납기일 등을, 작업계획은 각 부품의 공정에 대한 작업 시작과 완료 시각의 산출을 주요내용으로 한다고 볼 수 있다[8, 9].

+ 이 논문은 1998년 전주공업대학 학술연구조성비 지원과제에 의하여 이루어졌음.

* 전주공업대학 산업경영과

작업계획은 효율적인 생산시스템 구축에 있어서 재고부담과 생산비용을 줄이고 고객이 원하는 시기에 납품이 가능하도록 생산 리드타임을 줄이는 등의 이유로 그 중요성이 더욱 증대되고 있다[16]. Job shop 환경의 생산체제에서는 비교적 짧은 수명주기를 갖는 많은 종류의 품종을 생산하여야 하므로 주일정계획만으로 생산활동의 지시 및 통제는 불가능할 수 있다[10, 12]. 예측하지 못한 설비고장과 자재공급의 착오, 불확실한 가공시간, 납기변경과 긴급품 등의 발생은 작업진도가 반영된 새로운 주일정계획의 산출을 요구하게 된다. 일반적으로 주일정계획은 실시간으로 산출되기 힘들고 설령 빠른 산출이 가능하더라도 효율적인 작업계획 시스템이 없으면 정확한 산출은 어렵다고 볼 수 있다. 이와 같이 job shop의 작업계획 시스템은 정확한 주일정계획 산출을 가능하게 하며 현장의 다양한 돌발상황에 대처하는 생산활동 통제로 생산제반비용을 줄이고 생산시스템을 최적화할 수 있게 한다.

Job shop 작업계획에 대한 기존 연구는 이론적 측면에서 우수한 알고리즘을 제시하였지만 현실적 측면에서 현장의 다양한 상황을 고려하지 못하였음이 지적되고 있다[4, 10, 17, 18]. 그동안 할당규칙(dispatching rule), 발견적기법, 최적화 기법, 시뮬레이션, 유전 알고리즘, tabu search, simulated annealing, 뉴럴 네트워크와 전문가 시스템 등의 여러 분야에서 많은 연구가 이루어져 왔다[4]. 이들 연구 대부분은 현실 적용 측면에서 작업계획을 산출하는데 많은 시간을 소요하여 예기치 않은 현장의 동적상황에 대처하는 능력이 부족하다는 한계를 갖는다. 또한 기존에 개발된 알고리즘은 연구가 가정한 job shop의 이론적 상황에서는 좋은해를 구하지만 실제적인 현장의 여러 요소로 가정이 완화되면 좋은해를 보장한다고 보기는 어렵다[14].

현장 적용이 가능한 작업계획이 되기 위해서는 생산활동의 동적상황에 실시간으로 대처할 수 있는 빠른 작업계획 산출이 가능해야 하고 실제 현장의 상황을 고려하여 기존의 job shop 작업계획 문제의 가정을 완화하여야 한다. Fry et al.[9]은 현실적인 작업계획의 산출을 위해서는 설비별로 작업부하가 균형을 이룬다는 가정을 완화하여야 한다고 지적하였다. Raman et al.[19]은 실제 현장에서 설비별로 작업부하의 불균형이 있음을 지적하고 이를 고려하는 Hybrid 할당규칙을 제시하였다. 설비별 작업부하의 불균형이 작업계획의 성능에 중요한 영향을 미치는 여러 연구에서 지적되고 있다[11, 21, 22]. 이와 같이 설비별 작업부하의 불균형이 작업계획의 중요 변수로 지적되어 왔음에도 불구하고 아직 이를 고려하여 빠른 시간에 작업계획을 산출할 수 있는 방법에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구의 목적은 설비별 작업부하의 불균형이 존재하는 job shop에서 빠른 산출시간을 갖는 작업계획 방법에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 실험 결과를 현장의 생산계획이나 작업계획 담당자에게 제시하고자 하는데 있다. 이를 위하여 먼저 기존에 연구된 할당규칙과 성능평가척도를 폭 넓게 조사하여 분류 및 정리하고 이들을 작업부하 불균형의 다양한 수준에서 평가하기로 한다.

2. 문제설정 및 평가척도

본 연구가 다루는 job shop 작업계획 문제의 가정은 다음과 같다.

- (1) 각 부품은 서로 독립적인 다른 공정순서를 갖고 한 부품내의 공정은 선·후행 관계가 있다.
- (2) 각 부품의 시작가능시각과 납기, 공정의 가공시간은 미리 확정적으로 결정되어 있다.
- (3) 각 설비는 어떤 작업 시점에 하나의 공정만을 작업할 수 있고 작업이 완료되기 이전에 중단하지 않는다.

본 연구에서 사용된 기호를 정리하면 다음과 같다.

(i, j) : 부품 i의 j번째 공정

- s_i : 부품 i 의 시작가능시각
- d_i : 부품 i 의 납기
- pt_{ij} : 공정 (i, j) 의 작업시간
- f_k : 설비 k 의 사용가능시각
- fw_k : 설비 k 에서 작업되는 공정의 작업시간의 합
- m_j : 부품의 최대수
- mo : 부품당 공정의 최대수
- mk : 설비의 최대수
- D_p : 시각 p 에 작업 완료되지 않은 부품 수
- σ_{ij} : 부품 i 의 공정 j 인 (i, j) 를 가장 빨리 시작할 수 있는 시각
- c_i : 부품 i 의 작업계획된 가공완료시각
- fc_k : 작업계획된 후 설비 k 의 사용완료시각
- O_{ij} : 공정 (i, j) 를 포함한 부품 i 의 나머지 공정수
- R_{ij} : 공정 (i, j) 를 포함한 부품 i 의 나머지 공정의 가공시간의 합
- SL_{ij} : 공정 (i, j) 를 일정계획하는 시점에서 납기까지의 작업여유시간
- d_{ij} : 공정 (i, j) 의 공정납기 $[1, 19]$, $d_{ij} = d_{i,j-1} + pt_{ij} / R_{ij} \times d_i$, 여기서 $d_{i0} = 0$ 이고 R_{i1} 은 부품 i 의 총가공시간
- t : 알고리즘의 반복수
- S_t : t 반복에서 일정계획 가능한 공정들의 집합
- PS_t : t 반복까지 일정계획된 공정들의 집합
- $[x]^+$: $\max(x, 0)$

기존 연구에서 작업계획의 성능을 평가하는 척도는 처리시간(flow time), 평균재공재고, 납기, 설비 가동률 등과 관련하여 다양하게 제시되어 있지만 아직 이들을 종합적으로 다루어 작업계획 모델을 제시한 연구는 미비하다[2, 3, 7]. 이들 성능평가척도들은 기존 연구에서 부분적으로 다루어져 job shop의 일반적 상황에서 적용 가능한 정보가 제시되어 있지 못하다. 따라서 본 연구는 이들 성능평가척도에 대하여 보다 심도 있는 분석을 하고자 한다.

처리시간과 관련된 척도는 최대처리시간 C_{max} , 평균처리시간 C_{mean} , 평균처리시간절대편차 C_{mad} , 최대대기시간 W_{max} , 평균대기시간 W_{mean} 과 평균대기시간절대편차 W_{mad} 등이고 재공재고를 다루는 척도는 평균재공재고 I_{wip} 가 있다. 납기와 관련된 척도는 최대 순수납기 지연(tardiness) T_{max} , 평균순수납기 지연 T_{mean} , 평균순수납기 지연절대편차 T_{mad} , 조건부 평균순수납기 지연 CT_{mean} , 조건부 평균순수납기 지연절대편차 CT_{mad} , 최대 납기 지연(lateness) L_{max} , 평균납기 지연 L_{mean} , 평균납기 지연절대편차 L_{mad} , 순수납기 지연부품률 TJ_{per} , 평균순수납기 지연의 제공근 T_{rms} 과 조건부 평균순수납기 지연의 제공근 CT_{rms} 등이다. 설비 가동률을 다루는 척도는 평균설비 가동률 U_{mean} 과 설비별 가동률의 평균절대편차 U_{mad} 등이 있다. 이상의 평가척도를 정리하면 <표 1>과 같다.

<표 1> 평가척도 정의

기호	수식	기호	수식
C_{max}	$\max\{c_i\}$	T_{rms}	$(\sum_i \{(c_i - d_i)^2 / m_j\})^{1/2}$
C_{mean}	$\sum_i c_i / m_j$	CT_{mean}	$\sum_i \{ [c_i - d_i]^+ / (i c_i > d_i) $
C_{mad}	$\sum_i C_{mean} - c_i / m_j$	CT_{mad}	$\sum_i CT_{mean} - [c_i - d_i]^+ / (i c_i > d_i) $
W_{max}	$\max\{c_i - \sum_j p_{ij}\}$	CT_{rms}	$(\sum_i \{(c_i - d_i)^2 / (i c_i > d_i))^{1/2}$
W_{mean}	$\sum_i (c_i - \sum_j p_{ij}) / m_j$	L_{max}	$\max\{ c_i - d_i \}$
W_{mad}	$\sum_i W_{mean} - (c_i - \sum_j p_{ij}) / m_j$	L_{mean}	$\sum_i c_i - d_i / m_j$
I_{wip}	$\int_0^{C_{max}} n_p dp / C_{max}$	L_{mad}	$\sum_i L_{mean} - c_i - d_i / m_j$
T_{max}	$\max\{(c_i - d_i)^+\}$	TJ_{per}	$ (i c_i > d_i) / m_j$
T_{mean}	$\sum_i [c_i - d_i]^+ / m_j$	U_{mean}	$\sum_k fw_k / \sum_k fc_k$
T_{mad}	$\sum_i T_{mean} - [c_i - d_i]^+ / m_j$	U_{mad}	$\sum_k U_{mean} - fw_k / fc_k / m_k$

3. 할당규칙과 작업계획 방법

그동안 짧은 계산 시간에 작업계획을 산출할 수 있는 많은 할당규칙들이 연구되어 왔지만

아직 이들을 종합 정리하고 job shop의 일반적 상황에서 성능을 평가한 연구는 찾아 보기 힘들다[1, 5, 7]. 기존에 연구된 할당규칙들은 작업계획의 성능평가척도인 처리시간 감소[3], 재공재고 감소[7], 납기준수[1, 20]와 설비가동률 향상[5] 등을 위하여 개발되어 왔다. 이들 할당규칙들은 job shop의 이론적 상황에서 독립적으로 연구된 것들이 대부분이고 작업계획에서 사용되어지는 방법도 다양하다[1, 3, 15]. 따라서 본 연구는 설비별 작업부하의 불균형이 존재하는 job shop의 상황에서 할당규칙을 적용시키는 방법을 제시하고자 한다. 기존에 개발된 할당규칙을 정리하면 <표 2>와 같다. 제시된 모든 할당규칙은 우선순위지표 값이 낮은 공정일수록 먼저 할당한다. COVERT와 ATC 할당규칙에서 b 와 k 는 매개변수이다[15].

<표 2> 할당규칙의 우선순위지표

번호	할당규칙	우선순위지표	번호	할당규칙	우선순위지표
1	FCFS[3]	σ_{ij}	21	WKR/PT[11]	R_{ij}/pt_{ij}
2	LCFS[3]	$-\sigma_{ij}$	22	MST[1]	$(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})$
3	SPT[3]	pt_{ij}	23	S/OPNR[7]	$(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})/O_{ij}$
4	SPT · TWK[7]	$pt_{ij} \times R_{ij}$	24	S/TWK[7]	$(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})/R_{ij}$
5	SPT/TWK[7]	pt_{ij}/R_{ij}	25	SAWKR[1]	$(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})/R_{ij}$
6	SPT · WKR[7]	$pt_{ij} \times R_{ij}$	26	MSS[1]	$(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})$
7	SPT/WKR[7]	pt_{ij}/R_{ij}	27	SS/OPNR[7]	$(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})/O_{ij}$
8	SPT+LOPNR[7]	$pt_{ij} + O_{ij}$	28	SS/TWK[7]	$(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})/R_{ij}$
9	LPT[3]	$-pt_{ij}$	29	SSAWKR[1]	$(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})/R_{ij}$
10	LPT · TWK[7]	$-pt_{ij} \times R_{ij}$	30	EDD[1]	d_i
11	LPT/TWK[7]	$-pt_{ij}/R_{ij}$	31	ODD[1]	d_{ij}
12	LPT · WKR[7]	$-pt_{ij} \times R_{ij}$	32	MDD[1]	$\max(d_i, \sigma_{ij} + R_{ij})$
13	LPT/WKR[7]	$-pt_{ij}/R_{ij}$	33	CR[1]	$(d_i - \sigma_{ij})/R_{ij}$
14	LPT+MOPNR[7]	$-pt_{ij} - O_{ij}$	34	MOD[1]	$\max(d_i, \sigma_{ij} + pt_{ij})$
15	TWK[3]	R_{ij}	35	CEXSPT[1]	$d_i - R_{ij} - \sigma_{ij}, d_i - pt_{ij} - \sigma_{ij}$
16	MWKR[3]	$-R_{ij}$	36	Hybrid[1, 19]	$\max(d_i, \sigma_{ij} + R_{ij}), \max(d_{ij}, \sigma_{ij} + pt_{ij})$
17	LWKR[3]	R_{ij}	37	CR+SPT[1]	$\max(\sigma_{ij} + (d_i - \sigma_{ij})/R_{ij}, pt_{ij}, \sigma_{ij} + pt_{ij})$
18	MOPNR[3]	$-O_{ij}$	38	S/RPT+SPT[1]	$\max(\sigma_{ij} + (d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})/R_{ij}, \sigma_{ij} + pt_{ij})$
19	LOPNR[3]	O_{ij}	39	COVERT[20]	$\{[(1 - (d_i - r_{ij} - t)) / k; b \cdot r_{ij}] / pt_{ij}\}^k$
20	TWK/PT[5]	R_{ij}/pt_{ij}	40	ATC[15]	$-\exp[-(d_i - b(w_i - pt_{ij}) - pt_{ij} - t)^k / k \cdot p] / pt_{ij}$

할당규칙을 사용하여 작업계획을 산출하기 위해서는 선행공정이 할당된, 즉, 순서제약을 지킨 공정 중에서 최소의 우선순위지표를 갖는 공정의 순서로 할당시켜 나간다[15]. 이 방법은 순서제약과 기계제약을 지키는 가능한 작업계획을 산출할 수 있으나 좋은해를 구하기는 어려울 수 있다. 더 좋은 방법은 active나 nondelay 작업계획을 전개해 나가는 과정에서 할당규칙을 사용하는 방법이다[3, 13]. Active 작업계획은 어떤 공정도 다른 공정의 작업 지연 없이 더 빨리 시작될 수 없게 하는 것이고 nondelay 작업계획은 설비에서 공정의 작업이 가능할 때 그 설비가 쉬지 않도록 작업을 할당하는 것이다. 일반적으로 nondelay가 active 작업계획 방법보다 좀더 효율적으로 알려져 있다. Nondelay 작업계획 방법에서는 할당가능한 공정 중에서 가장 빨리 시작될 수 있는 공정들에 대해 할당규칙의 가장 낮은 우선순위지표를 갖는 공정의 순서로 작업계획을 전개시킨다. 본 연구의 작업계획 방법은 nondelay 작업계획 방법에서 할당규칙을 사용한 것으로 절차는 다음과 같다.

단계 0. (초기화)

작업계획하는 시점에서 현장에서 보고된 작업 진도에 의해서 설비 k 의 사용가능시각 f_k 와 부품 i 의 시작가능시각 s_i 를 지정하고 S_t 를 선행 공정이 완료된 공정으로 초기화 한다. 부품 i 의 납기 d_i 는 MRP 등의 상위 시스템에서 지시된 시각으로 한다. $t=1, PS_t = \emptyset, pt_{i0}=0, \sigma_{i0}=s_i, \sigma_{i0}=s_i$ 로 둔다. 단계 2에서 사용될 할당규칙을 지정한다.

단계 1. (σ_{ij} 와 k^* 결정)

$\sigma_{ij} = \max_i(\sigma_{ij-1} + pt_{ij-1}, f_k)$ 로 둔다. $\sigma^* = \min_{(i,j) \in S_t}(\sigma_{ij})$ 를 계산하고 σ^* 를 갖는 (i,j) 에 해당하는 설비 k 로 k^* 를 결정한다.

단계 2. (작업계획될 공정 선택)

설비 k^* 와 같은 설비를 요구하고 $\sigma_{ij} = \sigma^*$ 인 공정 (i,j) 가 유일하면 작업계획될 (i,j) 를 선택하고 단계 3로 가고 그렇지 않으면 각 (i,j) 에 대하여 지정된 할당규칙에 의해 작업계획될 (i,j) 를 선택한다.

단계 3. (f_{mm}^* 결정 및 종료조건 검사)

$f_k^* = \max(\sigma_{ij}, f_k^*) + pt_{ij}$ 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.

4. 실험 및 분석

실험은 설비별 작업부하 불균형의 여러 수준에서 할당규칙의 순위를 평가하기 위하여 수행되었다. 임의로 발생된 30개의 문제를 7개 수준의 작업부하 불균형에서 20개 평가척도에 대한 40개 할당규칙들의 성능을 분석하였다. 제안된 작업계획 방법과 할당규칙들은 Pascal로 프로그래밍되었다.

실험에 사용된 30개 문제는 $50(\text{부품수}) \times 10(\text{공정수}) \times 10(\text{설비수})$ 의 크기로 하고 공정의 작업시간은 설정된 작업부하 불균형 수준을 주기위한 예비실험을 통하여 구간 1에서 30을 갖는 일양분포로써 발생시켰다. 각 부품의 납기는 구간 $P(1-Z+\frac{1}{2}R)$ 에서 $P(1-Z+\frac{1}{2}R)$ 을 갖는 일양분포에서 발생시켰다. 예비실험을 통해 보통납기축박성(moderate due date tightness)에 대한 적절한 매개변수 값은 P 는 총처리시간, R 은 0.2로 두고, Z 는 0.3으로 두었다. 할당규칙 COVERT와 ATC에서 매개변수 값은 기존연구[15]를 따랐다.

작업부하 불균형의 7수준은 발생된 30개 문제의 설비별 작업부하 산포에 대한 변동계수(coefficient of variation)을 조정하여 설정하였다. 변동계수는 표준편차를 산술평균으로 나눈 백분율 값으로 작업시간의 크기가 다른 문제에 대해서도 일관성 있는 산포 척도 값을 나타낼 수 있다. 작업부하 불균형 수준 1은 모든 부품의 10개 공정이 10개 설비를 겹치지 않게 할당받게 하여 설정되었고 부품내 공정들이 같은 설비를 할당받을 수 있는 확률을 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%로 증가시켜 수준 2에서 7을 설정하였다. 이러한 설비별 작업부하의 수준 설정 방법은 가동률과 혼잡도에 의한 병목(bottleneck)과 비병목 설비만으로 작업부하 불균형을 나타낸 기존 연구[9, 19, 21]보다 좀더 다양한 수준을 설정할 수 있다. 발생된 30문제 평균 설비별 작업부하는 780.0이고 평균 설비별 작업부하 편차는 55.8, 120.0, 220.9, 324.3, 442.2, 518.4와 606.6으로 조정되어 작업부하 불균형 7수준의 변동계수는 7%, 15%, 28%, 42%, 54%, 66%과 78%을 나타내었다. 작업부하 불균형의 변동계수가 작을수록 설비별 작업부하는 균형을 이루게 된다.

실험결과는 30문제에 대하여 7개 수준의 작업부하 불균형과 20개 성능평가척도에서 40개 할당규칙이 가장 잘 적용된 회수와 해의 평균을 실험 결과치로 사용하였다. 실험결과, 계산시간은 Pentium 133 Mhz 컴퓨터에서 하나의 작업계획을 산출하는 데 0.2초 이하가 소요되므로 분석에서 제외하였다.

<표 3>은 30문제에 대한 7수준의 설비별 작업부하 불균형에서 해당 성능평가척도에 대하여 가장 잘 적용된 할당규칙과 평균해를 나타내었다. 작업의 처리시간과 관련된 척도인 최대처리시간 C_{max} , 평균처리시간 C_{mean} , 평균처리시간절대편차 C_{mad} , 최대대기시간 W_{max} , 평균대기시간 W_{mean} 과 평균대기시간절대편차 W_{mad} 에서는 작업편차 불균형이 높아짐에 따라 평가척도가 상당 수준 악화됨을 알 수 있다. 이들 평가척도에서는 공정의 작업시간과 작업의 남아있는 공정의 작업 시간 합을 정보로 이용하는 할당규칙이 좋은 결과를 보였다. C_{max} 에서는 SPT/WRK

와 WRK/PT가, C_{mean} 와 W_{mean} 에서는 SPT · WRK가, C_{mad} 와 W_{mad} 에서는 MOPNR이, W_{max} 에서는 설비별 작업부하 불균형 수준이 낮으면 SPT/WRK이, 높으면 S/TWK이 가장 잘 적용되었다. 재공재고를 다루는 척도는 평균재공재고 I_{wip} 는 작업부하가 불균형 할수록 최대처리시간이 길어지는 이유로 설비별 작업부하 불균형 수준에 영향을 받지 않는 것으로 나타났고 SPT · WRK이 좋은해를 구하였다. 이러한 결과는 SPT와 MWKR이 C_{max} 와 C_{mean} 에서 잘 적용된 기존 연구[3]와 다르다.

<표 3> 가장 잘 적용된 할당규칙의 회수와 해

작업부하 불균형 수준	1(7%)	2(15%)	3(28%)	4(42%)	5(54%)	6(66%)	7(78%)		
평	C_{max}	7,21(26) 874	7,21(30) 1096	7,21(30) 1420	7,18,21(30) 1735	7,18,21(30) 2032	7,18,21,31(30) 2323	7,18,21(30) 2589	
	C_{mean}	6 ¹⁾ (23) ²⁾ 555	6(26) 597	6(25) 693	6(26) 809	6(23) 933	6(19) 1065	6(16) 1192	
	C_{mad}	18(18) 45	18(19) 104	34(10) 221	33(7) 288	33(9) 319	18(8) 354	18(12) 366	
	W_{max}	7(12) 734	7(8) 948	24(8) 1275	24(7) 1588	24(13) 1874	24(5) 2173	24(8) 2432	
	W_{mean}	6(23) 399	6(26) 441	6(25) 537	6(26) 653	6(23) 776	6(19) 910	6(15) 1036	
	W_{mad}	18(17) 50	18(16) 105	34(12) 217	34(8) 293	33(10) 322	18(10) 353	18(13) 365	
	I_{wip}	17(15) 26.31	6(20) 24.19	6(16) 22.63	6(18) 22.04	6(20) 21.92	6(17) 22.1	17(16) 22.37	
	가	T_{max}	31(19) 206	22(20) 405	22(22) 586	22(22) 646	22(27) 700	22(22) 771	22(25) 808
		T_{mean}	36(17) 54	36(9) 97	36(9) 137	36(19) 128	36(13) 141	36(14) 143	32(14) 143
		T_{mad}	31(17) 34	4(7) 68	8(7) 94	36(16) 95	36(9) 105	36(15) 108	32(13) 109
척	T_{rms}	37(22) 91	37(19) 169	36(11) 255	36(16) 257	36(8) 283	36(15) 294	32(15) 300	
	CT_{mean}	37(25) 76	37(23) 136	37(14) 270	33(10) 290	25(10) 302	25(13) 326	33(15) 333	
	CT_{mad}	31(25) 35	24(10) 101	24(7) 150	22(9) 169	24(7) 179	31(7) 201	31(8) 210	
도	CT_{rms}	37(24) 102	37(20) 196	25(12) 334	33(14) 363	33(12) 384	33(13) 410	33(17) 427	
	L_{max}	31(22) 206	22(20) 406	22(22) 586	22(15) 678	22(11) 815	23(6) 913	23(6) 1005	
	L_{mean}	37(21) 66	37(17) 111	37(16) 202	33(7) 280	33(8) 306	29(7) 327	33(7) 335	
	L_{mad}	31(26) 37	31(10) 102	38(5) 144	22, 31(5) 174	22(9) 194	27(8) 214	31(8) 233	
	T_{job}	6(15) 35.87	6(20) 39.2	6(14) 36	6(12) 34.13	6(17) 32.2	6(13) 32.33	6(13) 31.2	
	U_{mean}	21(23) 95.98	7, 21(18) 84.51	7(19) 65.41	7(16) 53.04	7, 21(16) 44.79	18(16) 38.96	7(21) 35.06	
U_{mad}	21(12) 3.86	10(3) 7.09	2(5) 8.86	13(5) 10.71	17(6) 11.9	15(5) 12.95	17(6) 13.63		

1) 가장 잘 적용된 할당규칙 번호, 2) 가장 잘 적용된 할당규칙이 30문제에서 가장 좋은해를 구한 회수, 3) 30문제의 평균해
 1.FCFS, 2.LCFS, 3.SPT, 4.SPT · TWK, 5.SPT/TWK, 6.SPT · WKR, 7.SPT/WKR, 8.SPT+LOPNR, 9.LPT, 10.LPT · TWK, 11.LPT/TWK, 12.LPT · WKR, 13.LPT/WKR, 14.LPT+MOPNR, 15.TWK, 16.MWKR, 17.LWKR, 18.MOPNR, 19.LOPNR, 20.TWK/PT, 21.WKR/PT, 22.MST, 23.S/OPNR, 24.S/TWK, 25.S/WKR, 26.MSST, 27.SS/OPNR, 28.SS/TWK, 29.SS/WKR, 30.EDD, 31.ODD, 32.MDD, 33.CR, 34.MOD, 35.CEXSPT, 36.Hybrid, 37.CR+SPT, 38.S/RPT+SPT, 39.COVERT, 40.ATC

납기와 관련된 척도인 최대 순수납기지연 T_{max} , 평균순수납기지연 T_{mean} , 평균순수납기지연절대편차 T_{mad} , 조건부 평균순수납기지연 CT_{mean} , 조건부 평균순수납기지연절대편차 CT_{mad} , 최대 납기지연 L_{max} , 평균납기지연 L_{mean} , 평균납기지연절대편차 L_{mad} , 평균순수납기지연의 제곱근 T_{rms} 과 조건부 평균순수납기지연의 제곱근 CT_{rms} 에서는 작업편차가 불균형할 수록 전반적인 납기지연이 높아짐을 알 수 있다. 이들 평가척도에서는 MST, S/OPNR, S/TWK, S/WKR,

SS/OPNR, SS/WKR, ODD, MDD, CR, Hybrid와 CR+SPT 등이 좋은해를 구하였다. 순수납기 지연부품을 TJ_{per} 에서는 납기만족에서 그다지 주목되지 않은 SPT·WRK이 가장 좋은 결과를 보였다. 실험결과를 바탕으로 MOD, COVERT, CEXSPT와 ATC 등이 기존연구[1, 20]에서 보인 좋은 성능은 작업부하 불균형이 존재하는 상황에서 달라짐을 알수 있다.

설비 가동률을 다루는 척도인 평균설비 가동률 U_{mean} 과 설비별 가동률의 평균절대편차 U_{mad} 는 작업부하 불균형 수준이 높아질수록 해가 매우 나빠진 것으로 나타났다. U_{mean} 과 U_{mad} 에서 잘 적용된 할당규칙은 SPT/WKR, WKR/PT와 LWKR 등으로 이는 기존연구[5]와 유사하다.

<표 4>는 20개 성능평가에 대한 가중치를 동일하다고 가정하고 7수준의 설비별 작업부하 불균형에 따른 30문제에 대한 할당규칙의 평균 순위를 선형 조합하여 결과를 나타내었다. 20개 평가척도에 대한 각 할당규칙의 평균 순위의 선형조합결과 작업부하가 상대적으로 균등할 수록 CR+SPT와 MOD가 가장 순위가 높았고 불균형한 작업부하에서는 MDD의 순위가 높게 나타났다.

<그림 1>은 처리시간과 관련된 평가척도에서 설비별 작업부하 변동계수 수준에 따른 가장 잘 적용된 할당규칙의 성능 변화를 보이고 있다. 작업편차가 불균형할수록 작업의 처리시간과 대기시간이 길어지는 것으로 나타났는데, C_{max} 과 W_{max} 에서 이러한 경향은 특히 두드러졌다. 작업계획의 중요한 평가척도[3]인 C_{mean} 과 W_{mean} 에서도 작업부하가 불균형할 수록 해를 크게 악화시키는 것으로 보인다.

<그림 2>에서도 순수납기지연과 관련된 척도에서 작업부하 불균형 수준에 따라 해의 변동을 나타내었다. 처리시간 척도와 마찬가지로 납기관련 척도에서도 작업부하 불균형은 더 많은 작업을 납기지연시키는 것으로 나타났다. 현장에서 중요하게 다루어지는 평가척도[9, 20]인 T_{max} , T_{mean} , T_{rms} 과 CT_{rms} 에서 균형된 작업부하보다 매우 불균형한 작업부하에서 대략 3~4배 정도 납기지연을 악화시키는 것으로 나타났다.

<그림 3>은 작업부하가 납기지연에 미치는 영향을 가장 잘 적용된 할당규칙의 해로 나타내었다. <그림 1>과 <그림 3>을 비교해보면 알 수 있듯이 작업부하 불균형은 작업의 순수납기지연과 마찬가지로 상당한 조기납기를 유발시키는 것으로 나타났다. L_{max} 는 작업부하 불균형 전 수준에서 가파르게 증가하는 반면 L_{mean} 의 증가가 완만한 것은 작업부하 불균형 수준 3, 4 수준까지는 납기가 촉박한 대부분 부품의 납기지연이 증대되다가 그 수준을 넘으면 작업부하 불균형이 높은 설비에 해당하는 부품을 중심으로 납기지연 시간이 증대되기 때문으로 보인다.

<그림 4>는 설비가동률과 관련된 성능평가척도에서 가장 잘 적용된 할당규칙의 평균설비 가동률과 설비별 가동률의 평균절대편차를 작업부하 변동계수 수준에 따른 변화를 보이고 있다. 설비별 작업부하 불균형은 같은 작업에 대한 설비가동률을 95%에서 35%까지 저하시키는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 설비별 작업부하의 불균형이 존재하는 job shop의 작업계획 방법을 분석하였다. 작업부하 불균형을 7 수준으로 가정하여 비교적 최근에 제시된 40개 할당규칙을 20개 성능평가척도에서 비교분석하였다.

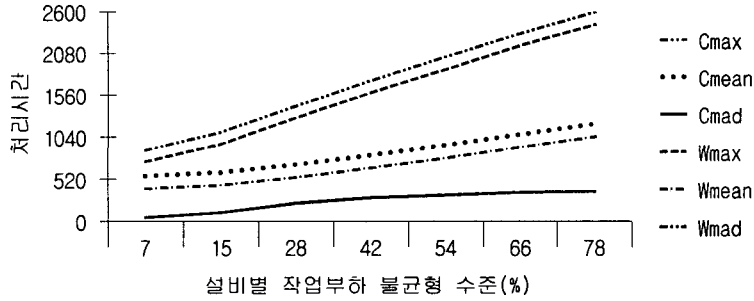
컴퓨터 시뮬레이션 실험결과, 작업의 처리시간 및 납기와 설비 가동률과 관련된 평가척도에서 작업편차 불균형이 높아짐에 따라 작업계획 성능은 상당히 저하되는 것으로 나타났다. C_{max} 에서는 할당규칙 SPT/WRK와 WRK/PT가, C_{mean} 와 W_{mean} 에서는 SPT·WRK가, C_{mad} 와 W_{mad} 에서는 MOPNR이, W_{max} 에서는 설비별 작업부하 불균형 수준이 낮으면 SPT/WRK이, 높으면 S/TWK이 가장 잘 적용되었다. T_{max} , T_{mean} , T_{rms} , L_{max} , L_{mean} 와 CT_{rms} 등의 평가척도에서는 MST, S/OPNR, S/TWK, S/WKR, SS/OPNR, SS/WKR, ODD, MDD, CR, Hybrid와 CR+SPT

등이 좋은해를 구하였다. U_{mean} 과 U_{mad} 에서는 SPT/WKR, WKR/PT와 LWKR 등이 잘 적용되었다. TJ_{per} 에서는 납기만족에서 그다지 주목되지 않은 SPT·WRK이 가장 좋은 결과를 보였다. I_{wip} 는 작업부하가 불균형 할수록 최대처리시간이 길어지는 이유로 설비별 작업부하 불균형 수준에 영향을 받지 않는 것으로 나타났고 SPT·WRK이 좋은해를 구하였다.

기존연구에서 처리시간 평가척도의 SPT와 MWKR, 납기만족 평가척도의 MOD, COVERT, CEXSPT와 ATC 등이 보인 좋은 성능은 작업부하 불균형이 존재하는 상황에서 달라지는 것으로 보인다. 작업부하의 불균형이 7%에서 78%로 증가하면 현장의 작업계획에서 중요하게 다루어지는 평가척도인, C_{mean} 와 W_{mean} 에서는 2.1~2.6배 정도 처리시간을 지연시키고 T_{max} , T_{mean} , T_{rms} 과 CT_{rms} 에서는 3~4배 정도 납기를 지연시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 설비별 작업부하 불균형이 존재하는 job shop의 작업계획과 작업의 처리시간 및 납기준수를 위하여 작업부하를 균형화시키는 데 필요한 공구 및 고정구 등의 설비투자 와 대체공정을 개발하는 비용모델의 정보로 활용될 수 있다. 본 연구에 대한 현실적인 보완을 위하여 포괄적이고 동적인 성능평가 척도의 개발과 대체 작업경로를 고려한 연구가 추후에 필요하리라 본다.

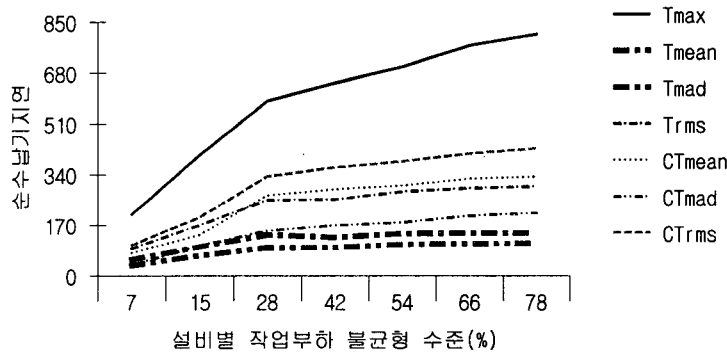
<표 4> 20개 평가척도에 대한 할당규칙의 평균 순위

순위	작업부하 불균형 수준						
	1(7%)	2(15%)	3(28%)	4(42%)	5(54%)	6(66%)	7(78%)
1	CR+SPT	CR+SPT	MOD	CR+SPT	CR+SPT	MDD	SS/WKR
2	ODD	MOD	CR+SPT	MOD	S/OPNR	S/OPNR	MDD
3	SPT/WKR	CEXSPT	CEXSPT	S/RPT+SPT	MOD	SS/WKR	SS/TWK
4	MOD	SPT/TWK	S/RPT+SPT	MST	S/WKR	SS/TWK	MST
5	MST	SPT/WKR	SS/TWK	SS/TWK	MST	S/WKR	S/WKR
6	CEXSPT	S/RPT+SPT	SPT/TWK	S/WKR	SS/TWK	MST	S/OPNR
7	S/WKR	ODD	SPT.TWK	CEXSPT	SS/WKR	CR+SPT	CR+SPT
8	SPT/TWK	SS/TWK	MST	S/OPNR	MSST	MOD	MSST
9	S/OPNR	MST	SPT/WKR	SPT.TWK	S/RPT+SPT	MSST	MOD
10	S/RPT+SPT	S/WKR	S/WKR	MDD	MDD	S/RPT+SPT	S/RPT+SPT
11	MWKR	SPT.TWK	ODD	SS/WKR	SPT.TWK	SPT.TWK	SPT.TWK
12	SS/TWK	SPT+LOPNR	SS/WKR	ODD	ODD	CEXSPT	ODD
13	SPT.TWK	FCFS	MSST	MSST	CEXSPT	ODD	SPT+LOPNR
14	ATC	S/OPNR	SPT+LOPNR	SPT+LOPNR	SPT+LOPNR	ATC	CEXSPT
15	MSST	ATC	S/OPNR	ATC	ATC	SPT+LOPNR	FCFS
16	SS/WKR	MWKR	MDD	SPT/TWK	FCFS	FCFS	LWKR
17	FCFS	MSST	FCFS	SPT/WKR	SPT/TWK	LCFS	ATC
18	SPT+LOPNR	MDD	ATC	FCFS	SPT/WKR	LWKR	LCFS
19	MDD	SS/WKR	MWKR	LCFS	LWKR	SPT/TWK	SPT/TWK
20	LCFS	LCFS	HYBRID	LWKR	LCFS	LOPNR	SPT/WKR
21	LWKR	LWKR	LWKR	MWKR	LOPNR	SPT/WKR	LOPNR
22	HYBRID	HYBRID	LOPNR	LOPNR	MWKR	MWKR	MWKR
23	COVERT	LOPNR	LCFS	LPT+MOPNR	TWK/PT	TWK/PT	TWK/PT
24	LOPNR	COVERT	COVERT	LPT/TWK	LPT/TWK	LPT/TWK	LPT/TWK
25	S/TWK	LPT+MOPNR	LPT.TWK	TWK/PT	LPT+MOPNR	LPT+MOPNR	LPT/WKR
26	LPT.TWK	SPT.WKR	LPT/TWK	COVERT	LPT/WKR	LPT/WKR	LPT+MOPNR
27	LPT+MOPNR	TWK/PT	TWK/PT	LPT/WKR	LPT.TWK	LPT.TWK	LPT.TWK
28	LPT/TWK	LPT	LPT+MOPNR	LPT.TWK	S/TWK	EDD	EDD
29	TWK/PT	LPT/TWK	LPT/WKR	HYBRID	EDD	S/TWK	S/TWK
30	LPT/WKR	LPT/WKR	SPT.WKR	S/TWK	SS/OPNR	SS/OPNR	SS/OPNR
31	CR	LPT.TWK	EDD	EDD	COVERT	CR	CR
32	LPT	S/TWK	LPT	SS/OPNR	HYBRID	COVERT	COVERT
33	SS/OPNR	CR	S/TWK	CR	CR	HYBRID	HYBRID
34	SPT.WKR	SS/OPNR	SS/OPNR	SPT.WKR	SPT.WKR	SPT.WKR	SPT.WKR
35	EDD	EDD	CR	LPT	LPT	SPT	LPT
36	MOPNR	SPT	SPT	SPT	SPT	LPT	SPT
37	SPT	MOPNR	MOPNR	MOPNR	MOPNR	MOPNR	MOPNR
38	WKR/PT	WKR/PT	WKR/PT	WKR/PT	WKR/PT	WKR/PT	WKR/PT
39	LPT.WKR	TWK	LPT.WKR	TWK	TWK	TWK	LPT.WKR
40	TWK	LPT.WKR	TWK	LPT.WKR	LPT.WKR	LPT.WKR	TWK



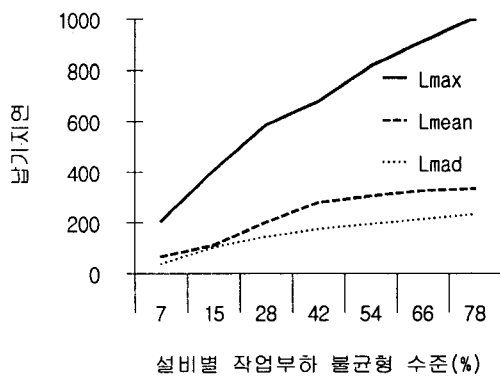
<그림 1> 작업부하와 처리시간 변화

C_{max} 최대처리시간, C_{mean} 평균처리시간, C_{mad} 평균처리시간절대편차, W_{max} 최대대기시간, W_{mean} 평균대기시간, W_{mad} 평균대기시간절대편차



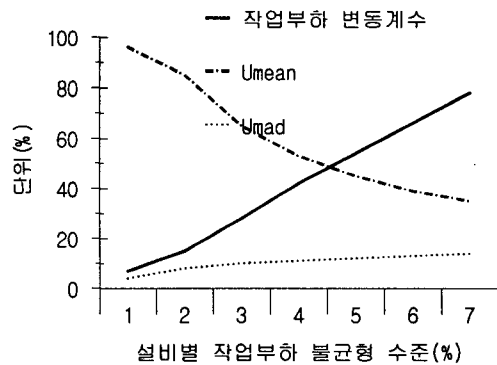
<그림 2> 작업부하와 순수납기지연 변화

T_{max} 최대 순수납기지연, T_{mean} 평균순수납기지연, T_{mad} 평균순수납기지연절대편차, T_{rms} 평균순수납기지연의 제공근
 CT_{mean} 조건부 평균순수납기지연, CT_{mad} 조건부 평균순수납기지연절대편차, CT_{rms} 조건부 평균순수납기지연의 제공근



<그림 3> 작업부하와 남기지연 변화

L_{max} 최대 남기지연, L_{mean} 평균남기지연, L_{mad} 평균남기지연절대편차



<그림 4> 작업부하와 설비가동률 변화

U_{mean} 평균설비 가동률, U_{mad} 설비별 가동률의 평균절대편차

참고문헌

- [1] Anderson, E. J. and Nyirenda, J. C., "Two New Rules to Minimize Tardiness in a Job Shop", *International Journal of Production Research*, 28(12):2277-2292, 1990.
- [2] Ashour, S., *Sequencing Theory*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, Ch.2, 1972.
- [3] Baker, K. R., *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley & Sons Inc., New York, Ch.2-8, 1974.
- [4] Bestwick, P. F. and Lockyer, K. G., "A Practical Approach to Production Scheduling", *International Journal of Production Research*, 17(2):95-109, 1979.
- [5] Blackstone, J. H., Phillips, D. T., and Hogg, G. L., "A State-of-Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations", *International Journal of Production Research*, 20(1):27-45, 1982.
- [6] Blazewicz, J., Domschke, W., and Pesch, E., "The Job Shop Scheduling Problem: Conventional and New Solution Techniques", *European Journal of Operational Research*, 93:1-33, 1996.
- [7] Chang, Y. L., Sueyoshi, T., and Sullivan, R. S., "Ranking Dispatching Rules by Data Envelopment Analysis in a Job Shop Environment", *IIE Transactions*, 28:631-642, 1996.
- [8] Feuer, Z., Givon, R., and Dar-El, E., "A Simulation Based Scheduling System", *The FMS Magazine*, 7(1):15-17, 1989.
- [9] Fry, T. D., Philipoom, P. R., and Markland, R. E., "Distatching in a Multistage Job Shop where Machine Capacities are Unbalanced", *International Journal of Production Research*, 26(7):1193-1223, 1988.
- [10] Graves, S. C., "A Review of Production Scheduling", *Operation Research*, 29(4):646-674, 1981.
- [11] Hankins, S. L., Wusk, R. A., and Fox, K. R., "Using a CATS Database for Alternative Machine Loading", *Journal of Manufacturing Systems*, 3(2):115-120., 1984.
- [12] Huq, Z. and Huq, F., "Embedding JIT in MRP:The Case of Job Shops", *Journal of Manufacturing Systems*, 13(3):153-164., 1993.
- [13] Hutchison, J., Leong, K., Snyder, D., and Peter, W., "Scheduling Approaches for Random Job Shop Flexible Manufacturing Systems", *International Journal of Production Research*, 29(5):1053-1067, 1991.
- [14] Jones, C. H., "An Economic Evaluation of Job Shop Dispatching Rules", *Management Science*, 20(3):293-307, 1973.
- [15] Kim, Y. D., "A Backward Approach in List Scheduling Algorithms for Multi-Machine Tardiness Problems", *Computers and Operations Research*, 22(3):307-319, 1995.
- [16] Leon, V. J., Wu, S. D., and Storer, R. H., "Robustness Measures and Robust Scheduling for Job Shops", *IIE Transactions*, 26(5):32-43, 1994.
- [17] Mckay, K. N., Safayeni, F. R., and Buzacott, J. A., "Job Shop Scheduling Theory: What is Relevant ?", *Interface*, 18(4):84-90, 1988.
- [18] Parunak, H. V. D., "Characterizing The Manufacturing Scheduling Problem", *Journal of Manufacturing System*, 10(3):241-259, 1991.
- [19] Raman, N, Talbot, F. B., and Rachamadugu, R. V., "Due Date Based Scheduling in a General Flexible Manufacturing System", *Journal of Operations Management*, 8(2):115-132, 1989.
- [20] Russell, R. S., Dar-El, E. M., and Taylor, III, B. W., "A Comparative of the COVERT job Sequencing Rule using Various Shop Performance Measures", *International Journal of Production Research*, 25(10):1523-1540, 1987.
- [21] Shaw, M. J., Park, S., and Raman, N., "Intelligent Scheduling with Machine Learning Capabilitiew:The Induction of Scheduling Knowledge", *IIE Transactions*, 24(2):156-168, 1992.
- [22] Shimoyashiro, S., Isoda, K., and Awane, H., "Input Scheduling and Load Balance Control for a Job Shop", *International Journal of Production Research*, 22(4):597-605, 1984.