

지체작업수 최소화를 위한 동태적 흐름작업장의 작업배정규칙

문 석 환*

〈目 次〉

- | | |
|-------------------|----------------|
| I. 서 론 | 2. 납기일 배정방법 |
| II. 흐름작업장 세부일정계획 | 3. 실험설계 |
| 1. 병렬기계 흐름작업장 문제 | IV. 실험결과 |
| 2. 기존의 흐름작업장 통제기법 | 1. 지체작업수 |
| 3. 작업배정규칙 | 2. 평균지체시간 |
| III. 시뮬레이션 모형 | V. 결론과 향후 연구과제 |
| 1. 작업장의 구조와 특성 | |

I. 서 론

급속한 기술발전과 세계경제의 개방화에 따라 기업간의 경쟁이 극심해 지고 있다. 이러한 경쟁환경 하에서 기업이 살아남기 위해서는 필연적으로 고객위주의 경영을 추구하지 않을 수 없다. 제조업의 경우 고객수요 및 시장환경 변화에 적응할 수 있는 유연적인 생산시스템의 구축이 기업의 핵심 경쟁 요인으로 등장하게 되었다. 그리하여 유연생산시스템의 구축을 위하여, 수치제어기계나, 로봇 그리고 무인운반장치 등의 자동화 설비가 널리 확산되고 있다. 그러나 유연생산시스템은 단순한 생산설비의 자동화만으로는 소기의 목적을 달성하기 힘들다. 생산설비의 자동화와 더불어, 무엇보다도 중요한 것이 효과적인 운용, 즉 생산계획 및 일정계획 측면이다. 그리하여 과거에는 하위계층의 일상적인 문제로 치부되어 별로 중요하게 인식되지 못하던 생산현장의 일정계획 문제가 새롭게 관심을 끌고 있다. 무한경쟁의 시대에 서 효과적인 일정계획은 생산현장의 효율성을 높여 주어 기업 경쟁력의 원천이 될 뿐 아니라, 급변하는 환경변화에 적응할 수 있는 생산시스템의 변화의 폭(band width), 즉 유연성을 결정하는 전략적 요인이 되기 때문이다.

* 경북대학교 경영학부 부교수

일정계획에 관하여 최근까지 많은 연구들이 이루어져 왔으며, 이들을 성과기준, 작업장 형태 및 접근방법 측면에서 살펴보면 다음과 같다. 먼저 일정계획의 중요한 성과기준으로 흐름 시간, 기계활용률, 재공품 재고 및 납기일 관련 기준들이 널리 적용되어 왔다. 지금까지 생산 현장의 일정계획은 주로 기계활용률이나, 흐름시간 및 재공품 재고와 같은 효율성과 관련된 성과를 중시하여 왔으나, 최근 들어 경쟁의 심화와 더불어 고객서비스 측면이 강조되면서, 납기일 관련 성과, 특히 평균지체시간(mean tardiness)에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 납기일 성과기준 중 지체작업수(number of tardy jobs)는 생산현장에서도 상대적으로 등한시 될 뿐 아니라 그에 관한 연구도 부족한 편이다. 실제로 지체작업수 성과기준은 고객 위주의 경영에서 볼 때, 매우 중요한 일정계획 성과기준이다. 왜냐하면 지체작업은 바로 고객의 불만족으로 이어지고, 지체작업수의 최소화는 불만족한 고객의 수를 최소화한다는 점에서 매우 중요하다. 본 연구는 지체작업수를 최소화할 수 있는 새로운 작업배정규칙을 개발하고 그 성과를 기존의 작업배정규칙과 비교하고자 한다. 작업배정규칙의 성과를 비교하기 위하여 지체작업수와 함께 평균지체시간도 성과기준으로 포함시켰다. 본 연구에서 적용된 성과기준이 <표 I-1>에 요약되었다.

<표 I-1> 성과기준

성과기준	설 명
평균 지체시간	$1/n \sum_{i=1}^n T_i$
지체작업수	$\sum_{i=1}^n N_i$

주) $T_i =$ 작업 i 의 지체시간
 $= \text{Max}(C_i - d_i, 0)$
 $C_i =$ 작업 i 의 완료시간
 $d_i =$ 작업 i 의 납기일

$N_i = 1$ ($T_i > 0$ 이면),
 0 (그렇지 않으면)

그리고 기존연구에서 작업장의 형태는 단일 기계를 가정하는 단순한 구조에서부터 여러 개의 작업장들로 구성된 복잡한 형태까지 다양하다. 여러 개의 작업장이 복합적으로 연결된 작업장은 공정경로(routine)의 유형에 따라, 잡샵(job shop), 흐름작업장(flow shop), 그리고 조립작업장(assembly shop)으로 나뉜다. 잡샵에서는 각 부품들의 공정경로가 서로 상이한 반면, 흐름작업장에서는 동일한 경로를 지닌다. 그리고 조립작업장에서는 부품들이 조립작업을 필요로 하므로 제품구조에 따른 추가적인 제약이 따른다. 사실상 흐름작업장이나 조립작업장은 추가적인 제약조건이 덧붙여진 잡샵의 특수한 형태로 볼 수 있다. 최근 시장수요

변동에 유연하게 적응하면서 제품의 다양성도 높이고 동시에 효율성도 달성할 수 있는 셀방식 제조시스템(cellular manufacturing systems)이 널리 보급되고 있는데, 이는 주로 흐름작업장 형태를 취하고 있다. 셀방식 제조시스템에서는 유사한 부품군들을 하나의 제조셀에서 동시적으로 처리할 수 있어 생산제품의 다양성을 높일 수 있다. 셀방식 제조시스템은 80년대 이후 많은 관심을 집중시켰던 일본식 적시생산시스템(JIT: just in time)에서도 중요한 구성요소로 인식되어 왔다. 본 연구는 병렬기계들로 구성된 흐름작업장을 가정하고 있으며, 구체적인 작업장 형태와 세부일정계획 문제는 다음 절에서 설명하기로 한다.

작업장은 또한 처리되어야 할 작업들에 대한 가정에 따라 정태적 작업장과 동태적 작업장으로 나뉜다. 정태적 작업장(static shop)에서는 모든 작업들이 시작시점에 준비 완료되어 있고, 처리시간이나 납기일 등의 작업에 관한 모든 정보(job descriptors)들이 미리 알려진 상황을 의미한다. 반면에 동태적 작업장(dynamic shop)은 작업들이 계속적으로 도착하며, 도착하기 전까지는 작업에 대한 정보가 알려지지 않다고 가정하고 있다. 안정적 대량생산체제하에서 기간별 생산계획이 이루어질 경우에 정태적 작업장을 가정하여도 별 문제가 없을 것이나, 오늘날과 같이 급변하는 생산환경에서는 동태적 작업장을 가정하는 것이 보다 현실적이다. 본 연구에서는 동태적인 작업장을 가정하고, 기계고장 등의 불확실성을 포함시켰다.

일정계획의 연구를 위해 다양한 접근방법이 이용되어 왔다. 비교적 단순한 일정계획의 문제는 최적해 알고리즘이 개발되었으나, 현실적 문제의 경우는 최적해를 구하기가 매우 힘들다. 일정계획문제의 해를 구하기 위하여, 분지하한법(branch and bound technique)이나 정수계획법 또는 대기행렬이론을 이용한 수학적 접근법 이외에도, 컴퓨터 시뮬레이션 등의 방법이 이용되고 있다. 최근에는 퍼지이론, 인공신경망, 그리고 유전자 알고리즘 등의 지능적인 기법의 적용도 늘어나고 있다. 일정계획에서 중요한 것 중의 하나는 현실적인 적용가능성이다. 일정계획 기법이 지나치게 복잡할 경우 현장의 생산담당자들이 이해하고 적용하는 데 어려움이 따른다. 생산현장의 적용가능성을 높이기 위해서는 최적해는 아니더라도 그에 근접하는 해를 간단한 방법으로 신속히 제공해 주는 방법이 요구된다. 작업순서를 결정하는 단순한 작업배정규칙(dispatching rules)들이 생산현장에서 많이 적용되고 있는 이유가 바로 여기에 있다. 본 연구에서는 흐름작업장에서 특히 지체작업수 성과를 높일 수 있는 새로운 작업배정규칙을 고안하여 이를 기존의 작업배정규칙과 비교하는 데 그 주목적이 있다.

II. 흐름작업장 세부일정계획

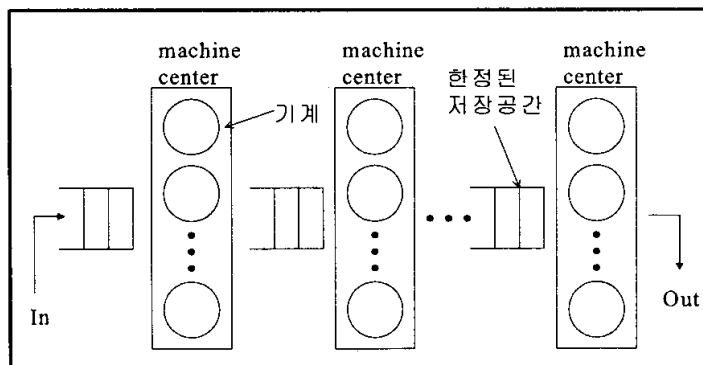
1. 병렬기계 흐름작업장 문제

본 연구는 흐름작업장의 한 형태인 병렬기계 흐름작업장에서의 작업순서결정 문제를 다루고자 한다. 흐름작업장 작업순서결정 문제(flow shop sequencing problem)란 n 개의 작업이 m 개의 기계에서 단일방향의 동일한 경로로 처리되는 경우의 작업처리순서(sequencing)를 결정하는 문제다. 병렬기계 흐름작업장(FSMP: flow shop with multiple processors)은 동일한 성능을 지닌 하나 이상의 병렬기계들로 구성된 작업장(machine center 또는 stage)들이 흐름형태로 연결된 것을 말한다. 이러한 병렬기계 흐름작업장은 또한 유연흐름라인(FFL: flexible flow line)이라고 불리기도 한다.

병렬기계 흐름작업장에서는 모든 작업들이 연속된 일련의 작업장(machine center 또는 stage)상의 동일한 경로를 거쳐 처리된다. 그리고 각 작업장은 하나 또는 그 이상의 동일한 기계들로 구성된다. 각 작업은 각 작업장 내의 한 기계에서만 가공되고 경우에 따라 어떤 작업은 특정 작업장을 건너 뛴 수도 있다. 이러한 병렬기계 흐름작업장의 일반 모형이 <그림 II-1>에 예시되었다. <그림 II-1>의 병렬기계 흐름작업장은 각 작업장 앞에 한정된 능력의 저장공간을 가정하고 있다.

일반적으로 자동화된 흐름작업장은 수치제어기계나 로봇 등의 자동화된 설비로 연결되어 있어, 한 작업의 처리를 끝내고 다른 작업의 처리를 시작하는 데 걸리는 시간, 즉 준비시간

<그림 II-1> 병렬기계 흐름작업장



(setup time)은 거의 무시할 정도여서 이론상으로 하나의 흐름작업장 상에서 여러 상이한 종류의 작업을 동시에 처리하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 또한 작업들이 한 작업장에서 다음 작업장으로 이동되는 시간은 무시할 정도라고 간주하였다. 기타 본 연구의 병렬기계 흐름작업 모형에 적용된 가정들은 <표 II-1>에 요약되었다.

병렬기계 흐름작업장에서의 세부적인 작업흐름통제는 크게 다음과 같은 세 가지의 기능을 포함하고 있다.

- (1) 투입결정(releasing): 흐름작업장에 투입할 각 작업의 선정과 투입시점의 결정.
- (2) 경로결정(routing): 각 작업장에서 특정 작업을 처리하게 될 기계의 선택.
- (3) 작업배정결정(dispatching): 각 작업장에서 다음으로 처리될 작업의 선택.

본 연구에서 각 작업장은 동일한 성능의 기계로 구성되어 있다고 가정하고 있으므로, 위의 세 가지 기능 중 경로결정은 별로 문제시되지 않는다. 본 연구에서 경로결정은 각 작업들이 작업장 내에서 가장 먼저 이용 가능한 기계에 배정되는 방식으로 이루어졌다.

<표 II-1> 병렬기계 흐름작업장 모형의 가정

가정	설 명
작업에 대한 가정	<ul style="list-style-type: none"> - 각 작업은 동태적으로 작업장에 도착하며, 작업의 도착간격시간은 확률분포로 주어진다. - 각 작업은 m개의 공정(operation)을 거치며, 각 공정은 각 작업장 내의 하나의 기계에 의해 처리된다. - 작업들은 하나 이상의 기계에 동시에 가공될 수 없다. - preemption은 허용되지 않는다. - 모든 작업은 공통의 순차적 경로를 거쳐 가공된다. - 각 작업은 모든 작업장을 거쳐 처리된다. - 작업의 취소는 허용되지 않으므로 각 작업은 완성될 때까지 처리된다. - 재공품 재고와 저장공간에서의 대기시간이 허용된다.
기계에 대한 가정	<ul style="list-style-type: none"> - 모든 기계는 시작시점에 이용 가능하다. - 기계고장이 발생할 수 있으며, 고장시간간 간격(MTBF: mean time between failure)와 평균수리시간(MTTR: mean time to repair)은 확률분포로 주어진다. - 각 작업장은 하나 이상의 동일한 성능의 독립적인 기계로 구성된다. - 기계에 유희상태가 발생할 수 있다.
처리 시간에 대한 가정	<ul style="list-style-type: none"> - 준비시간은 작업순서에 독립적이다. - 준비시간과 운반시간은 처리시간에 포함된 것으로 간주한다. - 처리시간도 작업순서에 독립적이다. - 처리시간은 확률분포를 따른다.

본 연구는 작업들이 무작위로 도착하는 동태적인 흐름작업장을 다루고 있으며, 또한 각 작업장에는 한정된 저장공간이 있다고 가정하고 있다. 이러한 상황에서, 일단 도착된 작업은 도착작업집합(arriving job pool)에 합류하게 된다. 그리고 투입결정은 첫 번째 작업장의 저장공간에 여유가 있을 때마다 시스템 내로 새로 투입할 작업을 선택하게 된다. 이러한 투입 결정방식은 다음에 설명할 작업배정결정과 별 차이가 없게 된다.

작업배정결정이란 각 작업장의 저장장소에 대기하고 있는 작업 중에서 이용 가능한 기계에 의해 다음으로 처리될 작업을 선택하는 것을 말하는데, 엄밀한 의미에서 작업순서결정(sequencing)과 구별되는 개념이다. 작업순서결정(sequencing)이란 모든 작업에 대하여 처리될 작업순서를 미리 결정하며 이 작업순서가 모든 작업장에서 동일하게 지켜지도록 하는 방법으로 전통적인 정태적 흐름작업장 작업순서결정(flow shop scheduling)문제에 주로 적용된다. 그러나 동태적인 복잡한 현실의 일정계획문제를 작업순서결정(sequencing)방식에 의해 최적해를 구한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 현실의 일정계획 문제에서는 작업 배정결정(dispatching)방식을 많이 사용하게 되고 이를 위해 여러 가지 단순한 경험적인 규칙들이 이용된다.

2. 기존의 흐름작업장 통제기법

정태적인 단순 흐름작업장에 대하여는 비교적 많은 연구들이 이루어져 왔다. 2개의 기계로 구성된 흐름작업장의 총작업완료시간(makespan)을 최소화하는 Johnson(1954)의 최적해 알고리즘은 너무나 유명하다. 그리고 3개의 기계에 대해서도 특별한 경우에 총작업완료시간을 최소화하는 최적해가 알려져 있으나, 그 이외의 흐름작업장 문제는 NP-complete 임이 증명되었다. Palmer(1965), Campbell et al.(1970), Gupta(1986), 그리고 Dannenbring(1977) 등은 Johnson 알고리즘의 특성을 활용하는 경험적인 규칙을 개발하였다.

최근 들어 흐름작업장 스케줄링에 관하여 퍼지이론이나 유전자 알고리즘 등의 지능적 기법을 적용한 연구들이 많이 이루어지고 있다. Reeves(1994), Murata, et al.(1996)과 Chen, et al.(1995)은 단순 흐름작업장 문제에 총작업완료시간을 최소화하기 위한 유전자 알고리즘을 적용하였다. Gangadharan & Rajendran(1994)은 평균흐름시간과 총작업완료시간의 이중 성과기준을 최적화하기 위하여 simulated annealing기법을 적용하였으며, Sridhar & Rahendran(1996)의 연구는 총작업완료시간, 총흐름시간, 기계유휴시간의 다기준에 대하여 유전자 알고리즘을 적용하였다. 그 이외에도 Chen, et al.(1996)은 연속적 작업이 행해지는 흐름작업장에 대하여, 그리고 Ishibuchi et al.(1994)은 퍼지 낚기일을 전

제로 유전자 알고리즘을 적용하였다.

병렬기계 흐름작업장의 일정계획에 대한 연구는 단순 흐름작업장에 비해 상대적으로 그 수가 많지 않은 편이다. Santos et al.(1996)의 연구는 단순 흐름작업장을 대상으로 개발된 경험적인 방법을 병렬기계 흐름작업장에 적용하였다. 병렬기계 흐름작업장의 통제모형 중 가장 간단한 방법 중의 하나로 Hitz(1980)에 의해 제시된 MPS(Minimal Part Set) 휴리스틱을 들 수 있다. MPS란 당해 생산기간 동안 생산되어야 할 소요 작업수량과 같은 비율로 이루어진 최소의 정수 개수로 이루어진 작업 집합을 주기적으로 작업장에 투입하는 방법이다. 그리고 Wittrock(1985)은 작업장간의 작업부하가 동태적으로 균등화 되도록 MPS내의 작업투입순서를 결정하는 방법을 제시하였다.

작업장의 확률적 상황을 가정하는 병렬기계 흐름작업장에 관한 연구로는 Gershwin et al.(1985)과 Han & McGinnis(1988) 및 Deane & Moon(1992) 등의 연구를 들 수 있다. Gershwin et al.(1985)이 제시한 모형은 각 작업유형의 생산율을 일정하게 유지하는 제약조건을 고려하였다. Han & McGinnis(1988)는 선형계획법을 이용한 Discrete Time Control(DTC)모형을 개발하여 생산율(throughput rate)을 극대화하고자 하였다. Dean & Moon(1992) 역시 선형계획법을 이용하여 작업장별로 통제기간 동안의 이상적인 작업부하를 정하여 이 이상적인 작업부하에 보다 일치하도록 시스템 내로 투입할 작업의 유형과 수를 결정하는 모형을 제시하였다. 이들 연구들은 총작업완료시간이나 생산율을 평가기준으로 삼고 납기일을 고려하지 않았으며, 또한 계획기간 초에 정해진 작업들의 완료를 전제로 하는 정태적 작업장을 가정하고 있다.

동태적인 작업도착을 가정하는 연구들은 그 수가 극히 한정적이나, 그 예로서 Park(1988)와 Barret & Barman(1986)의 연구를 들 수 있다. Park(1988)는 단순흐름작업장에서 총작업완료시간에 대하여, 그리고 Barret & Barman(1986)은 두 개의 작업장으로 구성된 병렬기계 흐름작업장에서 흐름시간과 납기일 관련성과들에 대하여 기존의 경험적인 통제기법들을 시뮬레이션으로 평가하였다. Hunsucker & Shah(1992)는 동태적 작업도착과 작업처리시간의 확률분포를 가정한 병렬기계 흐름작업장에서 단순 작업배정규칙들의 납기일 관련성과를 평가하였다.

3. 작업배정규칙

대다수 흐름작업장 문제에 관한 기존 연구들은 정태적, 확정적 상황을 가정하고 있다. 정태적 작업장에서는 처리되어야 할 모든 작업들이 시작시점에 준비 완료되어 있고, 처리시간이

나 납기일 등의 작업에 관한 모든 정보(job descriptors)들이 미리 알려진 상황을 의미한다. 그리고 이들 연구에서 작업처리시간은 확정적이며, 기계고장 등의 불확실성을 가정하지 않고 있다.

그러나 현실의 작업장은 동태적, 확률적 상황이라 할 수 있다. 즉 급변하는 생산환경 하에서는 작업투입결정이 수시로 이루어져 작업들이 작업장에 연속적으로 도착하는 동태적인 상황이 보편화되고 있다. 또한 대다수의 작업장에서 기계고장의 발생이라든지, 처리시간이 불확실하여 확률적 상황(stochastic environment)에 보다 가깝다고 할 수 있다. 고도의 자동화된 설비에서도 기계고장이 빈번히 발생하는 경우가 많다.

현실의 동태적, 확률적 흐름작업장 일정계획문제에 대하여 최적해를 구하기 매우 힘드므로, 여러 가지 탐색기법이나, 수학적 계획법 및 지능적 기법들이 시도되어 왔다. 그러나 이들 방법들은 그 개념이나 적용이 매우 복잡하여 생산현장에서 실제적으로 적용하는 데 많은 어려움이 따른다. 그런 이유로 생산현장에서는 복잡한 수학적인 모형보다는 단순한 형태의 작업배정규칙(dispatching rules)들을 주로 사용하고 있는 것이다.

본 연구는 동태적, 확률적 상황을 전제로 저장공간이 한정된 CFSMP에서 여러 가지 작업배정규칙의 성과를 시뮬레이션을 이용하여 비교·평가하고자 한다. 본 연구에서 적용된 작업배정규칙은 <표 II-2>에 요약되었다.

본 연구는 Hunsucker & Shah(1992)의 연구를 근간으로 하되, 이들 연구에서 적용된 작업배정규칙 이외에도, 납기일을 고려하는 규칙으로 SLK, CR, OPSLK, $|OPSLK|$ 을 추가하였다. 이들 추가적인 작업배정규칙은 납기일을 고려하고 있으므로 납기일 성과를 높일 것으로 기대된다. 특히 $|OPSLK|$ 은 지체작업수 최소화를 위해 본 연구에서 새로이 시도되는 규칙이다. $|OPSLK|$ 은 공정여유가 0에 가까운 작업을 우선적으로 처리하게 된다. 이처

<표 II-2> 작업배정규칙

작업 배 정 규 칩	설 명
FIFO(first in first out)	먼저 도착하는 작업 순
LIFO(last in first out)	나중 도착하는 작업 순
SPT(shortest processing time first)	처리시간이 작은 작업 순
LPT(longest processing time first)	처리시간이 긴 작업 순
SLK(minimum slack)	여유시간이 작은 작업 순
CR(critical ratio)	긴급율이 작은 작업 순
OPSLK(minimum operation slack)	공정여유시간이 작은 순
$ OPSLK $ (minimum absolute operation slack)	공정여유시간 절대값이 작은 순

럼 공정여유가 0에 가까운 작업들을 신속히 처리할 경우, 납기를 지킬 가능성이 매우 높아질 것이다. 왜냐하면 여유시간이 큰 양의 값을 가진 작업들은 다소 처리가 늦어지더라도 납기준수에 지장이 없을 것이며, 반대로 큰 음의 여유를 지닌 작업들은 아무리 빨리 처리하더라도 납기준수가 불가능하기 때문이다.

Ⅲ. 시뮬레이션 모형

본 연구에 이용된 가상적 흐름작업장 시뮬레이션 모형은 AweSim 시뮬레이션 언어로 프로그램하였다. 그리고 모형에 사용된 사용자 정의 프로그램은 C 언어로 작성하였다. 본 연구에서 사용된 시뮬레이션 모형의 구체적 특징들은 다음과 같다.

1. 작업장의 구조와 특성

본 연구에 이용된 시뮬레이션 모형은 <그림 II-1>에 제시된 바와 같은 형태의 흐름작업장으로, 전체 5개의 작업장이 연결되어 있으며, 각 작업장은 3개의 병렬처리 기계로 구성된 것으로 하였다. 각 작업장 앞에는 그 작업장 내의 기계들이 공통으로 이용할 수 있는 한정된 크기의 저장공간이 있다. 이 한정된 저장공간이 가득 차면, 전 단계 작업장의 기계들은 처리를 마친 작업을 내보낼 수 없고 또한 새로운 작업도 처리될 수 없는 blocking 상태가 된다.

작업들은 무작위로 도착하며, 작업의 도착간격시간 분포는 지수분포를 가정하였다. 평균 도착간격시간은 예비실험을 통해 3.5로 정하였다. 각 작업장에서의 작업 처리시간은 모든 작업장에 대하여 동일하게, 평균을 5로 하고, 1과 9사이의 일양분포를 가정하였다.

일단 도착된 작업은 가상적인 도착작업집합(arriving job pool)에서 대기하며, 첫 번째 작업장의 저장공간에 여유가 있을 때마다 작업배정규칙에 따라 새로운 작업이 작업장내로 투입된다. 각 작업장에서는 각 기계가 이용 가능할 때마다, 저장공간에 대기 중인 작업들 중 다음에 처리할 작업을 역시 작업배정규칙에 따라 선택하게 된다. 즉, 작업의 처리순서는 동태적으로 각 작업장에서 결정된다.

매 시뮬레이션은 모든 기계가 비어있고 이용 가능한 상태로 시작하고 종료하는 것으로 하였다. 각 시행에는 1000개의 작업이 도착하여 이들 작업이 모두 끝나면 완료되는 것으로 하여, 이들에 관한 통계치를 수집하였다.

2. 납기일 배정방법

납기일을 할당하는 기법에도 여러 가지가 있으나, 크게 생산시스템에 의해 결정되는 내생적인 방법(endogenous)과 생산시스템 외부, 주로 고객에 의하여 결정되는 외생적(exogenous) 방법으로 나눌 수 있다.

납기일을 생산시스템의 여건을 반영하여 내부적으로 정할 수 있는 상황이라면 물론 바람직하겠지만, 오늘날과 같이 치열한 경쟁상황하에서는 납기일 결정도 고객의 요구를 우선적으로 수용할 수밖에 없는 실정이다. 이러한 상황에서 납기일의 무작위 할당 가정이 보다 현실적인 것으로 볼 수 있다.

즉, 경쟁이 심화될수록 납기일은 내부적으로 결정한다기보다는 외생적 요인에 의하여 결정될 수밖에 없을 것이다. 본 연구는 납기일은 외생요인에 의해 확률적으로 정해지는 것을 가정하였으며, 구체적으로 납기일은 작업의 도착시간에다 48과 208의 범위를 지닌 일양분포를 이용하여 무작위로 생성된 수치를 더한 값으로 하였다. 그리고 납기일의 범위는 대다수 작업들의 처리시간보다 충분히 길면서, 적당한 수의 지체작업이 발생하도록 예비실험을 통하여 결정하였다. 작업이 도착하여 작업의 납기일이 결정되면, 공정납기일은 납기일까지의 시간을 공정별 작업장 처리시간에 비례·배분하여 결정하였다.

3. 실험설계

본 연구는 작업배정규칙의 성과를 평가하는 것이 주목적이므로 작업배정규칙(DISP)이 주요 실험요인이 된다. 그 외에도 성과에 중요한 영향을 미칠 것으로 생각되는 요인으로 기계고장유형(FAIL)과 저장공간의 크기(BUFF)를 고려하였다.

기계고장은 작업장 별로 기계고장이 없는 경우, 기계고장 빈도가 낮은 경우, 그리고 상대적으로 높은 고장빈도의 경우로, 3가지 유형을 모형화 하였다. 작업장 저장공간의 크기는 5, 10, 15의 3가지 수준으로 하였다.

본 연구의 주요 실험요인을 요약하면 다음과 같다.

1) DISP : 8가지 작업우선순위 규칙(dispatching rules)

- (1) FIFO(first in first out)
- (2) LIFO(last in first out)
- (3) SPT(shortest processing time)
- (4) LPT(longest processing time)

- (5) SLK(minimum slack)
- (6) CR(critical ratio)
- (7) OPSLK(minimum operation slack)
- (8) | OPSLK | (minimum absolute operation slack)

2) FAIL : 3가지 유형의 기계고장빈도

- (1) 없음 ($MTBF = \infty$, $MTTR = 0$)
- (2) 낮음 ($MTBF = 400$, $MTTR = 50$)
- (3) 높음 ($MTBF = 200$, $MTTR = 100$)

3) BUFF : 3가지 수준의 저장공간의 크기

5, 10, 15의 3가지 수준

그리고 각 실험조건에 대하여 10번의 반복실험을 실시하여 총 $8 \times 3 \times 3 \times 10 = 720$ 회의 시뮬레이션을 시행하였다. 각 실험조건에 대해 동일한 난수초기치(random number seeds)를 적용하였다. 그리고 성과변수로 지체작업수와 평균지체시간을 이용하였다.

IV. 실험결과

본 연구의 목적은 동태적, 확률적인 상황하의 병렬기계 흐름작업장에서 8개의 작업우선순 위규칙의 성과를 비교하는 데 있다. 총 720회의 시뮬레이션을 시행하여 2가지 성과변수의 결과치를 수집하였으며, 시뮬레이션 결과는 각 성과기준별로 SPSS를 이용하여 ANOVA 분석과 Scheffe의 다중비교분석을 실시하였다.

1. 지체작업수

먼저 납기일관련 성과중 지체작업수에 대한 실험조건별 결과가 <표 IV-1>에 요약되었다. 전체적으로 볼 때 기계고장이 없어 작업장에 대한 작업부하가 낮은 경우는 납기일을 고려하는 SLK, CR, OPSLK, | OPSLK | 규칙들이 우수한 지체작업수 성과를 보였다. 그리고 기계고장이 빈번할수록 | OPSLK | 규칙이 가장 우월한 성과를 보였다.

<표 IV-2>에 지체작업수에 대한 ANOVA 결과가 제시되었다. 실험요인들의 주효과가 모두 0.05 유의수준에서 유의적인 결과를 보이고 있으며, BUFF와 FAIL, 그리고 FAIL과 DISP간에 2원배치 상호작용효과 역시 유의적인 것으로 나타났다.

먼저 BUFF와 FAIL의 상호작용 효과가 <그림 IV-1>에 나타나 있다. <그림 IV-1> 저장공

〈표 IV-1〉 실험조건별 지체작업수

기계고장 유형	작업배정규칙	저장공간의 크기			
		5	10	15	전체
유형1 MTBF:∞ MTTR:0	FIFO	42.7	42.7	42.7	42.7
	LIFO	43.2	43.7	43.7	43.5
	SPT	40.8	40.8	40.8	40.8
	LPT	50.1	51.4	51.0	50.8
	SLK	30.5	30.3	30.3	30.4
	CR	30.3	30.4	30.3	30.3
	OPSLK	31.3	31.4	31.4	31.4
	OPSLK	31.3	31.5	31.5	31.4
	전 체	37.5	37.8	37.7	37.7
유형2 MTBF:400 MTTR:50	FIFO	85.8	103.3	103.8	97.6
	LIFO	80.3	72.2	71.3	74.6
	SPT	74.4	76.5	72.4	74.4
	LPT	116.9	110.1	112.5	113.2
	SLK	72.3	67.2	57.5	65.7
	CR	51.8	54.6	52.4	52.9
	OPSLK	55.0	47.4	46.3	49.6
	OPSLK	44.6	44.8	42.6	44.0
	전 체	72.6	72.0	69.8	71.5
유형3 MTBF:200 MTTR:100	FIFO	693.0	573.3	560.9	608.9
	LIFO	360.1	300.9	320.4	327.1
	SPT	392.0	334.1	283.5	336.5
	LPT	466.0	526.8	519.4	504.1
	SLK	639.4	650.6	527.7	605.9
	CR	702.7	617.2	616.9	645.6
	OPSLK	630.6	524.3	603.3	586.1
	OPSLK	314.1	247.3	222.0	261.1
	전 체	524.7	471.8	456.7	484.4
전 체	211.6	193.9	188.1	97.9	

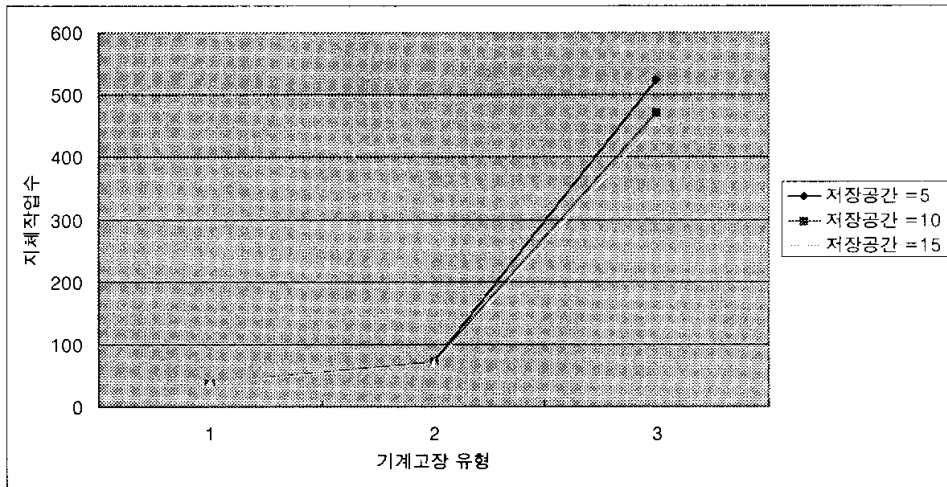
간의 크기와 기계고장 유형에 따른 지체작업수 성과 효과는 기계고장 빈도가 높은 경우(기계고장 유형3)에 나타나고 기계고장이 없거나 낮은 경우는 성과에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 즉 기계고장이 낮은 경우는 작업장에 대한 부하가 낮고, 저장공간에 대기작업의 수가 그리 많지 않아 저장공간의 역할이 그리 크지 않기 때문일 것이다.

작업배정규칙(DISP)과 기계고장 유형(FAIL)과의 상호작용 효과를 살펴보기 위하여 기계고장 유형별 작업배정규칙의 성과에 대하여 Scheffe의 다중비교분석을 실시하였으며, 그 결

〈표 IV-2〉 지체작업수에 대한 ANOVA 결과

		제공합	자유도	평균제공	F	유의확률	
주효과	(결합)	31505405	11	2864127	269.15	.000	
	BUFF	77203	2	36101	3.39	.034	
	FAIL	29699260	2	14849630	1395.45	.000	
	DISP	1733941	7	247705	23.27	.000	
상호작용	2원 배치	(결합)	3515390	32	109855	10.32	.000
		BUFF*FAIL	132168	4	33042	3.10	.015
		BUFF*DISP	79722	14	5694	.53	.913
		FAIL*DISP	3303499	14	235964	22.17	.000
	3원 배치	BUFF*FAIL* DISP	173801	28	6207	.58	.959
모형		35194597	71	495698	.4658	.000	
잔차		6895651	648	10641			
전체		42090248	719	58539			

〈그림 IV-1〉 저장공간의 크기와 기계고장 유형에 따른 지체작업수 성과



과가 〈표 IV-3〉에 요약되었다.

기계고장이 없는 경우(기계고장 유형 1)에서는 납기일을 고려하는 SLK, CR, OPSLK, |OPSLK| 규칙들이 유의적인 높은 지체작업수 성과를 보여주었다. 그리고 기계고장 빈도가 낮은 경우(기계고장 유형 2)에서도 대체로 납기일을 고려하는 규칙들이 역시 높은 성과를 보여주고 있는 것으로 나타났다. 그러나 기계고장 유형 1에서처럼 납기일을 고려하는 규칙들과 그렇지 않은 규칙들 간에 명확하게 구분 짓는 통계적 유의성은 나타나지 않는 반면

〈표 IV-3〉 지체작업수에 대한 Scheffe의 다중비교분석

기계고장 유형					
1		2		3	
규칙	평균	규칙	평균	규칙	평균
CR	30.3	OPSLK	44.0	OPSLK	261.1
SLK	30.4	OPSLK	49.6	LIFO	327.1
OPSLK	31.4	CR	52.9	SPT	336.5
OPSLK	31.4	SLK	65.7	LPT	504.1
SPT	40.8	SPT	74.4	OPSLK	586.1
FIFO	42.7	LIFO	74.6	SLK	605.9
LIFO	43.5	FIFO	97.6	FIFO	609.0
LPT	50.8	LPT	113.2	CR	645.6

| OPSLK | 규칙이 가장 높은 지체작업수 성과를 보였다. 기계고장 빈도가 가장 높은 경우(기계고장 유형3)에서는 | OPSLK | 규칙이 가장 높은 성과를 보여준 반면, 나머지 낱기일을 고려하는 규칙들의 성과가 현저히 저하되는 것으로 나타났다. 즉 기계고장 빈도가 높아, 전체적인 작업장 부하가 높은 경우는 | OPSLK | 규칙이 비교대상에 포함된 다른 작업배정 규칙들에 비해 높은 지체작업수 성과를 보여주는 것으로 나타났다.

그리고 한가지 특기할 것은 기계고장 유형 3에서 LIFO와 SPT 규칙이 상대적으로 높은 지체작업수 성과를 보인다는 사실이다. 작업장의 부하가 높은 경우는 작업들의 지체가능성이 매우 높게 된다. 이런 상황에서 LIFO는 먼저 도착하여 대기 중인 작업을 포기하고 나중 도착한 작업을 우선 처리함으로써 전체적으로 지체작업수를 줄일 수 있는 것으로 보여진다. 왜냐하면 먼저 도착하여 대기중인 작업들은 그만큼 지체가능성이 높기 때문이다. 그리고 본 연구에서는 낱기일이 무작위로 정해지는 것으로 가정하였는데, 이런 상황에서 흐름시간을 단축시키는 데 효과적인 SPT 규칙이 지체작업수 최소화에도 효과가 있는 것으로 보여진다.

2. 평균지체시간

실험조건별 평균지체시간 성과가 〈표 IV-4〉에 요약되었다. 지체작업수 성과에서와 유사하게 기계고장이 없거나 빈도가 낮은 경우(기계고장 유형 1, 2)는 낱기일을 고려하는 규칙들이 대체로 좋은 평균지체시간 성과를 보인 반면 기계고장이 빈번한 유형 3에서는 SPT가 가장 좋은 평균지체시간 성과를 보였다.

〈표 IV-4〉 실험조건별 평균지체시간

기계고장 유형	작업배정규칙	저장공간의 크기			
		5	10	15	전체
유형1 MTBF:∞ MTTR:0	FIFO	.21	.21	.21	.21
	LIFO	.28	.31	.31	.20
	SPT	.23	.23	.23	.23
	LPT	.35	.41	.40	.39
	SLK	.12	.12	.12	.12
	CR	.12	.12	.12	.12
	OPSLK	.12	.12	.12	.12
	OPSLK	.14	.13	.13	.13
	전 체	.20	.21	.21	.20
유형2 MTBF:400 MTTR:50	FIFO	1.28	1.95	1.96	1.73
	LIFO	2.14	1.51	1.62	1.76
	SPT	1.65	2.20	2.16	2.00
	LPT	3.43	3.09	3.22	3.25
	SLK	1.02	.77	.69	.83
	CR	.27	.60	.64	.50
	OPSLK	.38	.30	.30	.33
	OPSLK	.99	1.14	1.17	1.10
	전 체	1.40	1.45	1.47	1.44
유형3 MTBF:200 MTTR:100	FIFO	128.57	85.28	40.23	84.69
	LIFO	122.04	62.38	100.80	95.07
	SPT	79.36	60.66	41.66	60.56
	LPT	153.44	160.00	136.89	150.11
	SLK	100.15	93.09	47.89	80.38
	CR	138.13	83.88	87.79	103.27
	OPSLK	88.63	41.16	82.52	70.77
	OPSLK	141.49	81.49	75.47	99.48
	전 체	118.98	83.49	76.66	93.04
전 체	40.19	23.38	26.11	31.56	

평균지체시간 성과에 대한 ANOVA 분석결과는 〈표 IV-5〉에 제시되었다. 평균지체시간 성과에서도 실험요인들의 주효과와 BUFF와 FAIL, 그리고 FAIL과 DISP간에 2원배치 상호작용효과가 0.05 유의수준에서 유의적인 것으로 나타났다. 먼저 BUFF와 FAIL간의 상호작용 효과를 살펴보면 〈그림 IV-2〉에서 보는 바와 같다.

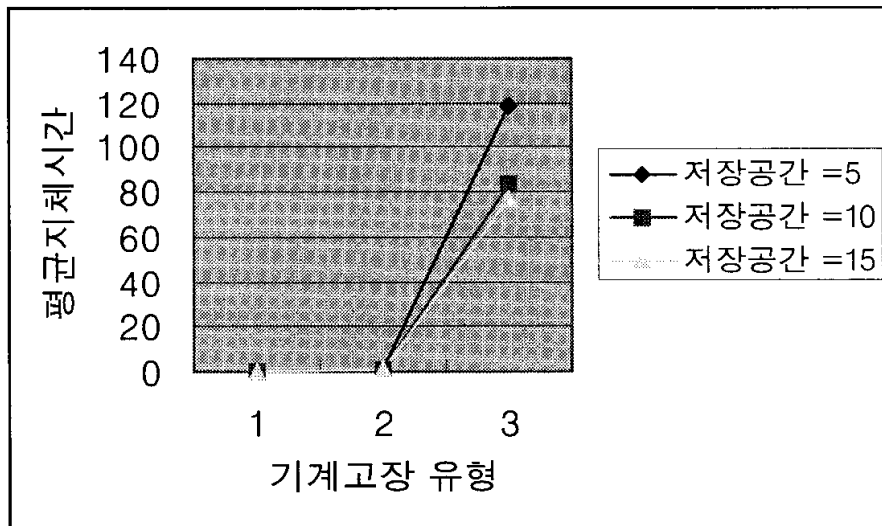
지체작업수 성과의 경우와 마찬가지로 저장공간의 효과는 기계고장 빈도가 높은 유형 3에서 뚜렷이 나타나고 있다.

작업배정규칙(DISP)과 기계고장 유형(FAIL)과의 상호작용 효과를 살펴보기 위하여 기계

〈표 IV-5〉 평균지체시간에 대한 ANOVA 결과

		제공합	자유도	평균제공	F	유의확률	
주효과	(결합)	1442654	11	131150	55.37	.000	
	BUFF	27424	2	13711	5.79	.003	
	FAIL	1360969	2	680484	282.29	.000	
	DISP	54261	7	7751	3.27	.002	
상호작용	(결합)	176304	32	5509	2.32	.000	
	2원 배치	BUFF*FAIL	55158	4	13789	5.82	.000
	BUFF*DISP	19570	14	1397	.59	.874	
	FAIL*DISP	101576	14	7255	3.06	.000	
3원 배치	BUFF*FAIL*DISP	39490	28	1410	.59	.953	
모형		1658448	71	233584	9.86	.000	
잔차		1534846	648	2368			
전체		3193294	719	4441			

〈그림 IV-2〉 저장공간의 크기와 기계고장 유형에 따른 평균지체시간 성과



고장 유형별 작업배정규칙의 평균지체시간 성과에 대한 Scheffe의 다중비교분석을 실시하였으며, 그 결과가 〈표 IV-6〉에 요약되었다.

지체작업수 성과의 경우처럼 명확한 성과의 차이가 나타나지는 않으나, 대체로 납기일을 고려하는 규칙들이 좋은 평균지체시간 성과를 보여주는 것으로 나타났다. 그러나 기계고장빈도가 높은 경우, 즉 기계고장 유형 3에서는 SPT의 성과가 가장 좋은 평균지체시간 성과를

〈표 IV-6〉 평균지체시간에 대한 Scheffe의 다중비교분석

기계고장 유형					
1		2		3	
규칙	평균	규칙	평균	규칙	평균
SLK	.12	OPSLK	.33	SPT	60.6
CR	.12	CR	.50	OPSLK	70.8
OPSLK	.12	SLK	.83	SLK	80.4
OPSLK	.13	OPSLK	1.10	FIFO	84.7
FIFO	.21	FIFO	1.73	LIFO	95.1
SPT	.23	LIFO	1.76	OPSLK	99.5
LIFO	.30	SPT	2.00	CR	103.3
LPT	.39	LPT	3.25	LPT	150.1

보여주고 있다. SPT는 일반적으로 흐름시간 최소화에 효과적인 것으로 알려져 있는데, 지체작업수 성과에서처럼 흐름시간 단축은 평균지체시간 성과에도 도움을 주는 것으로 보여진다.

평균지체시간 성과면에서 | OPSLK | 규칙은 지체작업수 성과에서처럼 명확히 우수한 성과를 보여주지는 못하였으나, 다른 우수한 작업배정규칙과 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다.

V. 결론과 향후 연구과제

기업간 경쟁의 심화와 더불어 고객서비스가 강조되고, 이에 따라 생산현장의 일정계획에서도 납기일 관련성과의 중요성이 높아지고 있다. 그러나 기존의 흐름작업장 일정계획 연구들이 주로 총작업완료시간이나 흐름시간 등의 효율성 성과에 치중되었다. 본 연구에서는 오늘날 유연자동화 시스템에서 보편화되고 있는 병렬기계 흐름작업장을 대상으로 납기일 관련성과에 효과적인 새로운 작업배정규칙을 개발하고 이를 기존의 작업배정규칙과 비교하였다. 또한 본 연구는 기존의 대다수 흐름작업장 일정계획에 관한 연구들과는 달리 동태적, 확률적 작업장을 가정하였다.

납기일 관련성과 중 특히 지체작업수 최소화는 불만족한 고객의 수를 최소화한다는 점에서 고객위주의 경영에 매우 중요한 기준이 된다. 본 연구에서는 지체작업수 최소화를 위해 | OPSLK | 규칙이 새로이 시도되었다. 작업배정규칙의 납기일 관련성과를 비교하기 위하여

컴퓨터 시뮬레이션을 시행하였으며, 시뮬레이션 결과에 대하여 ANOVA 분석과 Scheffe의 다중비교분석을 행하였다.

|OPSLK| 규칙은 지체작업수 성과면에서 다른 작업배정규칙에 비해 매우 효과적이며, 그 효과는 특히 기계고장의 빈도가 높아 작업장 부하가 큰 경우에 더욱 두드러지게 나타났다. 그러나 평균지체시간 성과에서 |OPSLK| 규칙은 좋은 결과를 나타내지는 못하였으나, 다른 우수한 작업배정규칙과 유의적인 차이를 보이지는 않았다.

본 연구에서 개발된 |OPSLK| 규칙은 다른 작업배정규칙들과 마찬가지로 단순한 휴리스틱 방법이므로, 이해하기 쉬울 뿐 아니라 실제 생산현장에 적용하기도 매우 용이하다. 그러나 앞으로 납기일 관련성파가 계속적으로 중요한 일정계획 기준이 될 것이므로, 이를 개선하기 위한 보다 정교한 기법이 요구될 것이다. 이를 위해 작업장의 상태를 고려하여 작업들의 흐름시간을 예측하고, 또한 작업들의 지체가능성을 동태적으로 평가하여 작업의 일정계획을 정하는 방법이 시도될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- Baker, K. R.(1974), *Introduction to Sequencing and Scheduling*, New York: John Wiley & Sons.
- Barrett R. T., & Barman, S.(1986), "A Slam II Simulation Study of a Simplified Flow Shop", *Simulation*, Vol.47, No.5, pp.181-189.
- Brah, S. A.(1996), "A Comparative Analysis of Due Date Based Job Sequencing Rules in a Flow Shop with Multiple Processors", *Proudction Planning & Control*, Vol.7, No.4, pp.362-373.
- Campbell, H. G., Dudeek, R. A., & Smith, N. L.(1970), "A Heuristic Algorithm for the n Job, m Machine Sequencing Problem", *Management Science*, Vol.16, pp.630-637.
- Chen, C., Vempati, V. S., & Aljaber, N.(1995), "An Application of Genetic Algorithms for Flow Shop Problems", *European Journal of Operational Research*, Vol.80, pp.389-396.
- Chen, C., Neppalli, R. V., & Aljaber, N.(1996), "Genetic Algorithms Applied to the Continuous Flow Shop Problem", *Computers and Industrial Engineering*,

- Vol.30, No.4, pp.919-929.
- Conway, R. W., Maxwell, W. L., & Miller, L. W.(1967). *Theory of Scheduling*. Massachusetts: Addison-Wesley.
- Dannenbring, D. G.(1977), "An Evaluation of Flow Shop Sequencing Heuristics", *Management Science*, Vol.23, pp.1174-1182.
- Deane, R. H., & Moon, S. H.(1992), "Work Flow Control in the Flexible Flow Line", *International Journal of FMS*, Vol.4, No.3/4, pp.217-235.
- Gangadharan, R., & Rajendran, C.(1994), "A Simulated Annealing Heuristic for Scheduling in a Flowshop with Bicriteria", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.27, No.1-4, pp.473-476.
- Gershwin, S. B., Akella, R., & Choongg, Y. F.(1985), "Short-term Production Scheduling of an Automated Manufacturing Facility", *IBM J. Res. Develop.*, Vol.29, No.4, pp.392-400.
- Gupta, J. N. D.(1988), "Two-stage, Hybrid Flowshop Scheduling Problem", *J. Oper. Res. Soc.*, Vol.39, pp.359-364.
- Gupta, J., & Darrow, W. P.(1986), "The Two-Machine Sequence Dependent Flowshop Scheduling Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol.24, pp.439-446.
- Han, M. H., & McGinnis, L. F.(1988), "Throughput Rate Maximization in Flexible Manufacturing Cells", *IIE Transactions*, Vol.20, No.4, pp.409-417.
- Hecht-Nielsen, R.(1990), *Neurocomputing*, Massachusetts, Addison-Wesley.
- Hitz, K. L.(1980), "Scheduling of Flexible Flow Shops-II", *Technical Report LIDS-R-1049*, Cambridge, MA, Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology.
- Hunsucker, J. L., & Shan, J. R.(1992), "Performance of Priority Rules in a Due Date Flow Shop", *OMEGA International Journal of Management Science*, Vol.20, No.1, pp.73-89.
- Ishibuchi, H., et al.(1994), "Genetic Algorithms and Neighborhood Search Algorithms for Fuzzy Flow Shop Scheduling Problems", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.67, pp.81-100.

- Johnson, S. M.(1954), "Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.1, No.1.
- Leu, B. Y.(1996), "Simulation Analysis of Scheduling Heuristics in a Flow-Line Manufacturing Cell with Two Types of Order Shipment Environments", *Simulation*, Vol.66, No.2, pp.106-116.
- Lin, L., & Cochran, J. K.(1987), "Optimization of a Complex Flow Line for Printed Circuit Board Fabrication by Computer Simulation", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.6, No.1, pp.47-57.
- Kochhar, S. & Morris, R.(1987), "Heuristic Methods for Flexible Flow Line Scheduling", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.6, No.4, pp.299-314.
- McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E.(1988), *Explorations in Parallel Distributed Processing*, MA : MIT Press.
- Murata, T., Ishibuchi, H., & Tanaka, H.(1996), "Genetic Algorithms for Flowshop Scheduling Problems", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.30, No.4, pp.1061-1071.
- Palmer, D. S.(1965), "Sequencing Jobs through a Multi-stage Process in the Minimum Total Time : a Quick Method of Obtaining a Near Optimum", *Oper Res. Q.*, Vol.16, pp.101-107.
- Park, Y. B.(1988), "An Evaluation of Static Flowshop Scheduling Heuristics in Dynamic Flowshop Models via a Computer Simulation", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.14, No.2, pp.103-112.
- Parker, R. G.(1995), *Deterministic Scheduling Theory*, London: Chapman & Hall.
- Peng, T. M., Hubele, L. F., & Karady, G. G.(1993), "An Adaptive Neural Network Approach to One-Week Ahead Load Forecasting", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, No.3, pp.1195-1203.
- Philipoom, P. R., Rees, L. P., & Wiegmann, L.(1994), "Using Neural Networks to Determine Internally-Set Due-Date Assignments for Shop Scheduling", *Decision Sciences*, Vol.25, No.5/6, pp.825-851.

- Reeves, C. R.(1994), "Genetic Algorithm for Flowshop Sequencing", *Computers Ops Res.*, Vol.22, No.1, pp.5-13.
- Sawik, T. J.(1995), "Scheduling Flexible Flow Lines with No In-Process Buffers", *Int. J. of Prod. Res.*, Vol.33, No.5, pp.1357-1367.
- Sridhar, J., & Rajendran, C.(1996), "Scheduling in Flowshop and Cellular Manufacturing Systems with Multiple Objectives : A Genetic Algorithmic Approach", *Production Planning & Control*, Vol.7, No.4, pp.374-382.
- Toure, S., Rabelo, L., & Velasco, T.(1993), "Artificial Neural Networks for Flexible Manufacturing Systems Scheduling", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.25, No.1-4, pp.385-388.
- Santos, D. L., Hunsucher, J. L., & Deal, D. E.(1996), "An Evaluation of Sequencing Heuristics in Flow Shops with Multiple Processors", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.30, No.4, pp.681-692.
- Taylor, G. D., et al.(1996), "An Evaluation of Flow-shop Scheduling Algorithm for Makespan Reduction in a Stochastic Environment", *Production Planning & Control*, Vol.7, No.2, pp.129-143.
- Wittrock, R.(1985), "Scheduling Algorithms for Flexible Flow Lines", *IBM J. Res. Develop.*, Vol.29, No.4, pp.401-412.