

Job Shop 작업계획의 실제적 접근을 위한 할당규칙[†]

배상운

전주공업대학 시스템정보경영과

The New Dispatching Rules for Practical Approaches of Job Shop Scheduling

Sang Yun Bae

Dept. of Industrial and Systems Engineering, Jeonju Technical College

In the study, for the practical approaches of job shop scheduling, we propose the new dispatching rules of job shop scheduling in order to complement the practical applications in the existing researches. The assumed situation for the practical approaches considers the following; relaxation of assumption for capacity constraint by machine flexibility, the addition of the common use of jig and fixture, unbalanced machine workloads and due date tightness, and produces fast rescheduling that reflects unexpected situations. The performance of the new dispatching rules is compared and analyzed with the existing methods through the computer experiments in the assumed conditions. The results can be useful to improving a field application of the job shop scheduling.

Keywords : Job Shop Scheduling, Dispatching Rule, Practical Approach to Production Scheduling

1. 서론

본 연구에서는 다양한 설비가 다품종의 부품(job)의 공정(operation)을 작업함으로써 생산활동의 혼잡도가 높고 계획 및 통제가 어려운 job shop에서 실제적으로 보완된 할당규칙(dispatching rules)에 의한 작업계획(scheduling) 방법을 제시하고자 한다. 제시된 작업계획 기법은 설비나 인력의 추가 없이도 부품의 처리시간(flow time) 및 재공재고를 줄이고 고객이 원하는 시기에 납품이 가능하도록 하는 등의 효과를 기대하여 볼 수 있다. Job shop은 다양한 업종에서 볼 수 있는 시스

템으로 제조업의 60% 이상이 이 형태를 따르고 그 비율은 증가 추세로 나타나고 있다[15, 20].

Job shop 작업계획은 상위 시스템에서 수립된 부품의 개시일 및 납기일과 공정계획 등의 생산계획을 받아, 부품을 완성해 나가는 데 필요한 공정의 순서를 지키는 순서제약(precedence constraint)과, 설비가 어떤 작업시점에 한 개의 공정만을 작업하고 작업이 완료되기 전에 다른 공정의 작업을 시작할 수 없는 설비제약(capacity constraint)을 지키며, 각 설비에 대한 부품의 공정별 시작 및 완료 시각을 계획하는 것이다[2, 3].

Job shop의 작업계획은 생산시스템의 효율성 제고에 있어서 하나의 난점으로 받아들여지고 있다[11]. Job

[†] 본 연구는 2001학년도 전주공업대학 산업기술연구소의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음

shop에서 부품을 완성하는 데 필요한 처리시간은 준비시간, 순수작업시간, 검사와 운반시간과 지연시간의 합으로 구성된다고 볼 수 있다. 처리시간에서 순수작업시간은 5% 정도, 기타 비작업시간이 95% 정도를 차지하고 비작업시간의 대부분은 지연과 대기에 의한 것으로 알려져 있다. 준비시간은 자동 패릿 및 공구 교환장치, 편리하게 설계된 지그 및 고정구(jig and fixture), 순수작업시간은 다기능 고속 설비, 검사시간은 자동측정장비와 비전시스템, 운반시간은 자동화 반송장비, 등에 의하여 상당 부분 줄어 들 수 있다. 그러나 처리시간의 대부분을 차지하는 작업의 지연이나 대기 시간은 효과적인 작업계획에 의하여 단축되어질 수 있는 데 현장에서 잘 적용되는 작업계획 기법은 미비한 실정이다.

이와 같이 작업계획이 현장에 대한 실제적 접근 측면에서 적용이 어려운 이유는 기존연구가 작고 잘 정형화된 job shop작업계획 문제의 좋은 해를 산출하는데 중점을 두어왔기 때문으로 볼 수 있다[4, 15, 19]. 이러한 문제는 순서제약과 설비제약만을 기본제약으로 하고 대안설비(alternative machine)에 의한 설비유연성(flexibility), 공용 지그 및 고정구 등의 보조설비를 추가 설비제약으로 고려하고 있지 않다. 작업계획 성능에 영향을 주는 작업부하의 편중으로 인한 설비별 작업부하 불균형, 납기촉박성(duedate tightness) 등의 요소에 대한 고려도 찾아보기 힘들다. 또한 수학적으로 최적에 가까운 해를 산출하는 데 많은 시간을 소요함으로써 현장에서 빈번하게 요구되는 재작업계획(rescheduling)에 대한 요구를 수용하기가 어렵다.

작업계획의 실제적 접근에 의한 현장 적용성을 보완하기 위해서는 우선 기존 문제의 가정에서 대안설비에 의한 설비유연성으로 순서제약과 설비제약의 가정을 완화하고, 공용 지그 및 고정구 등의 설비제약을 추가하고, 설비별 작업부하 불균형, 납기촉박성 등의 영향을 고려하여야 한다[4, 15, 19]. 다음은 빠른 시간에 작업계획 산출이 가능한 기법의 적용으로 현장의 예측하지 못한 설비고장, 공구파손, 긴급품발생, 자재고갈, 품질문제, 작업자결근, 주문취소, 납기변경, 잔업, 교대작업, 공정계획변경과 작업시간부정확 등의 동적상황을 반영한 재작업계획이 쉽게될 수 있어야 한다[10, 11, 21].

설비유연성은 작업계획문제의 기본 가정을 완화시켜 작업계획의 성능을 향상시키는 효과를 가져오는 것으로 이에 대한 많은 연구가 필요하다. 설비유연성은 한 부품의 공정을 작업하는 설비가 복수 개로 지정되어 있는 확률로 볼 수 있고 이 확률이 높아짐에 따라 작업계획의 성능을 향상시킬 수 있다[16, 22]. 최근의 설비들은 자동 공구 및 패릿 교환 장치 등을 갖추므로써 다양한 공정의 작업을 소화할 수 있는 설비유연성이 증대되고 있다[16, 21, 22]. 그러나 설비유연성을 높이는데 필요한

대안설비, 공구, 공용 지그 및 고정구 등의 추가 비용 발생과 작업계획 성능 향상으로 얻어지는 정량화된 이익에 대한 정보가 부족한 실정이다[14].

추가설비 제약이 될 수 있는 지그 및 고정구와 같은 보조설비가 항상 존재하는 무한 자원이 아닌 경우에 이를 고려하지 않는 작업계획은 작업수행이 불가능 할 수 있다[11]. 설비에서 작업 계획된 부품의 공정을 작업하려고 할 때 필요한 지그 및 고정구가 다른 작업에 사용되고 있어 구할 수 없는 경우가 있다. 지그 및 고정구는 부품을 정확하고 빠르게 설비에 고정시키고 공구를 안내하여 경제적인 작업 수행을 돕는 보조 설비이다. Job shop에서는 흔히 복잡한 형태를 갖는 고가의 지그 및 고정구는 여러 공정이 공유하여 사용한다. 따라서 공용 지그 및 고정구를 고려하지 않는 작업계획은 현장 적용에 문제를 유발시키지만 아직 이를 제약으로 고려한 작업계획에 대한 연구는 미비한 실정이다[8, 13].

설비유연성과 추가설비 제약 외에도 작업계획의 성능은 설비별 작업부하의 불균형과 납기촉박성 등의 영향을 받는다[10, 24]. 설비별 작업 부하의 편차와 납기촉박성이 낮을수록 작업계획의 성능은 좋아질 수 있지만 현장에서는 주문과다, 긴급품 발생, 편중된 주문, 선호 설비의 존재 등의 다양한 이유로 작업부하의 불균형과 높은 납기촉박성 등이 존재하게 된다[24]. 따라서 생산 활동이 전개되는 상황에서 작업부하의 불균형과 높은 납기촉박성에서도 잘 적용되는 작업계획 방법에 대한 연구가 필요하다.

현장의 예기치 않은 동적 상황의 발생은 재작업계획을 요구하게 되고 이때는 재작업계획 산출 시간 때문에 생산 활동이 지연되지 않아야 한다. 따라서 재작업계획 시간은 작업이 진행되는 일련의 공정들이 완료되고 시작되는 시간 간격보다 짧아야 한다[12]. 작업계획을 컴퓨터로 산출하는 데 있어서 많은 시간을 필요로 하는 작업계획 방법들은 적용이 제한될 수 있다.

할당규칙은 간단한 논리와 구조로 설비유연성과 추가 설비제약을 쉽게 고려할 수 있고 단 한번만(single pass) 작업계획을 전개하는 이유로 예기치 않은 동적 상황에 대처하는 재작업계획을 짧은 시간에 산출 할 수 있다[3, 5, 6]. 할당규칙은 부품의 공정순서에 의하여 선행공정이 작업계획된 후보공정들을 대상으로 공정의 작업시간, 공정의 시작가능시간, 부품의 총작업시간, 부품의 남은 공정의 작업시간, 부품의 공정 수, 작업부하, 납기까지의 작업여유시간(slack time), 부품납기, 납기임계비(critical ratio), 공정납기(operation duedate) 등의 우선순위(priority) 정보로 이용하여 공정을 설비들에게 할당하여 작업계획을 전개해 나간다[1, 3]. 할당규칙은 작업계획에서 여러 장점이 있음에도 불구하고 좋은 성능을 갖는 새로운 할당규칙과 적용에 관한 연구는 미비한 실정이다

다.

본 연구의 목적은 설비유연성에 의한 순서제약 및 설비제약의 가정 완화, 공용 지그 및 고정구 등의 설비제약의 추가, 설비별 작업부하 불균형 및 납기촉박성 등의 요소를 고려하고 예기치 않은 상황을 반영하여 빠른 시간에 재작업계획을 산출할 수 있는 새로운 할당규칙에 의한 작업계획 방법의 개발이다. 제안된 새로운 할당규칙과 작업계획 방법은 컴퓨터 실험을 통하여 설비유연성, 공용 지그 및 고정구와 설비별 작업부하 불균형 및 납기촉박성에서 성능이 비교 분석된다. 본 연구는 기존의 작업계획 연구를 현실성 면에서 보완하여 현장의 정확한 작업계획 및 통제를 가능하게 하고 또한 대안설비 및 지그 및 고정구를 마련하는 비용과 납기준수 및 제조원가를 절감시키는 이익을 비교하는 설비투자모델 등에 활용될 수 있다.

2. 연구 현황

Job shop 작업계획에 관하여 지난 40여 년간 이론 및 실제적 접근 측면에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 기존 연구는 현장에서 효과적으로 운영되는 작업계획에 관한 실제적 접근보다는 수학적으로 최선의 해를 구하는 이론적 알고리즘을 제시하는 데 중점을 두는 경향을 보이고 있다[4, 12]. 이는 MRP 등의 정보시스템을 사용하여 기준생산계획을 세우고 생산 자원에 대한 세부적 작업계획은 현장경험자의 수작업에 의존하는 현상이 많고, 이러한 현장에서 작업계획에 대한 실제적 접근에 관한 학술적 보고에 관심을 보이지 않는 등의 이유로 설명되고 있다[15].

이론적 접근에 관한 연구는 정수계획법이나 동적계획법을 이용하는 최적화(optimization) 모형 및 알고리즘 개발, 시뮬레이션 적용, 새로운 발견적기법 제시, 새로운 할당규칙 개발과 추계적(stochastic) 최적화기법인 유전 알고리즘(genetic algorithm), tabu search와 simulated annealing을 이용한 기법 제시, 뉴럴 네트워크와 전문가 시스템을 적용한 지능형 모형 제시 및 방법 개발 등으로 이루어져 왔다[6].

실제적 접근에 관한 연구는 주로 기존연구의 이론과 실제의 차이를 지적하고 현장에서 잘 적용될 수 있는 작업계획 기법의 필요성을 강조하여 왔다[12, 15, 19]. 작업계획의 실제적 접근 측면을 보완하기 위해서는 설비유연성에 의한 순서제약 및 설비제약의 가정 완화[14, 16, 18, 21, 22, 25], 설비제약의 추가[8, 11, 13]를 소화할 수 있는 기법의 유연성과 현장의 예기치 않은 동적 상황에 실시간으로 대처할 수 있는 빠른 산출시간[3, 5, 6, 12]이 필요함이 지적되어 왔다.

설비유연성에 대한 연구에서 한 부품의 공정을 작업할 수 있는 대안설비의 지정은 작업계획의 성능을 향상시킬 수 있는 중요 요소[14, 22]임이 지적되어 왔다. 설비유연성을 다루는 기존의 방법들은 가장 빨리 작업을 시작할 수 있는 대안설비를 선택하여 평균처리시간을 줄이고[21], 후행공정의 대안설비 수의 합이 적을수록 우선순위를 높게 하여 상대적으로 대안설비가 많이 지정된 부품의 작업계획을 뒤로 미뤄 평균순수납기 지연을 줄이고[18], 즉시 이용 가능한 설비를 선택하여 평균설비가동률을 향상[25]시키고 있다.

지그 및 고정구와 같은 보조 설비에 대한 연구는 설비제약 외에 추가 설비제약이 필요함을 지적하고 있다[11]. 이러한 기본 설비 외의 추가설비 제약을 고려하지 않으면 설비가 하나의 공정을 완료하고 다음 공정의 작업이 가능하여도 작업에 꼭 필요한 보조설비가 없으므로 공정을 시작할 수 없음이 지적되었다[8, 13].

설비별 작업부하의 불균형과 납기촉박성이 높을수록 작업계획의 성능을 낮추는 중요 변수임이 지적되어 있다[9, 24]. 기존 연구는 설비별 작업부하의 불균형이 작업계획의 성능을 저하시키므로 현실적인 작업계획의 산출을 위해서는 설비별로 작업부하가 균형을 이룬다는 가정을 완화시키고 이를 고려하는 방법의 필요성을 지적하였다.

Job shop 현장에서는 작업이 진행되는 일련의 공정들의 완료시각 사이에 끊임없이 산출되어야 하는 재작업계획 만이 있을 뿐이라는 지적이 있다[12]. 이는 예기치 않은 동적 상황의 발생으로 빈번히 재작업계획이 필요함을 강조하고 있는 것으로 보인다. 기존 연구들은 현장의 여러 돌발 상황을 고려한 실시간 작업계획에 관한 연구를 소홀히 하였음이 지적되어 있다[12, 19]. 또한 생산활동을 정확히 예측하여 일정 기간 동안 작업계획의 수정이 발생하지 않을 수 있는 현장은 거의 존재하지 않으므로 많은 계산시간이 소요되는 기법은 유용한 방법이 아닐 수 있음이 지적되어 있다[4, 23].

이와 같이 작업계획의 현장 적용성을 보완하기 위한 실제적 접근은 여러 추가 제약을 고려할 수 있고 빠른 산출시간을 갖는 방법이 필요함을 보이고 있다. 할당규칙은 간단한 구조로 추가제약의 고려가 쉽고 짧은 계산시간에 재작업계획 산출이 가능하여 생산활동의 동적 상황에 대처하기가 비교적 용이하다는 장점을 갖는다[1, 3, 5, 6]. 그러나 할당규칙은 작업계획에 사용하는 국부적인 정보의 한계로 최적화기법이나 발견적기법에 비하여 낮은 성능의 작업계획을 산출한다는 단점이 있다[6]. 또한 다양한 성능평가척도와 job shop 가정에서 기존의 어떤 할당규칙도 다른 할당규칙들 보다 일관성 있게 좋은 성능을 보이지 못하므로 실제 현장에서 상황에 적합한 할당규칙을 선택하기는 어려운 것으로 알려져 있다

[1, 3, 6]. 따라서 기존의 할당규칙보다 비교적 좋은 성능을 갖는 새로운 할당규칙에 의한 작업계획 방법의 연구가 필요하다.

3. 문제설정과 할당규칙

3.1 문제설정

본 연구가 다루는 작업계획 문제를 설정하기 위하여 우선 실제적 접근을 위한 가정 및 추가제약을 제시하고 사용되는 기호를 정의하며 성능평가척도를 정의한다. Job shop 작업계획의 실제적 접근을 위하여 다음 <표 1>과 같이 기본 가정의 완화와 추가제약들을 고려한다.

<표 1> 작업계획의 기본가정과 실제적 접근을 위한 가정

	기본 가정	실제적 접근을 위한 가정
순서제약	각 부품은 서로 독립적인 다른 공정순서를 갖고 한 부품내의 공정은 선·후행 관계가 있다.	변동없음
설비제약	각 설비는 어떤 작업 시점에 하나의 공정만을 작업할 수 있고 작업이 완료되기 이전에 중단하지 않는다.	변동없음
추가설비제약	- 공정을 작업하는 설비는 단일설비로 지정된다. - 설비 외의 모든 자원은 무한하다고 가정한다.	- 공정을 작업하는 복수개의 대안설비가 있다. - 기본 설비 외에 지그 및 고정구와 같은 보조설비는 유한하다고 가정되어 추가설비 제약이 있다.
작업	작업계획 시점에 모든 작업이 시작 가능하다.	- 각 작업의 시작가능시각이 서로 다르다. - 각 작업의 납기가 서로 다르다. - 각 작업의 공정 수가 서로 다르다. - 재작업계획 시점에 완성되지 않은 작업의 남아있는 공정부터 작업 계획이 가능하다.
공정	- 각 공정의 작업시간은 서로 다르다. - 각 공정의 작업시간에는 준비시간과 운반시간이 포함되어 미리 확정적으로 결정되어 있다.	변동없음(설비가 작업 중에 다음 공정에 대하여 지그 및 고정구 등을 사용하여 작업을 준비하고 작업물을 운반한다고 가정함)
설비	작업계획 시점에 모든 설비가 작업 시작 가능하다.	작업계획 시점에 각 설비의 작업 시작가능시각이 서로 다르다.

본 연구에서 사용하는 기호는 부품과 공정을 나타내는 부품 i 의 시작가능시각 s_i , 납기 d_i , 작업계획된 완료시각은 c_i , 부품 i 의 j 번째 공정 (i,j) , 작업시간 pt_{ij} , (i,j) 를 포함한 부품 i 의 나머지 공정수 O_{ij} , (i,j) 를 포함한 부품 i 의 나머지 공정의 작업시간의 합 R_{ij} , (i,j) 를 작업계획하는 시점에서 납기까지의 작업여유시간, $SL_{ij}=(d_i - \sigma_{ij} - R_{ij})$, 공정 (i,j) 의 공정납기 d_{ij} 가 있다. 설비를 나타내는 기호는 설비 k 의 사용가능시각은 f_k , 작업계획된 후 설비 k 의 사용완료시각은 f_{ck} , 설비 k 에서 작업되는 공정의 작업시간의 합 fw_k , (i,j) 의 대안 설비 수 m_{ij} , 공정 (i,j) 의 대안 설비 집합 MC_{ij} , (i,j) 의 대안설비 중에서 (i,j) 의 작업을 위해 선택된 설비는 mm_{ij}^* , 지그 및 고정구 g 의 사용가능시각은 h_g 로 한다. 작업계획 방법을 표현하기 위해서 사용되는 기호는 (i,j) 를 가장 빨리 시작할 수 있는 시각 σ_{ij} , 알고리즘의 t 반복에서 작업계획 가능한 공정들의 집합 S_t , t 반복까지 작업계획된 공정들의 집합은 PS_t 로 정의한다. 설비가동률은 $U_{mean} = \sum_i \sum_j pt_{ij} / \sum_k f_{ck}$ 로 정의하는데, 분모에서 총처리시간 대신 각 설비의 사용완료시각을 사용하는 것은 작업계획을 일련의 제작

업계획의 한번의 시도로 보기 때문이다.

본 연구에서는 작업계획의 현장 적용을 위한 실제적 접근을 위하여 평균처리시간과 평균순수납기지연을 작업계획 방법의 성능평가 척도로 사용하고자 한다. 작업계획되는 모든 부품의 완료시간 합을 부품수로 나누어 구하는 평균처리시간 $C_{mean} = \sum_i c_i / m_j$ 은 공장의 혼잡도와 재공재고의 수준을 나타내는 척도로 현장에서 중요하게 다루어져 왔다[3]. 여기서 m_j 는 부품의 최대수이다. 납기가 지연된 부품의 총 납기지연시간의 합을 부품수로 나누어 구하는 평균순수납기지연 $T_{mean} = \sum_i [c_i - d_i]^+ / m_j$ 은 고객의 만족도와 납기지연벌금에 관련되어 있어 이론 및 현장 적용 연구 모두에서 중요한 척도로 연구되어 왔다 [18, 24]. 여기서 $[x]^+ = \max(x, 0)$ 이다.

3.2 할당규칙 정보

할당규칙은 부품의 공정순서에 의하여 선행공정이 작업계획된 후보공정들을 선택하여 설비들에게 작업계획하는 우선순위 정보로 공정의 작업시간 pt_{ij} , 공정의 시작가능시각 σ_{ij} , 부품의 총작업시간 R_{i1} , 부품의 남은 공정의 작업시간 R_{ij} , 부품의 남아 있는 공정 수 O_{ij} , 작업부하, 납기까지의 작업여유시간 SL_{ij} , 부품납기 d_i , 납기 임계비, 공정납기 d_j 등을 이용한다[1, 3, 5, 7, 24]. 공정 납기 d_{ij} 는 부품 i 의 납기를 공정들에게 배분한 것으로 납기지연을 줄이는 작업계획에서 유용한 정보로 알려져 왔다[1, 24]. 공정납기를 주는 방법은 TWK[1, 24], $d_{ij} = d_{i-1} + pt_{ij} / R_{i1} \times d_i$ 가 효율적인 것으로 알려져 있는데, 이는 부품납기와 그 부품의 총작업시간의 차인 작업여유를 해당 부품의 공정에 배분하는 방법이다. 다음 <표 2>는 기존에 개발된 할당규칙, 사용하는 정보와 우선순위 지표를 보이고 있다. 모든 할당규칙은 계산된 우선순위 위치표의 값이 낮은 공정일수록 할당을 위한 우선순위가 높은 것으로 한다.

공정의 작업시간을 우선순위 정보로 사용하는 할당규칙 SPT는 최소 pt_{ij} , LPT는 최대 pt_{ij} 을 갖는 공정을 우선 작업계획하는 방법이다[3]. 공정의 시작가능시각을 우선순위 정보로 사용하는 할당규칙 FCFS는 가장 빠른, LCFS는 가장 늦은 σ_{ij} 을 갖는 공정을 우선 작업계획하는 방법이다[3]. 부품의 총작업시간과 남아 있는 작업시간을 우선순위 정보로 사용하는 할당규칙 TWR은 R_{ij} 이

공정의 작업 시간과 순수납기 지연의 예측치를 사용하는 COVERT와 ATC는 작업시간은 작고 작업계획에서 예측되는 순수납기 지연이 큰 공정을 우선하여 작업계획하는 방법이다[1, 18]. 이 할당규칙은 매개변수를 추정하기가 어렵다는 단점으로 현장에서 사용되기에는 제한이 있을 수 있다[1, 18].

앞에서 언급하였듯이 할당규칙은 작업계획 문제의 실

<표 2> 기존의 할당규칙

할당규칙	할당규칙이 사용하는 정보	우선순위지표
SPT	공정의 작업시간	pt_{ij}
LPT	공정의 작업시간	$-pt_{ij}$
FCFS	공정의 시작가능시각	σ_{ij}
LCFS	공정의 시작가능시각	$-\sigma_{ij}$
TWR	부품의 총작업시간	R_{ij}
MWKR	부품의 남아있는 작업시간	$-R_{ij}$
LWKR	부품의 남아있는 작업시간	R_{ij}
MOPNR	부품의 남아 있는 공정 수	$-O_{ij}$
LOPNR	부품의 남아 있는 공정 수	O_{ij}
MST	납기까지 작업여유시간	SL_{ij}
EDD	부품납기	d_i
MDD	수정된 부품납기	$\max\{d_i, \sigma_{ij}+R_{ij}\}$
ODD	공정납기	d_{ij}
MOD	수정된 공정납기	$\max\{d_{ij}, \sigma_{ij}+pt_{ij}\}$
CEXSPT	수정된 작업시간, 공정납기	$d_i - R_{ij} - \sigma_{ij}, d_{ij} - pt_{ij} - \sigma_{ij}$
Hybrid	수정된 작업부하, 작업부하	$\max\{d_i, \sigma_{ij}+R_{ij}\}, \max\{d_{ij}, \sigma_{ij}+pt_{ij}\}$
CR+SPT	납기 임계비, 공정납기	$\max\{\sigma_{ij}+(d_i-\sigma_{ij})/R_{ij}, pt_{ij}, \sigma_{ij}+pt_{ij}\}$
S/RPT+SPT	납기까지 작업여유시간, 공정납기	$\max\{\sigma_{ij}+S_{ij}/R_{ij}, \sigma_{ij}+pt_{ij}\}$
COVERT	공정의 작업시간, 순수납기 지연 예측치	$[(1-(d_i-r_{ij}-t)/k \cdot b \cdot r_{ij})/pt_{ij}]^k$
ATC	공정의 작업시간, 순수납기 지연 예측치	$-\exp[-(d_i-b(w_i-pt_{ij})-pt_{ij}-t)/k \cdot p]/pt_{ij}$

최소인, MWKR은 R_{ij} 이 최대인, LWKR은 R_{ij} 이 최소인 공정을 우선하여 작업계획하는 방법이다[3]. 부품의 남아 있는 공정 수를 우선순위 정보로 사용하는 MOPNR은 O_{ij} 가 최대인, LOPNR은 O_{ij} 가 최소인 공정을 우선하여 작업계획하는 방법이다[3, 5].

납기까지 작업여유시간을 우선순위 정보로 사용하는 MST는 SL_{ij} 가 최소인 공정을 우선하여 작업계획하는 방법이다[1]. EDD는 d_i 가 가장 빠른 공정을 우선 작업계획하고, MDD는 EDD를 확장한 것으로 원래의 부품 납기인 d_i 와 작업계획에 의하여 실제 부품이 작업 완료될 수 있는 시각 $\sigma_{ij}+R_{ij}$ 를 비교하여 큰 값으로 부품 납기를 수정한 후 수정된 납기가 빠른 부품의 공정을 우선 작업계획하는 방법이다[1].

공정납기를 우선순위 정보로 사용하는 ODD는 d_{ij} 가 빠른, MOD는 d_{ij} 와 작업계획에 의하여 실제 공정이 작업 완료될 수 있는 시각 $\sigma_{ij}+pt_{ij}$ 를 비교하여 큰 값으로 공정납기를 수정한 후 d_{ij} 가 빠른 공정을 우선하여 작업계획하는 방법이다. CEXSPT[1]는 늦은 부품을 독촉하고 긴 작업시간을 갖는 공정의 부품이 늦지 않도록 작업계획하고, Hybrid[24]는 평균 설비 작업부하보다 큰 설비에서는 MDD를 사용하고 그 외의 설비에서는 MOD를 사용하여 공정을 작업계획한다. CR+SPT[1]는 납기 임계비 $CR=(d_i-\sigma_{ij})/R_{ij}$ 나 공정의 작업시간을, S/RPT+SPT[1]는 SL_{ij} 를 사용한 납기임계비나 공정의 작업시간을 사용하는 방법이다.

제적 접근을 위한 가정의 완화나 기본 설비 외의 추가 설비 제약 등을 쉽게 고려할 수 있고 매우 빠른 시간에 재작업계획을 산출할 수 있지만, 다양한 성능평가척도와 현장의 환경에서 일관성 있게 좋은 결과를 보이지 못한다는 단점이 있다[1, 3, 6]. 따라서 실제적 접근을 위한 작업계획의 성능평가척도와 환경에서 빠른 산출시간을 갖으면서도 좋은 품질을 보일 수 있는 새로운 할당규칙에 의한 작업계획 방법의 개발이 필요하다.

4. 작업계획의 실제적 접근

4.1 새로운 할당규칙

작업계획의 성능평가척도 평균처리시간 C_{mean} 에서는 공정의 작업시간, 부품의 총작업시간, 부품의 남아 있는 작업시간, 부품의 남아 있는 공정 수 등의 정보를, 평균 순수납기 지연 T_{mean} 에서는 부품납기, 공정납기, 수정된 부품이나 공정납기, 작업부하, 납기임계비 등의 정보를 사용하는 할당규칙이 잘 적용되어 왔다[1, 3, 5, 7].

할당규칙과 성능에 관한 기존연구를 토대로 컴퓨터 실험을 통하여 C_{mean} 에서는 부품의 남은 작업시간과 부품의 남은 공정 수가 적을 수록, T_{mean} 에서는 납기까지 부품의 총작업시간, 작업여유시간과 공정의 작업시간은 적고 부품의 남은 작업시간은 클수록, 부품이나 공정납

기는 촉박할수록 우선 작업하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 또한 설비의 작업부하가 높으면 수정된 부품납기, 그렇지 않으면 수정된 공정납기가 촉박할수록 우선하여 작업계획하면 T_{mean} 을 줄이는 효과가 있었다.

설비유연성을 향상시키는 대안설비가 존재하는 경우, 부품의 남아 있는 공정 수와 작업시간을 나타내는 $O_{ij}=1+\sum_{j=1}^{m_{ij}} 1$ 와 $R_{ij}=pt_{ij}+\sum_{j=1}^{m_{ij}} pt_{ij}$ 를 대안설비를 고려하여 $OM_{ij}=1+\sum_{j=1}^{m_{ij}} (1/m_{ij})$ 와 $RM_{ij}=pt_{ij}+\sum_{j=1}^{m_{ij}} (pt_{ij}/m_{ij})$ 로 수정하여 사용하는 것이 작업계획의 성능을 높일 수 있다[18]. 이 방법은 할당규칙이 작업계획하는 공정을 선택할 때 후행공정들의 대안설비 수가 적을 수록 우선순위를 높게 하여 상대적으로 대안설비를 많이 갖는 부품의 작업계획을 뒤로 미루는 방법이다.

다음 <표 3>은 C_{mean} 과 T_{mean} 를 줄이기 위해서 본 연구가 제시하는 새로운 할당규칙 RMO와 RMSDOD를 보이고 있다.

<표 3> 새로운 할당규칙

할당규칙	정보	우선순위지표
RMO	부품의 남은 작업시간과 남은 공정 수가 적을 수록 우선 작업 계획	$RM_{ij}+OM_{ij}$
RMSDOD	납기까지 부품의 총작업시간, 작업여유시간, 공정의 작업시간은 적고, 부품의 남은 작업시간은 클 수록 우선 작업계획, 또한 설비의 작업부하가 높으면 수정된 부품납기, 그렇지 않으면 수정된 공정납기가 촉박할수록 우선하여 작업계획	만약 설비가 평균 이상의 작업부하를 갖으면 $RM_{ij}+SL_{ij}/RM_{ij}+pt_{ij}+max_1(d_{ij}, \sigma_{ij}+RM_{ij})$ 그렇지 않으면 $RM_{ij}+SL_{ij}/RM_{ij}+pt_{ij}+max_1(d_{ij}, \sigma_{ij}+pt_{ij})$

4.2 새로운 할당규칙을 사용한 작업계획 방법

Job shop 작업계획 문제의 가능해 공간은 순서제약과 설비제약을 만족하는 작업계획의 집합이다[17]. Active 작업계획 해공간은 가능해 공간의 부분집합으로 어떤 공정도 다른 공정의 작업 지연 없이 더 빨리 시작될 수 없게 하는 작업계획들의 집합으로 최적해를 포함한다[3]. Nondelay 작업계획 해공간은 Active 작업계획 해공간의 부분집합으로 할당가능한 공정 중에서 가장 빨리 시작될 수 있는 공정의 순으로 전개된 가장 효과적인 작업계획들의 집합으로 알려져 있다[3, 16].

본 연구에서 제시하는 작업계획 방법은 nondelay 작업계획 방법에서 할당규칙을 사용한 것으로 선행공정이 완료된 후보공정들 중에서 가장 빨리 시작될 수 있는 공정들에 대해 할당규칙의 가장 낮은 우선순위지표를 갖는 공정의 순으로 작업계획을 전개시키는 방법이다. 제시된 방법은 계획기간 중에 작업계획과 재작업계획을 하는 데 있어서 차이가 없다. 현장에서 선행공정이 작업 완료된 후보공정의 시작가능시간, 기본 설비 및 지그 및 고정구와 같은 추가설비의 시작가능시간과 (i,j)의 대안 설비 집합에 대하여 현장의 작업 진도 및 설비 가용 정

보 등을 활용하고 대안설비와 추가설비인 지그 및 고정구를 다루고 있다는 점에서 기존의 방법과는 차이가 있다. 기법의 절차는 다음과 같다.

단계 0. (작업계획 및 재작업계획 기본 데이터 초기화)

작업계획이나 재작업계획하는 시점에 현장에서 보고된 작업 진도 등의 데이터를 기초로 설비 k의 사용가능시간 f_k , 지그 및 고정구 g의 사용가능시간 h_g , 부품 i의 시작가능시간 s_i 를 지정하고 S_i 를 선행공정이 완료된 공정으로 초기화한다. 계획기간에서 처음 작업계획할 때 부품 i의 시작가능시간 s_i 와 납기 d_i , (i,j)를 작업하는 대안설비 집합 MC_{ij} 는 상위 시스템에서 지시되거나 현장상황을 고려하여 지시된다. $t=1$, $PS_t=\emptyset$, $pt_0=0$, $\sigma_{i0}=s_i$, $\sigma_{i0}=s_i$ 로 둔다. 단계 2에서 사용될 할당규칙을 지정한다.

단계 1. (σ^* 와 mm^* 결정)

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. $\sigma_{ij}=\max\{\sigma_{ij-1}+pt_{ij-1}, f_{mm_{ij}^*}, h_g\}$ 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. (작업계획공정 선택)

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 작업계획될 (i,j)를 선택한다.

단계 3. (f_{mm^*} , h_g 결정 및 종료조건 검사)

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

단계1에서 (i,j)의 대안설비가 여러대 있을 때 가장 빨리 시작하는 설비를 선택하게 하여 작업이 가능한 설비가 쉬지 않도록 한다. 작업계획 가능한 공정 (i,j)의 시작가능시간 σ_{ij} 은 선행공정의 완료시간 $\sigma_{ij-1}+pt_{ij-1}$, 설비의 시작가능시간 $f_{mm_{ij}^*}$ 과 지그 및 고정구의 시작가능시간 h_g 을 비교하여 가장 늦은 시각으로 둔다. 단계 3에서 작업계획 상의 공정 (i,j)의 작업을 완료한 후의 기계 mm^* 의 시작가능시간 f_{mm^*} 은 σ_{ij} , (i,j)의 작업을 시작하기 이전의 f_{mm^*} 와 h_g 을 비교하여 가장 늦은 시각에 pt_{ij} 를 더하여 산출하고 $h_g=f_{mm^*}$ 로 한다.

5. 비교분석

새로운 할당규칙에 의한 작업계획 방법의 성능을 기존의 방법과 비교하였다. 작업계획 방법은 대상 작업과 공정 수가 많고, 설비의 작업부하가 높고, 설비별 작업 부하의 편차가 크고, 부품의 납기촉박성이 높고, 대안설비 수가 적어 설비유연성이 낮고, 공용 지그 및 고정구와 같은 추가설비 개수가 적을수록 좋은 작업계획을 하기가 어려운 것으로 나타났다.

작업계획의 성능 차이를 보이기 위하여 문제 크기는 50(부품수)×10(공정수)×10(설비수)로 하고 설비의 높은 작업부하를 주기 위하여 작업계획 후 설비의 평균가동률을 90% 정도, 설비별 작업부하의 편차를 주기 위하여 부품 내 공정들이 같은 설비를 대안설비로 지정 받을 확률을 10%로 주었다. 부품의 납기촉박성은 작업계획된 후 30% 정도의 부품이 납기 지연되도록 하고, 설비유연성은 대안설비를 갖는 공정의 비율을 30%로 조정하였고, 공정이 갖는 대안설비의 수는 구간 1에서 4를 갖는 일양분포로 발생시켰다. 공정의 작업시간은 1에서 99를 갖는 일양분포를 따라 발생시켰다. 공용지그 및 고정구의 수는 5개로 지정하였고 공정이 공용지그 및 고정구를 사용하는 비율을 30% 정도로 하였다.

이러한 가정으로 임의의 100개 문제를 발생시켜 성능평가척도 C_{mean} 과 T_{mean} 에 대하여 기존 잘 알려져 있는 20개의 할당규칙과 4.2절에서 제시한 2개의 새로운

할당규칙을 사용한 작업계획 방법으로 평가하였다.

<표 4>는 100문제에 대해 2개 성능평가척도에서 22개 할당규칙이 들이 구한 해의 평균 값, 가장 좋은 해를 구한 회수와 각 할당규칙의 순위를 보여주고 있다. 하나의 작업계획을 산출하는 데 소요되는 계산시간은 Pentium IV 1.5 GHz 컴퓨터에서 0.04초 이하이므로 분석에서 제외하였다. 새로운 할당규칙 RMO, RMSDOD는 기존의 다른 할당규칙들 보다 C_{mean} , T_{mean} 에서 비교적 잘 적용되는 것으로 나타났다. RMO는 C_{mean} , RMSDOD는 T_{mean} 에서 안정적으로 좋은해를 구하였다. C_{mean} 에서는 부품의 남은 작업시간과 공정 수가 적을수록 우선 작업계획하는 할당규칙의 정보가 좋은 결과를 보이는 것으로 나타났다. T_{mean} 에서는 설비의 작업부하가 높으면 수정된 부품납기가, 그렇지 않으면 수정된 공정납기가 촉박하고, 납기까지 부품의 총작업시간, 작업 여유시간과 공정의 작업시간은 적고, 부품의 남은 작업시간은 클수록 우선 작업계획하는 할당규칙의 정보가 유리한 것으로 보인다. 해의 개선율은 (할당규칙의 평균해 - 새로운 할당규칙 해)/할당규칙의 평균 해로 나타내었다.

실제적 접근을 위한 job shop 작업계획에서 새로운 할당규칙에 의한 작업계획 방법의 실험결과는 제시한 할당규칙 RMO, RMSDOD가 해당되는 성능평가척도 C_{mean} 과 T_{mean} 에서 좋은 해를 구함으로써 생산리드타임, 납기지연벌금과 재고비용을 감소시켜 제조원가 절감에

<표 4> 할당규칙이 구한 해의 평균, 가장 좋은해를 구한 회수와 순위

	C_{mean}				T_{mean}			
	평균해 ¹⁾	회수 ²⁾	순위 ³⁾	개선율 ⁴⁾	평균해	회수	순위	개선율
SPT	2007	0	6	0.07	212	2	6	0.21
LPT	2390	0	18	-0.1	424	0	22	-0.59
FCFS	2420	0	19	-0.12	360	0	18	-0.35
LCFS	2073	0	10	0.04	270	0	15	-0.01
TWR	1893	31	3	0.13	232	1	10	0.13
MWKR	2474	0	22	-0.14	402	0	21	-0.5
LWKR	1887	33	2	0.13	238	3	12	0.11
MOPNR	2468	0	21	-0.14	389	0	20	-0.46
LOPNR	1980	0	4	0.08	261	0	14	0.02
MST	2242	0	13	-0.04	257	0	13	0.04
EDD	2016	0	8	0.07	210	3	5	0.21
MDD	2002	0	5	0.07	196	17	3	0.27
ODD	2449	0	20	-0.13	361	0	19	-0.35
MOD	2285	0	17	-0.06	217	1	7	0.19
CEXSPT	2181	0	12	-0.01	218	1	8	0.18
Hybrid	2107	0	11	0.03	188	26	2	0.3
CR+SPT	2280	0	16	-0.05	219	5	9	0.18
S/RPT+SPT	2027	0	9	0.06	209	4	4	0.22
COVERT	2247	0	14	-0.04	294	0	16	-0.1
ATC	2273	0	15	-0.05	302	0	17	-0.13
RMO	1882	52	1	0.13	236	1	11	0.12
RMSDOD	2015	1	7	0.07	184	41	1	0.31

100문제에서 각 방법이 구한 1) 평균해, 2) 가장 좋은해를 구한 회수, 3) 할당규칙 순위

4) 해의 개선율=(할당규칙의 평균해 - 새로운 할당규칙 해)/할당규칙의 평균해

기여할 수 있음을 보여 주고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 현장 적용적 측면이 보완된 job shop 작업계획의 실제적 접근을 위하여 새로운 할당규칙 RMO, RMSDOD에 의한 작업계획 방법을 제시하였다. 가정된 문제의 상황은 설비유연성에 의한 순서제약 및 설비제약의 가정 완화, 공용 지그 및 고정구 등의 설비제약의 추가, 설비별 작업부하 불균형 및 납기촉박성 등의 요소를 고려하고 예기치 않은 상황을 반영한 빠른 재작업계획 산출 등이다. 제시된 작업계획 방법과 할당규칙 RMO는 C_{mean} 에서, RMSDOD는 T_{mean} 에서 기존의 할당규칙들 보다 좋은 작업계획을 산출하는 것으로 나타났다.

본 연구가 제시한 새로운 할당규칙들은 실제적 측면에서 설비유연성, 불균형 작업부하와 추가설비 제약이 있고 빈번한 재작업계획이 필요한 현장에서 부품의 처리시간을 줄여 제조 원가 절감에 기여할 수 있고 납기 지연에 따른 벌금을 줄이고 고객 만족도와 기업의 신용도 향상에 기여할 수 있다. 또한 정확한 작업계획에 의한 생산활동으로 상위시스템에 작업진도와 자원의 여력에 대한 데이터를 제공함으로써 공정계획과 생산계획의 정밀도를 개선시킬 수 있다. 이론적 측면에서 제안하고 있는 방법이 새로운 할당규칙이나 작업계획 방법의 개발에 응용될 수 있고, 높은 품질의 작업계획 산출 능력이 있는 최적화 기법이나 유전알고리즘에 의한 작업계획에 좋은 초기해를 제공하여 이들 방법의 부담스러운 계산시간을 줄이는데 기여할 수 있다.

제시된 새로운 할당규칙과 작업계획 방법은 실제적 접근이 고려된 작업계획 문제의 처리시간과 납기 지연 성능평가 척도에서 비교적 좋은 작업계획을 산출하고 있으나 공정의 준비시간이 제약으로 고려되는 경우와 다양한 성능평가척도를 동시에 고려하고 있지 않다. 향후 준비시간을 고려하는 다목적 작업계획 방법에 대한 연구가 필요하리라 본다.

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.1-3, 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] Fredendall, L. D., Melnyk, S. A., and Ragatz, G., "Information and Scheduling in A Dual Resource Constrained Job Shop", *International Journal of Production Research*, 34(10): 2783-2802, 1996.
- [9] Fry, T. D., Philipoom, P. R., and Blackstone, J. H., "A Simulation Study of Processing Time Dispatching Rules", *Journal of Operations Management*, 7(4): 77-92, 1988.
- [10] 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.
- [11] Gargeya, V. B. and Deane, R. H., "Scheduling Research in Multiple Resource Constrained Job Shops: A Review and Critique", *Journal of Operations Management*, 34(8): 2077-2097, 1996.
- [12] Graves, S. C., "A Review of Production Scheduling", *Operation Research*, 29(4): 646-674, 1981.
- [13] Gunther, R. E., "Server Transfer Delays in A Dual Resource Constrained Parallel Queueing System", *Management Science*, 25(12): 1245-1257, 1979.
- [14] Hankins, S. L., Wysk, R. A., and Fox, K. R., "Using a CATS Database for Alternative Machine Loading", *Journal of Manufacturing Systems*, 3(2):

115-120, 1984.

- [15] Hoitomt, D. J., Luh, P. B., and Pattipati, K. R., "A Practical Approach to Job-Shop Scheduling Problems", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(1): 1-13, 1991.
- [16] 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.
- [17] Kim, Y. D., "A Backward Approach in List Scheduling Algorithms for Multi-Machine Tardiness Problems", *Computers and Operations Research*, 22(3): 307-319, 1995.
- [18] Kim, Y. D., "A Comparison of Dispatching Rules for Job Shops with Multiple Identical Jobs and Alternative Routeings", *International Journal of Production Research*, 28(5): 953-962, 1990.
- [19] McKay, K. N., Safayeni, F. R., and Buzacott, J. A., "Job Shop Scheduling Theory: What is Relevant ?", *Interface*, 18(4): 84-90, 1988.
- [20] Muhlemann, A. P., Lockett, A. G., and Farn, C. K., "Job Shop Scheduling Heuristics and Frequency of Scheduling". *International Journal of Production Research*, 20(2): 227-241, 1982.
- [21] Nasr, N. and Elsayed, E. A., "Job Shop Scheduling with Alternative Machines", *International Journal of Production Research*, 28(9): 1595-1609, 1990.
- [22] Nof, S., Barash, M., and Solberg, J., "Operational Control of Item Flow in Versatile Manufacturing Systems", *International Journal of Production Research*, 17(5): 479-489, 1979.
- [23] Parunak, H. V. D., "Characterizing The Manufacturing Scheduling Problem", *Journal of Manufacturing System*, 10(3): 241-259, 1991.
- [24] 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.
- [25] Wilhelm, W. E. and Shin, H., "Effectiveness of Alternative Operations in a Flexible Manufacturing System", *International Journal of Production Research*, 23(1): 65-79, 1985.